گروه مپنا
شرکت مهندسی و ساخت
بویلر و تجهیزات مپنا

MAPNA Boiler

گاهنامه تخصصی

آب و بخار

شماره ۱۳ - پاییز ۱۴۰۴

صاحب امتیاز و مدیرمسئول | فـردیـن شهـریـاری

شورای سیاست‌گذاری | اسماعیل بینایی‌باش، محمد دیسفانی، آزاده عالیشاه و مهرداد مولودی

مدیـر اجـرایی | علیرضا رضـایی

سردبیـران | صـابــر امینـی
علیرضا رضـایی
خشایار واعظـی

ویراستار، گرافیست و صفحه آرا | محسن پریمـی

همکاران این شماره | علـی اسـمعیلی، رضـا بـراتی، فرشیـد پرستـار، محسـن پـریمی، فرهـاد سررشـته‌داری، سـپیده سهـراب، مهـران شاکـری، بهـروز شـهبازی، حمیـد شوشـتر، سـید عبـدالله شـیخ الاسـلامی، محـدثه طاهـری، مهـدی طلائیـان، امیرحسـین عبدالملکـی، علـی عشقـی ثانـی، علـی فیـروزی، بهـزاد قشـلاق سـفلایی، زهـرا کلی‌ونـد، علی متولی، احسـان مرتضـوی، مسعـود مستقیـم، میثـم مظلومـی، زهـرا منصوری، عمـار میـرزائی، فرید میرسـلیمانی، طاهر نظری، خشایار واعظی

نیم‌نگاه

۴ برنامه‌ریـزی «ومپنا» برای دو عرضـه اولیـه

تکنولوژی

۱۰ ارزیابی رفتار کمانش غیرخطی تیوب‌های اواپراتور در بویلرهای پکیج صنعتی با استفاده از رویکرد طراحی بر اساس تحلیل (DBA)
۱۸ بالانس جرمی و حرارتی دی‌اریتور در حالت استفاده از بخار خروجی توربین‌های فن و پمپ به عنوان بخار Pegging
۲۳ بررسی تأثیر روش‌های راه‌اندازی پمپ بر گشتاور و انتخاب الکتـروموتور در کاربردهای نیـروگاهی
۳۰ بـررسی و آشنـایی با آزمون RFT جهت تعیین میزان خوردگـی تیـوب‌ها
۳۲ حسگـرهای آکـوستیـک در بویلـرهای بخار
۳۹ مـروری بر فناوری‌های متمرکز انرژی خورشیدی CSP (Concentrated Solar Power)

بازار و کسب و کار

۵۰ بررسی تاثیر سیاست‌های جهانی حفاظت از محیط زیست بر بازار صنایع حوزه نفـت و گـاز و فـولاد
۵۵ استراتژی برندسازی بین‌المللی بر اساس مطالعه موردی یک شرکت بازار نوظهـور
۶۲ ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و مدیریت پایان عمر (EoL) پنـل‌های فـوتوولتاییک (PV)
۷۲ از نظریه شانون، اطلاعات معنایی و نظریه بازی تا هـوش مصنوعـی
۷۹ استراتـژی‌ها، فرآیندها و ریسـک‌های تامین
۸۶ آینده انرژی و فناوری‌های پایداری
۹۰ کیفیت: متفـاوت بینـدیشید (شعار جهانی سال 2025)
۹۵ نقش تحـول‌آفرین هـوش مصنـوعی در مدیریت ریسـک پروژه
۱۰۶ نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)

Water & Steam No.13

نیم نگاه...

تشریح مهمترین برنامه‌ها از زبان

محسن امیری، مدیرعامل هلدینگ نیروگاهی ایرانیان مپنا

برنامه‌ریزی «ومپنا» برای دو عرضه اولیه

گروه مپنا به عنوان پیشگام صنعت و فناوری در ایران، از سال ۱۳۷۲ با مأموریت محوری حل چالش های زیرساختی کشور پا به عرصه وجود نهاد. این مجموعه که ابتدا با مدیریت پروژه‌های نیروگاهی آغاز به کار کرد، امروز به یک هلدینگ صنعتی پیشرفته تبدیل شده که در حوزه‌های متنوعی از جمله تولید تجهیزات سنگین نیروگاهی، اجرای پروژه‌های نفت و گاز، توسعه حمل ونقل ریلی و فناوری‌های نوین فعالیت می‌کند. دستیابی به فناوری طراحی و ساخت توربین‌های گازی و حضور مؤثر در بازارهای بین المللی، گواهی بر توانمندی‌های این گروه در مسیر تبدیل شدن به یک قدرت صنعتی پیشرو در منطقه خاورمیانه است.
در همین راستا، محسن امیری مدیر عامل هلدینگ نیروگاهی ایرانیان مپنا در گفت و گویی اختصاصی، به تشریح مهمترین برنامه‌های این گروه پرداخت.
وی از برنامه ریزی برای انجام دو IPO در سال جاری خبر داد و تأکید کرد که شرکت‌های «تولید نیروی برق پرند» و «تجدیدپذیر مپنا» به زودی در بازار سرمایه عرضه خواهند شد.
این اقدام در کنار برنامه‌های دیگری چون مدیریت هوشمندانه بدهی‌ها، افزایش راندمان نیروگاه‌های موجود و تمرکز بر حوزه تجدیدپذیرها، در نهایت منجر به تولید سود با کیفیت و افزایش پایداری شبکه برق کشور خواهد شد.

با توجه به عملکرد سال گذشته گروه مپنا ارزیابی شما از مهمترین دستاوردهای هلدینگ نیروگاهی ایرانیان مپنا در حوزه مالی و عملیاتی چیست؟

یکی از دستاوردهای کلیدی و بسیار حائز اهمیت هلدینگ مدیریت نیروگاهی مپنا در سال گذشته، مدیریت و تسویه کامل بدهی‌ها و مطالبات بین شرکت مدیریت نیروگاه ایرانیان مپنا و گروه مپنا، پیش از عرضه اولیه بود.
ومپنا براساس امیدنامه خود، پیگیری‌های لازم را انجام داد و توانست تا این حساب‌ها را به صفر برساند.
نمونه بارز آن در نیروگاه پرند و با اجرای مدیریت محترم سازمان فرابورس برای تعیین نهایی هلدینگ مدیریت نیروگاهی مپنا در سال گذشته پروژه مدرن خنک کاری هوای ورودی به کمپرسورهای زمان عرضه اولیه برگزار خواهد شد تا با در نظر گرفتن مدیریت و تسویه کامل بدهی‌ها و مطالبات بین شش واحد گازی این نیروگاه محقق شد. این پروژه شرایط بازار بهترین زمان ممکن انتخاب شود. دومین شرکت مدیریت نیروگاه ایرانیان مپنا و گروه مپنا که با سرمایه گذاری صد درصدی خود شرکت به انجام مجموعه شرکت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مپنا پیش از عرضه اولیه بود و مپنا بر اساس امیدنامه رسید منجر به افزایش حدود ۹۰ مگاواتی ظرفیت ۲۰۰ مگاواتی ترکیبی خورشیدی خود پیگیری‌های لازم را انجام داد و توانست تا این تولید برق نیروگاه در زمان پیک بار شد. این افزایش و بادی است جلسه هیئت پذیرش این شرکت در حساب‌ها را به صفر برساند.

در این فرآیند، به جای ریال که با توجه به افت شدید ارزش آن در ماه‌های اخیر همراه با ریسک بود، هوشمندانه به سمت دریافت دارایی‌های ملموس و موردنیاز خود، یعنی قطعات و تجهیزات نیروگاهی که برای اورهال‌ها و تعمیرات اساسی نیروگاه‌ها ضروری بود، حرکت کردیم. این تصمیم استراتژیک نه تنها از کاهش ارزش دارایی‌ها جلوگیری کرد و حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد سودآوری برای ومپنا به همراه داشت. این اقدام را می‌توان یکی از دستاوردهای ممتاز سال گذشته دانست که نشان دهنده عمل به تعهدات در قبال سهامداران و رعایت دقیق قوانین سازمان بورس پس از عرضه اولیه بوده است.

چه اقدامات عملیاتی مشخصی در زمینه بهینه‌سازی و افزایش راندمان نیروگاه‌های تحت مدیریت ومپنا صورت گرفته است؟

از جمله اقدامات عملیاتی بسیار مؤثر، اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی و افزایش راندمان در نیروگاه‌های تحت مدیریت بود. نمونه بارز آن، در نیروگاه پرند و با اجرای پروژه مدرن خنک کاری هوای ورودی به کمپرسورهای شش واحد گازی این نیروگاه محقق شد. این پروژه که با سرمایه‌گذاری صددرصدی خود شرکت به انجام رسید، منجر به افزایش حدود ۹۰ مگاواتی ظرفیت تولید برق نیروگاه در زمان پیک بار شد. این افزایش تولید که از حدود دو ماه و نیم پیش به طور عملی به شبکه سراسری برق کشور تزریق می‌شد، به طور رسمی در هفته گذشته با حضور وزیر محترم نیرو و مدیران ارشد گروه به بهره‌برداران رسمی رسید. این اقدام، سهم قابل توجهی در بهبود مدیریت تولید و مصرف برق داشت. همچنین، پروژه بازچرخانی آب پساب شهر جدید پرند نیز با همین حضور افتتاح شد که باعث شد نیروگاه پرند دیگر از آب‌های زیرزمینی یا خط شرب استان تهران استفاده نکند.

برنامه هلدینگ نیروگاهی ایرانیان مپنا برای عرضه اولیه (IPO) زیرمجموعه‌های خود چیست؟

براساس مصوبه رسمی هیئت مدیره هلدینگ مپنا، برنامه ریزی دقیقی برای انجام دو عرضه اولیه در سال جاری داریم. اولین مورد، شرکت «تولید نیروی برق پرند» است که نماد آن با نام «پرند» در فرابورس ایران پذیرش شده و کلیه مراحل اداری و نظارتی آن به اتمام رسیده است. در همین راستا جلسه‌ای با مدیریت محترم سازمان فرابورس برای تعیین نهایی زمان عرضه اولیه برگزار خواهد شد تا با در نظر گرفتن شرایط بازار، بهترین زمان ممکن انتخاب شود. دومین مجموعه، شرکت «تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مپنا» بوده که دارای ظرفیت ۲۰۰ مگاواتی ترکیبی خورشیدی و بادی است. جلسه هیئت پذیرش این شرکت به عنوان نخستین مجموعه تخصصی نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور است که فرایند عرضه اولیه را آغاز می‌کند که خود نقطه عطفی در بازار سرمایه ایران محسوب می‌شود.

باتوجه به برنامه‌های توسعه‌ای گروه مپنا، در مورد پروژه‌های کلان افزایش ظرفیت و توسعه‌ای نیروگاهی که در دست اجرا دارید، توضیح دهید.

مهمترین پروژه توسعه‌ای در دست اجرا، تکمیل فرایند سیکل ترکیبی کردن نیروگاه‌های موجود گروه است. به طور خاص، پروژه افزودن واحدهای بخار به بلوک سوم نیروگاه عسلویه و بلوک سوم نیروگاه فردوسی در دست اجرای سریع قرار دارد. این پروژه عظیم با سرمایه گذاری کامل داخلی و بدون استفاده از تسهیلات بانکی یا منابع صندوق توسعه ملی، با هزینه‌ای بالغ بر ۳۰۰ میلیون یورو در حال پیشرفت است. پیش‌بینی می‌شود این دو واحد بخار، هر یک با ظرفیت ۱۶۰ مگاوات (جمعا ۳۲۰ مگاوات)، تا پیش از آغاز پیک بار سال آینده به شبکه سراسری برق کشور متصل شوند.
پیامد مستقیم این پروژه، صرفه‌جویی سوخت بسیار قابل توجهی معادل حدود دو میلیون مترمکعب گاز در روز خواهد بود، چرا که با اضافه شدن واحد بخار، راندمان نیروگاه به شدت افزایش یافته و برای تولید همان میزان برق، سوخت بسیار کمتری مصرف می‌شود.

در مورد فعالیت‌های آب شیرین‌کن گروه مپنا توضیح دهید؛ چه برنامه‌های توسعه‌ای برای افزایش ظرفیت این بخش در دست دارید؟

شرکت تولید آب و برق قشم که از زیرمجموعه‌های گروه مپنا است، در حال حاضر مسئولیت تامین بخشی از آب شرب جزیره قشم را بر عهده دارد. این شرکت روزانه حدود ۱۴ هزار مترمکعب آب دریا را شیرین کرده و در اختیار آبفای استان هرمزگان قرار می‌دهد که سهمی حدود ۳۰ درصدی در تامین آب روستاهای منطقه را دارد. برنامه توسعه‌ای ما، افزایش ۱۰ هزار مترمکعبی ظرفیت به این مجموعه در روز است. زمین این پروژه از منطقه ویژه اقتصادی قشم تخصیص یافته و عملیات پایه‌ریزی و تحکیم بستر نیز انجام شده است. مناقصه خرید تجهیزات پیشرفته سیستم RO (اسمزمعکوس) نیز برگزار شده است. منابع مالی این طرح از طریق خود گروه تامین شده و نیاز به تسهیلات خارجی ندارد. در حال حاضر منتظر اخذ مجوزهای نهایی از استانداری هرمزگان و دبیرخانه شورای عالی مناطق آزاد هستیم تا کار اجرایی به سرعت آغاز شود.

در حال حاضر مجموع ظرفیت اسمی نیروگاه‌های تحت مدیریت مپنا چه مقدار است؟

هم اکنون گروه مپنا مدیریت مجموعه‌ای از نیروگاه‌ها را بر عهده دارد که مجموع ظرفیت اسمی آنها در محدوده ۶۵۰۰ تا ۷۰۰۰ مگاوات قرار دارد. این ظرفیت، سهم ۱۰ درصدی از کل ظرفیت نیروگاهی کشور را تشکیل می‌دهد و نقش کلیدی در تامین برق پایدار ایران ایفا می‌کند.

آیا برنامه‌ای برای افزایش سرمایه شرکت در دستور کار قرار دارد؟

بله، افزایش سرمایه از جمله اولویت‌های مدیریتی مجموعه است که در این زمینه دو مسیر را دنبال خواهیم کرد؛ اول، افزایش سرمایه از محل سود انباشته سنوات گذشته است که مجوزهای لازمه آن از سازمان بورس و فرابورس اخذ شده و این موضوع در مجمع عمومی نیز به سهامداران عزیز ابلاغ شد. دوم، برنامه‌ریزی برای افزایش سرمایه از محل منابع حاصل از عرضه سهام خواهد بود که در این خصوص در حال رایزنی با صندوق‌های سرمایه‌گذاری و سهامداران عمده هستیم تا از روش‌های مختلف، منابع جدیدی را برای تقویت ساختار مالی شرکت جذب کنیم.

چشم‌انداز گروه مپنا برای حضور در بازارهای بین المللی و توسعه صادرات چگونه است؟

در حوزه صادرات برق، با واقعیت‌های بازارهای منطقه‌ای مواجه هستیم. از یک سو، پیک مصرف برق در کشورهای همسایه مانند عراق، پاکستان و ترکیه تقریبا همزمان با ایران است، از سوی دیگر اولویت مطلق ما در شرایط کنونی، تامین برق پایدار داخل کشور است. اگرچه مجوزهای کلی صادرات در گذشته اخذ شده، اما در عمل به دلیل همین همزمانی و نیاز داخلی، اجازه صادرات در این مدت داده نشده است و تنها موقعیتی که وجود دارد، مجوز احتمالی صادرات برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر جدید بوده که وزارت نیرو اعلام کرده، اما این مجوز هنوز عملیاتی و اجرایی نشده است و در حال حاضر، تمرکز اصلی بر توسعه داخلی و افزایش راندمان خواهد بود.

پیامی که به عنوان چشم انداز آینده شرکت برای سهامداران دارید، چیست؟

مهمترین تعهد و چشم انداز ما برای سهامداران، تولید سود باکیفیت و نقدشوندگی بالا و پرداخت به موقع و سریع‌تر از موعد مقرر سود نقدی است. برای سال مالی گذشته، ومپنا فراتر از تعهد ۳۰ درصدی، سود ۳۵ درصدی را تصویب کرد و مبلغ ۸۰ میلیارد تومان تنها ظرف دو هفته پس از برگزاری مجمع، به حساب سهامداران حقیقی واریز شد که اقدامی کم‌نظیر در بازار سرمایه بود. استراتژی آتی، تمرکز بر توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر و انعقاد قراردادهای فروش برق براساس ماده۴۰ است.

دلیل این انتخاب، اختلاف قابل توجه درآمدی (فروش کیلوواتی ۴۵۰۰ تومان به بالا در تجدیدپذیرها و قراردادهای ماده۴۰ در مقابل قیمت حدود ۲۱۰ تومانی در نیروگاه‌های حرارتی تحت قرارداد با وزارت نیرو) است. این تغییر ترکیب درآمدی، جریان نقدی مطمئن‌تر و با کیفیت‌تری ایجاد کرده و امکان افزایش تدریجی درصد تقسیم سود را فراهم می‌آورد. ما قصد داریم این توسعه را تا حد امکان بدون اتکا به تسهیلات سنگین بانکی و از طریق جذب سرمایه‌گذاران استراتژیک مانند بانک ملت و شرکای خصوصی پیش ببریم تا منافع سهامداران به بهترین شکل حفظ و ارتقا یابد.

کارگروه تکنولـوژی

ارزیابی رفتار کمانش غیرخطی تیوب‌های اواپراتور در بویلرهای پکیج صنعتی با استفاده از رویکرد طراحی بر اساس تحلیل (DBA)

علی اسمعیلی، خشایار واعظی، سید عبدالله شیخ الاسلامی، حمید شوشتر

چکیده

بویلرهای پکیج صنعتی به عنوان یکی از تجهیزات پرکاربرد در صنایع مختلف به ویژه صنایعی که نیاز به بخار فرآیندی در آنها وجود دارد، مورد بهره‌برداری گسترده قرار می‌گیرند. این بویلرها که با جانمایی بخش‌های اصلی اکونومایزر، اواپراتور و سوپرهیتر در قالب یک مجموعه یکپارچه و در هم تنیده، در محل تولید ساخته، مونتاژ و به صورت ماژولار تا محل نصب حمل می‌شوند، در طرح‌ها و پیکربندی‌های متنوعی طراحی و ساخته می‌شوند که یکی از مرسوم‌ترین انواع آن، بویلر پکیج صنعتی تیپ D است. مرجع طراحی بویلرهای پکیج، کد بویلرها و مخازن تحت فشار ASME BPVC Sec.I می‌باشد. یکی از گلوگاه‌های مهم در طراحی این بویلرها، حصول اطمینان از ایمنی تجهیز در برابر پدیده کمانش ستونی تیوب‌های اواپراتور است که مابین درام‌های آب و بخار قرار دارند.

با توجه به این که در کد ASME BPVC Sec.I در خصوص جلوگیری از کمانش این تیوب‌ها الزامات صریحی ذکر نشده است، با استناد به مندرجات بخش PA از کد مذکور، می‌توان به کد ASME BPVC Sec.VIII Div .2 و روش‌های ارزیابی کمانش ارائه شده در آن، در چارچوب رویکرد طراحی بر اساس تحلیل عددی (DBA) مراجعه نمود.

در مقاله حاضر، با استفاده از روش تحلیل کمانش غیرخطی ارائه شده در این کد، ریسک وقوع واماندگی کمانش در تیوب‌های اواپراتور یک بویلر پکیج تیپ D مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده که با توجه به الگوی توزیع بار بر روی این تیوب‌ها، در بخشی از آنها کمانش رخ می‌دهد. به منظور رفع این مشکل، پس از دو مرحله بازطراحی بویلر و افزودن اجزاء تقویتی، نهایتاً ایمنی در برابر کمانش حاصل گردیده است.

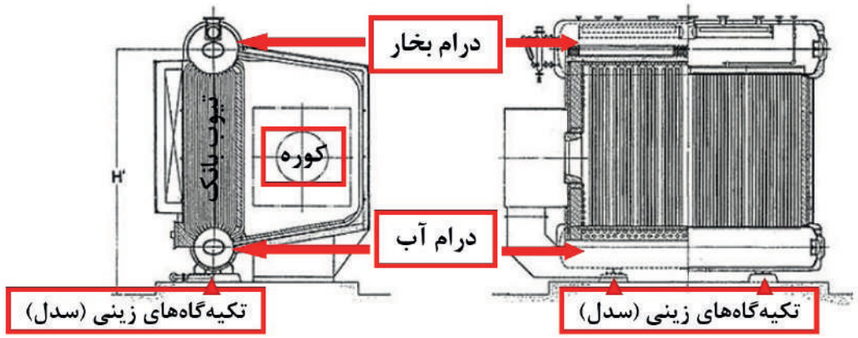
با این وجود، چالش‌هایی در روند اجرای کار از جهت نحوه مدل‌سازی و همچنین تفسیر نتایج از منظر کد وجود دارد که در این مقاله به آنها پرداخته شده است.

کلیدواژه‌ها: کمانش، بویلر پکیج صنعتی، رویکرد طراحی بر اساس تحلیل (DBA)، کد ASME BPVC Sec.VIII Div .2

مقدمه

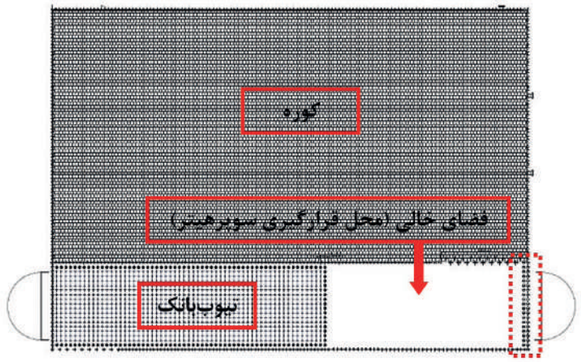
بویلرهای پکیج صنعتی در پلنت‌های مختلف نفت و گاز، پتروشیمی، فولاد، صنایع غذایی و به طورکلی هر صنعتی که نیاز به بخار فرآیندی با دما و فشار بالا وجود داشته باشد، کاربرد دارند. این بویلرها بسته به ملاحظات طراحی، در پیکربندی‌های مختلفی موسوم به بویلرهای تیپ A، I، O و D ساخته می‌شوند. یکی از پرکاربردترین انواع بویلرهای پکیج در صنایع کشور، بویلر تیپ D می‌باشد که طرح شماتیک آن در شکل ۱ ارائه شده است.

این بویلرها از بخش‌های مختلفی شامل اکونومایزر، کوره، مشعل، درام آب، درام بخار، مجموعه تیوب‌های اواپراتور مابین درام آب و بخار (موسوم به تیوب‌بانک)، دیواره‌های تیوب‌دار، سوپرهیتر و دودکش تشکیل می‌شوند. در این نوع بویلرها، وزن کل مجموعه بویلر و متعلقات آن از طریق تکیه‌گاه‌های زینی شکل (سدل) در زیر درام آب و در صورت لزوم از طریق چندین تکیه‌گاه اضافی در زیر بخش کوره ساپورت می‌شود.



شکل ۱. طرح شماتیک بویلرهای پکیج صنعتی تیپ D از دو نما

نکته حائز اهمیت در مورد این طرح آن است که درام بخار که در بالای بویلر قرار دارد، تکیه‌گاه خارجی مستقلی ندارد و وزن آن توسط مجموعه تیوب‌بانک زیر آن تحمل می‌شود. البته این تیوب‌ها به شکل یکنواخت و سرتاسری در زیر کل طول درام بخار قرار ندارند، بلکه به منظور ایجاد یک فضای خالی برای جانمایی تجهیز سوپرهیتر، بخشی از تیوب‌بانک مطابق شکل ۲ حذف می‌شود. لذا به صورت بالقوه این امکان وجود دارد که تیوب‌بانک‌های باقی مانده، تحت تنش‌های فشاری ناشی از وزن درام بخار که بین آنها تقسیم می‌شود، دچار پدیده کمانش ستونی شوند. خصوصاً در مواردی که به دلیل ملاحظات طراحی حرارتی بویلر، نیاز به سوپرهیتر با ابعاد بزرگتری وجود داشته باشد، لازم است فضای مورد نیاز از طریق کاهش بیشتر تعداد تیوب‌ها به وجود آید. در این حالت، به دلیل کاهش تعداد تکیه‌گاه‌های درام بخار، ریسک وقوع واماندگی کمانش به ویژه تحت اثر بارهای اتفاقی (نظیر زلزله) وجود خواهد داشت.



شکل ۲. نمای بالای بویلر پکیج تیپ D؛ موقعیت قرارگیری تیوب‌بانک در زیر درام بخار و فضای خالی مجاور آن

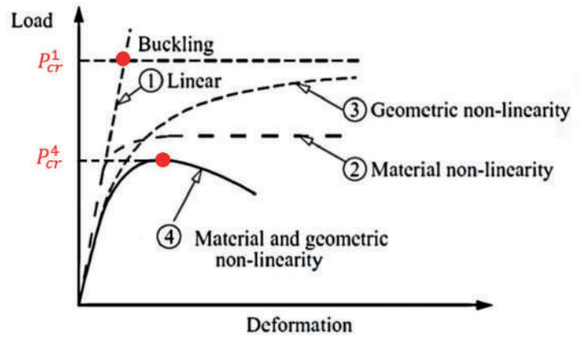
متدولوژی پژوهش

برای یک تجهیز که تحت اثر بارگذاری محوری فشاری در بخشی از اجزاء خود قرار دارد، مود واماندگی کمانش ستونی به صورت یک تغییرشکل ناگهانی با انحراف از وضعیت تعادلی اولیه ظاهر شده و با از دست رفتن ظرفیت تحمل بار تجهیز به طور کامل یا جزئی همراه است که این رفتار در منحنی بارجابجایی سازه نیز قابل تشخیص خواهد بود. برای یک هندسه و شرایط بارگذاری معین، منحنی بارجابجایی و مقدار بار بحرانی متناظر با لحظه وقوع کمانش بر روی آن، با حل مسأله مقدار ویژه برای معادله دیفرانسیل حاکم بر تعادل سازه در وضعیت تغییرشکل‌یافته آن (روش تحلیل الاستیک خطی) و یا در حالت پیشرفته‌تر با حل دقیق معادله دیفرانسیل مذکور با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مادی و هندسی (روش تحلیل الاستیک-پلاستیک غیرخطی) قابل محاسبه است.

مرجع اصلی برای طراحی و ساخت بویلرها، بخش اول کد بویلرها و مخازن تحت فشار (ASME BPVC Sec.I) [۱] می‌باشد. برای ارزیابی مود واماندگی کمانش ستونی در هندسه‌های خاص مانند تیوب‌بانک بویلر پکیج که الزاماتی در این کد برای آنها وجود ندارد، با استناد به بخش PA از همین کد، می‌توان به عنوان جایگزین به کد ASME BPVC Sec.VIII Div .2 [۲] مراجعه نمود. در چارچوب رویکرد طراحی بر اساس تحلیل عددی (DBA) ارائه شده در این کد، هر دو روش تحلیل خطی و غیرخطی فوق قابل استفاده و بهره‌برداری می‌باشند.

شکل ۳ منحنی‌های بارجابجایی به دست آمده با فرض رفتار الاستیک خطی ماده (شماره ۱)، با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی ماده (شماره ۲)، با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی ناشی از تغییرشکل‌های بزرگ (شماره ۳) و نهایتاً با لحاظ ترکیب اثرات غیرخطی مادی و هندسی (شماره ۴) را به طور شماتیک نشان می‌دهد. برای یک سازه که رفتار کمانش آن

ممکـن اسـت تحـت تأثیـر اثـرات غیرخطـی مـادی و هندسـی قـرار بگیـرد، قطعـاً منحنـی شـماره ۴ نزدیک‌تریـن پیش‌بینـی از رفتـار واقعـی سـازه را بـه دسـت خواهـد داد.



شکل ۳. منحنی بارجابجایی سازه تحت اثر بار محوری فشاری

بـرای تجهیـزی بـا رفتـار کمانـش غیرخطـی، حـل خطـی (مقـدار ویـژه) مقـدار بـار بحرانـی کمانـش (نقطـه P_{cr}^{1} در شـکل فـوق) را بـه طـرز غیرمحافظه‌کارانـه بیـش از انـدازه واقعـی آن (یعنـی نقطـه P_{cr}^{4}) تخمیـن می‌زنـد. کدهـا و اسـتانداردهای طراحـی از جملـه کـد 2. ASME BPVC Sec.VIII Div بـرای حـل ایـن مشـکل و ارائـه نتایـج نزدیک‌تـر بـه واقعیـت، بـرای برخـی پیکربندی‌هـای هندسـی و شـرایط بارگـذاری سـاده، یـک سـری ضرایـب کاهنـده ارائـه نموده‌انـد. امـا بـرای هندسـه و شـرایط بارگـذاری پیچیـده‌ای نظیـر مسـأله حاضـر ضریـب کاهنـده‌ای در ایـن مراجـع موجـود نمی‌باشـد. بـر ایـن مبنـا و بـا توجـه بـه ایـن کـه روش تحلیـل غیرخطـی هیچگونـه محدودیتـی از نظـر پیکربنـدی هندسـی و شـرایط بارگـذاری نـدارد، در ایـن پژوهـش از روش تحلیـل کمانـش غیرخطـی بـا در نظـر گرفتـن ترکیـب رفتـار غیرخطـی مـادی (رفتـار الاستیک-پلاسـتیک) و اثـرات غیرخطـی هندسـی (تغییرشـکل‌های بـزرگ) بـه منظـور دسـتیابی بـه تخمیـن دقیـق و قابـل اطمینانـی از رفتـار کمانـش تجهیـز اسـتفاده گردیـده اسـت.

در بیـن روش‌هـای تحلیـل غیرخطـی پدیـده کمانـش، روش‌هـای تحلیـل Newton-Raphson و Riks جـزو شـناخته شـده‌ترین روش‌هـا هسـتند. روش Newton-Raphson کارایـی بسـیار بالایـی در حـل مجموعـه دسـتگاه‌های معـادلات غیرخطـی بـزرگ دارد و نـرخ همگرایـی سـریع آن بـه پاسـخ، ایـن روش را بـه عنـوان حل‌گـر برتـر در نرم‌افزارهـای تجـاری المـان محـدود مطـرح نمـوده اسـت. در عیـن حـال، ایـن روش یـک نقطـه ضعـف قابـل توجـه نیـز دارد. در مـواردی کـه سـازه پـس از کمانـش اولیـه رفتـار پایدارشـونده از خـود نشـان می‌دهـد و مطالعـه رفتـار پساکمانشـی آن مـورد نظـر اسـت، چنانچـه بارگـذاری بـه صـورت بار-کنتـرل اعمـال شـده باشـد، روش Newton-Raphson قـادر نخواهـد بـود کـه مسـیر تعادلـی پایـدار بـر روی منحنـی بارجابجایـی را بـه درسـتی دنبـال کنـد. هرچنـد بـا تغییـر شـیوه اعمـال بارگـذاری از حالـت بـه بار-کنتـرل بـه جابجایی-کنتـرل ایـن مشـکل در مـواردی برطـرف می‌گـردد، امـا در مسـائل بـا ماهیـت غیرخطـی شـدید همچنـان مـواردی وجـود دارد کـه کارایـی روش Newton-Raphson بـه چالـش کشـیده می‌شـود. در مقابـل، روش تحلیـل Riks بـه عنـوان یـک روش قدرتمنـد در مواجهـه بـا رفتارهـای شـدیداً غیرخطـی سـازه‌ها، قابلیـت تحلیـل هـر نـوع رفتـار غیرخطـی در محـدوده پسـاکمانش را خواهـد داشـت و در مـواردی کـه نیـاز بـه تعییـن بـار بحرانـی کمانـش و یـا دسـتیابی بـه رفتـار تغییرشـکل کامـل سـازه در محـدوده پسـاکمانش وجـود داشـته باشـد انتخـاب مناسـب‌تری خواهـد بـود.

از آن جـا کـه کـد 2. ASME BPVC Sec.VIII Div همگرایـی حـل عـددی را بـه عنـوان معیـار پایـداری تجهیـز در برابـر کمانـش تعییـن نمـوده اسـت و تأکیـدی بـر محاسـبه بـار بحرانـی کمانـش یـا دسـتیابی بـه رفتـار پسـاکمانش سـازه نـدارد، در ایـن پژوهـش از حل‌گـر غیرخطـی مبتنـی بـر روش Newton-Raphson بـه جـای روش تحلیـل Riks اسـتفاده شـده اسـت، زیـرا مزیـت و قابلیـت مهـم روش Riks کـه حفـظ پایـداری حـل در مواجهـه بـا رفتـار غیرخطـی شـدید سـازه‌ها می‌باشـد، از نظـر تطابـق بـا الزامـات کـد مذکـور بـه نوعـی یـک کارکـرد نامطلـوب تلقـی می‌گـردد.

انجـام تحلیـل کمانـش غیرخطـی الاستیک-پلاسـتیک بـر اسـاس الزامـات کـد 2. ASME BPVC Sec.VIII Div شـامل چندیـن گام متوالـی می‌باشـد. در گام اول بایـد یـک تحلیـل کمانـش خطـی از نـوع تحلیل‌هـای مقـدار ویـژه بـرای ترکیـب بارهـای معیـن شـده در کـد مذکـور انجـام شـود. در ایـن تحلیـل، کلیـه اثـرات غیرخطـی مـادی و هندسـی غیرفعـال خواهنـد بـود. رابطـه (۱) اولیـن ترکیـب بـار مـورد نظـر کـد را بـه عنـوان نمونـه نشـان می‌دهـد:

$$\beta_b\,(P + P_s + D) \qquad (۱)$$

در ایـن رابطـه، پارامتـر P فشـار داخلـی، P_s فشـار اسـتاتیک، D بارهـای مـرده (وزنـی) و β_b ضریـب بـار اسـت کـه در گام اول تحلیـل بایـد برابـر بـا ۱ در نظـر گرفتـه شـود. خروجـی تحلیـل در ایـن گام، شـکل مودهـای کمانـش و مقادیـر متناظـر بـار بحرانـی کمانـش بـرای اجـزاء مختلـف تجهیـز می‌باشـد.

در گام دوم، می‌بایسـت یـک مـدل عـددی بـرای تحلیـل کمانـش غیرخطـی ایجـاد شـده و پـس از فعـال کـردن تنظیمـات مربـوط بـه رفتـار غیرخطـی الاستیک-پلاسـتیک مـاده و اثـرات غیرخطـی هندسـی و نیـز سـایر مـوارد مربـوط بـه شـرایط مـرزی، بارگـذاری و ...، یـک نقـص هندسـی از طریـق اعمـال ضرایبـی بـه مقادیـر جابجایی‌هـای نرمـال شـده متناظـر بـا شـکل مودهـای کمانشـی کـه از گام اول

بـه دسـت آمده‌انـد، در مـدل لحـاظ گـردد.

در گام سـوم، بایـد تحلیـل کمانـش غیرخطـی الاستیک-پلاسـتیک بـا در نظـر گرفتـن ضریـب بـار β_b= ۱/۶۷ بـرای کلیـه ترکیب‌بارهـای معیـن شـده در کـد، از جملـه ترکیب‌بـار رابطـه (۱)، انجـام شـود. معیـار پذیـرش و اثبـات ایمنـی تجهیـز در برابـر کمانـش از نظـر کـد، همگرایـی حـل عـددی (اتمـام موفقیت‌آمیـز تحلیـل) در کلیـه ترکیب-بارهـای تحلیـل شـده می‌باشـد.

در خصـوص گام دوم از رونـد سـه‌مرحله‌ای فـوق، چالش‌هـا و ابهاماتـی وجـود دارد کـه می‌بایسـت مـورد بررسـی دقیـق قـرار بگیـرد. همان‌طـور کـه اشـاره شـد، بـرای اجـرای ایـن گام لازم اسـت یـک نقـص هندسـی در پیکربنـدی بـدون نقـص مـدل عـددی وارد شـود تـا شـرایط ایـده‌آل مـدل عـددی را بـه شـرایط فیزیکـی واقعـی سـازه نزدیـک کنـد. بـا ایـن کار اولاً شـرط لازم بـرای تحریـک وقـوع کمانـش در تحلیـل عـددی فراهـم می‌شـود، چـرا کـه بـدون وجـود هیـچ عامـل بـر هـم زننـده تقـارن در مـدل عـددی (ناشـی از هندسـه، بارگـذاری، شـرایط مـرزی و ...)، برخـلاف سـازه واقعـی (کـه در آن حتمـاً یـک نقـص ریزسـاختاری متریالـی، یـا عـدم تقـارن سـاختاری و ... وجـود دارد) کمانـش رخ نخواهـد داد. ثانیـاً حداکثـر میـزان انحـراف هندسـی ممکـن در سـازه نسـبت بـه حالـت ایـده‌آل، در مـدل عـددی دیـده می‌شـود تـا تخمیـن بـار بحرانـی کمانـش بـرای سـازه بـه شـکلی محافظـه کارانـه انجـام شـود. چـون عـدم تقـارن عواملـی همچـون بارگـذاری و شـرایط مـرزی معمـولاً بـه طـور صریـح در مـدل عـددی اعمـال می‌شـود، امـا هندسـه مدل‌هـای عـددی غالبـاً بـه طـور ایـده‌آل و عـاری از نقـص سـاخته می‌شـود و لازم اسـت هـر گونـه انحـراف ممکـن از ایـن حالـت ایـده‌آل بـه نحـوی در تحلیـل عـددی دیـده شـود. بـه همیـن دلیـل اسـت کـه مطابـق الـزام کـد، بـرای تعییـن مقـدار ضرایـب انـدازه معـرف نقـص هندسـی در مـدل عـددی، بایـد از مقادیـر اندازه‌گیـری شـده واقعـی انحرافـات هندسـی بـر روی تجهیـزات سـاخته شـده و یـا بـه طـور محافظـه کارانـه از مقادیـر تلرانس‌هـای ابعـادی تعییـن شـده در نقشـه‌های سـاخت ایـن تجهیـزات اسـتفاده شـود.

چالشـی کـه همـواره در ایـن خصـوص بـرای کاربـر نرم‌افزارهـای تحلیـل عـددی وجـود داشـته آن اسـت کـه چطـور می‌تـوان اطمینـان حاصـل کـرد کـه بـا روش ضریـب-دهـی بـه شـکل مودهـای کمانـش تجهیـز، حداکثـر انحـراف ممکـن از شـکل هندسـی ایـده‌آل تجهیـز بـه شـکل محافظـه کارانـه‌ای در تحلیـل عـددی در نظـر گرفتـه شـود؟ از طـرف دیگـر در صورتـی کـه بـرای یـک تجهیـز بـا پیکربنـدی و شـرایط بارگـذاری معیـن ثابـت شـود کـه وجـود نقایـص هندسـی صرفـاً نقـش تحریـک اولیـه کمانـش را بـازی نمی‌کنـد، بلکـه بـر روی رفتـار کمانـش تجهیـز (الگـوی تغییـرات منحنـی بـار- جابجایـی) نیـز اثرگـذار اسـت، ایـن سـؤال مطـرح می‌گـردد کـه در اجـرای روش مـورد نظـر کـد، از کـدام شـکل مودهـای کمانشـی تجهیـز و بـا چـه نسـبتی از ضرایـب بایـد اسـتفاده شـود؟ در برخـی مراجـع فنـی معتبـر تصریـح گردیـده اسـت کـه در صورتـی کـه یـک تجهیـز از نـوع سـازه‌های حسـاس بـه نقـص هندسـی باشـد، لازم اسـت بـا انجـام تحلیل‌هـای متعـدد، ترکیـب بهینـه از شـکل مودهـای کمانشـی مهـم در ایجـاد نقـص هندسـی تعییـن شـود، تـا از نتایـج غیرمحافظـه کارانـه ناشـی از ساده‌سـازی ناآگاهانـه نقـص هندسـی جلوگیـری شـود [۳].

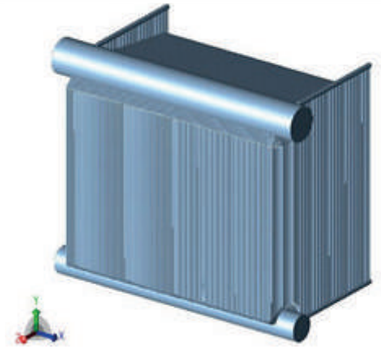
در خصـوص گام سـوم از رونـد مـورد نظـر کـد بـرای تحلیـل کمانـش غیرخطـی نیـز چالـش دیگـری وجـود دارد کـه بـه معیـار پذیـرش تجهیـز بـاز می‌گـردد. مطابـق بیـان صریـح کـد، معیـار محافظـت در برابـر واماندگـی کمانـش در روش الاستیک-پلاسـتیک، همگرایـی حـل عـددی اسـت. امـا در تجربـه پروژه‌هـای انجـام شـده در ایـن زمینـه شـواهدی وجـود دارد کـه علیرغـم همگرایـی تحلیـل عـددی، رفتـار تغییرشـکل سـازه نشـان از وقـوع واماندگـی کمانـش دارد.

خوشـبختانه اخیـراً بـا انتشـار نسـخه ۲۰۲۵ کـد ASME BPVC، پـس از سـال‌ها مهمتریـن مـورد از بیـن چالش‌هـای فـوق تعییـن تکلیـف شـده و در متـن ایـن کـد تصریـح گردیـده کـه بـرای ایجـاد نقـص هندسـی صرفـاً لازم اسـت شـکل مـود اول کمانـش تجهیـز در نظـر گرفتـه شـود و نیـازی بـه مشـارکت دادن سـایر شـکل مودهـای کمانشـی تجهیـز وجـود نـدارد. بـا لحـاظ ایـن امـر، ابهـام مربـوط بـه نسـبت ضرایـب مودهـای مختلـف کمانـش نیـز بلاموضـوع خواهـد بـود. در بخش‌هـای بعـدی مقالـه، رونـد اجـرا و نتایـج بـه دسـت آمـده از تحلیل‌هـای کمانـش غیرخطـی انجـام شـده، ارائـه گردیـده اسـت و ایـن نتایـج بـا تمرکـز بـر موضوعـات فـوق مـورد بحـث و بررسـی قـرار خواهنـد گرفـت.

مدل‌سازی تجهیز

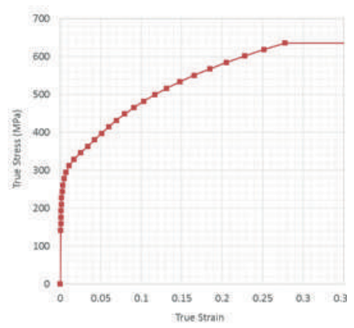
بـه منظـور حـل مسـأله بـا اسـتفاده از روش تحلیـل کمانـش غیرخطـی ارائـه شـده در کـد 2. ASME BPVC Sec.VIII Div، در ابتـدا لازم اسـت تـا تخمینـی از بارهـای وارد بـر تیوب‌هـای اواپراتـور محاسـبه گـردد. بدیـن منظـور، بـا اسـتفاده از نرم‌افـزار CAESAR II بـه عنـوان یکـی از ابزارهـای قدرتمنـد تحلیـل تنـش پایپینـگ صنعتـی، مجموعـه کـوره، تیوب‌بانـک و درام‌هـای بویلـر بصـورت یکپارچـه مـدل شـده و پـس از اعمـال شـرایط بارگـذاری واقعـی (شـامل فشـار و دمـای سـیال، وزن و بارهـای اتفاقـی ماننـد زلزلـه)، بحرانی‌تریـن تیوب‌هـا در مـدل مشـخص شـده و نیروهـای وارد بـر آنهـا اسـتخراج گـردد.

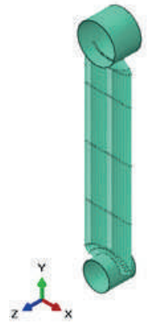
مـدل ایجـاد شـده از بویلـر در نـرم افـزار CAESAR II در شـکل ۴ نمایـش داده شـده اسـت. شـرایط مـرزی ایـن مـدل شـامل دو تکیـه‌گاه زینـی شـکل (سـدل) بـوده کـه مطابـق بـا شـکل ۱ در زیـر درام آب قـرار گرفته‌انـد. ابعـاد کلـی مجموعـه ۱۱ m * ۱۰ m * ۷ m می‌باشـد. قطـر داخلـی درام آب (پاییـن) و درام بخـار (بـالا) بـه ترتیـب برابـر بـا ۱۰۵۰ mm و ۱۵۵۰ mm و ضخامـت آنهـا ۱۲۰ mm و ۱۵۰ mm می‌باشـد. تیوب‌هـا نیـز دارای قطـر خارجـی ۵۰/۸ mm و ضخامـت ۴ mm بـوده و ارتفـاع آنهـا مشـابه بـا فاصلـه مرکـز تـا مرکـز درام‌هـا برابـر ۱۰ m می‌باشـد.



شکل ۴. مدل بویلر پکیج در نرم افزار CAESAR II

بـر اسـاس نتایـج بـه دسـت آمـده از تحلیـل مـدل CAESAR II و مطابـق بـا انتظـار، بحرانی‌تریـن تیوب‌هـا، دو ردیـف تیـوب مجـاور بـا فضـای خالـی نشـان داده شـده در شـکل ۲ می‌باشـند کـه بـا ترسـیم خـط چیـن بـه دور آنهـا در ایـن شـکل مشـخص گردیده‌انـد.
بـه منظـور انجـام تحلیـل کمانـش و اطمینـان از پایـداری سـازه در برابـر بارهـای وارده، ردیـف بحرانـی تیوب‌هـا همـراه بـا بخشـی از درام‌هـای آب و بخـار متصـل بـه آنهـا مطابـق شـکل ۵ در نرم‌افـزار المـان محـدود ABAQUS مدل‌سـازی گردیـد.
جنـس درام‌هـا از فـولاد کربنـی SA۵۱۶-۷۰ و جنـس تیوب‌هـا از C-SA۱۰۶ می‌باشـد کـه مـدل رفتـار الاستیک-پلاسـتیک ایـن مـواد (یعنـی منحنـی تنـش-کـرنـش واقعی با در نظـر گـرفتـن پدیـده کـرنـش‌سختـی) مطابـق با الزامـات پیوسـت D-۳ از کـد ASME BPVC Sec.VIII Div .2 اسـتخراج گردیـده و بـه عنـوان نمونـه در شـکل ۶ نشـان داده شـده اسـت.





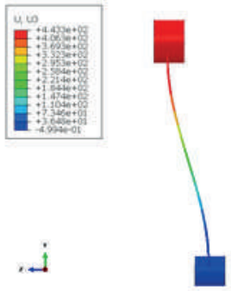
شکل ۵. مدل ردیف بحرانی تیوب‌های اواپراتور در نرم افزار ABAQUS شکل ۶. منحنی تنش-کرنش واقعی محاسبه شده برای ماده SA۵۱۶-۷۰ در دمای محیط

بـه منظـور اعمـال شـرایط مـرزی و بارگـذاری مناسـب، سـطح داخلـی درام بـالا بـا اسـتفاده از تعریـف قیـد کوپلینـگ بـه یـک نقطـه مرجـع در مرکـز آن اتصـال داده شـده و نیروهـای ناشـی از وزن و سـایر بارهـای وارده کـه از تحلیـل مـدل CAESAR II بـه دسـت آمده‌انـد، بـه ایـن نقطـه مرجـع اعمـال گردیـد. سـطح داخلـی درام پایین نیـز بـه مرکـز آن کوپـل شـده و هـر شـش درجـه آزادی ایـن نقطـه مقیـد گردیـد. همچنیـن فشـار داخلـی bar ۵۵ بـه سـطح داخلـی تیوب¬هـا و درام‌هـا اعمـال شـد. بـرای مش‌بنـدی مـدل نیـز از المان‌هـای پوسـته سـه بعـدی مرتبـه اول S۴R بـا انـدازه تقریبـی mm ۱۵ اسـتفاده گردیـد.
هـر دو نـوع تحلیـل کمانـش خطـی (مقـدار ویـژه) و غیرخطـی الاستیک-پلاسـتیک مطابـق بـا رویـه مـورد نظـر کـد کـه در بخـش قبـل تشـریح گردیـد، انجـام شـدند. در هـر دو نـوع تحلیـل، ابتـدا فشـار داخلـی در یـک مرحلـه بـه سـطوح داخلـی مـدل اعمـال شـده و سـپس در مرحلـه بعـد، بارهـای بـه دسـت آمـده از تحلیـل CAESAR II اضافـه گردیدنـد.

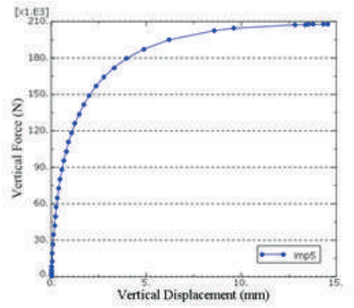
بررسی و ارزیابی نتایج

بـر اسـاس نتایـج بـه دسـت آمـده از تحلیـل مـدل CAESAR II، حداکثـر میـزان نیـروی محـوری فشـاری در بحرانی‌تریـن ردیـف تیوب‌هـای اواپوراتـور بویلـر پکیـج kN ۲۳۰ می‌باشـد. ایـن نیـرو همـراه بـا سـایر مولفه‌هـای نیـروی افقـی عرضـی بـه دسـت آمـده از تحلیـل CAESAR II (کـه از لحـاظ انـدازه، مقادیـر بسـیار کمتـری نسـبت بـه مولفـه محـوری نیـرو دارنـد) پـس از ضـرب در ضریـب بـار β_b =۱/۶۷ تعییـن شـده در کـد، بـه مـدل المـان محـدود ABAQUS نشـان داده شـده در شـکل ۵ اعمـال گردیـد (انـدازه بـار قائـم برابـر بـا kN ۳۸۴). بـرای انجـام تحلیـل کمانـش غیرخطـی الاستیک-پلاسـتیک، مطابـق الـزام کـد، شـکل مـود اول بـه دسـت آمـده از حـل مقـدار ویـژه بـا در نظـر گرفتـن ضریـب انـدازه برابـر بـا ۵ بـه عنـوان نقـص هندسـی بـه مـدل اعمـال گردیـد. ایـن مقـدار mm ۵ برابـر بـا انـدازه تلرانـس سـاخت مربـوط بـه قیـد مسـتقیم بـودن تیوب‌هـا می‌باشـد.

بررسـی نتایـج بـه دسـت آمـده از تحلیـل کمانـش غیرخطـی بـرای ترکیب‌بـار مشـخص شـده در رابطـه (۱) نشـان دهنـده واگرایـی زودهنـگام حـل عـددی پـس از پیشـرفت حـدود ۵۵ درصـدی تحلیـل (اعمـال ۵۵٪ از کل بـار مـورد نظـر) می‌باشـد.
نمایـی از فـرم تغییرشـکل یافتـه مـدل در لحظـه توقـف حـل در شـکل ۷ نشـان داده شـده اسـت. همان‌طـور کـه در ایـن شـکل مشـاهده می‌شـود، میـزان جابجایـی افقـی درام بخـار نسـبت بـه درام آب حـدود mm ۴۴۳ بـوده اسـت کـه حاکـی از وقـوع واماندگـی کمانـش می‌باشـد. بـا رسـم نمـودار بـار بـر حسـب جابجایـی محـوری تیوب‌هـا مطابـق شـکل ۸ می‌تـوان قضـاوت دقیقتـری در خصـوص وقـوع کمانـش در ایـن تجهیـز ارائـه داد. همان‌طـور کـه در ایـن شـکل مشـاهده می‌شـود منحنـی دارای یـک رفتـار کامـلاً مجانبـی اسـت، یعنـی بـا افزایـش سـطح بـار بـه حـدود kN ۲۰۷، میـزان جابجایـی محـوری تیوب‌هـا (در امتـداد قائـم) بـه طـور ناپایـداری افزایـش می‌یابـد. لـذا می‌تـوان دریافـت کـه تجهیـز در ایـن مقـدار بـار قطعـاً دچـار کمانـش گردیـده اسـت.

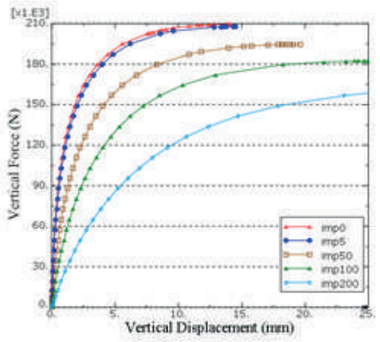


شکل ۷. کانتور مولفه جابجایی افقی بر روی فرم تغییر شکل یافته مدل در طرح اولیه بویلر



شکل ۸. نمودار تغییرات بار بر حسب جابجایی محوری تیوب در طرح اولیه بویلر

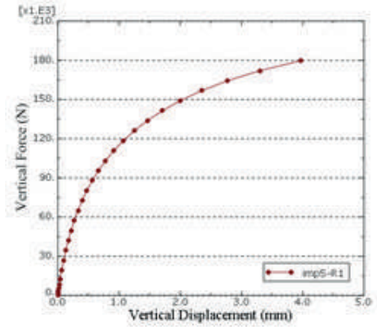
بـه منظـور بررسـی اثـر انـدازه ضریـب اعمـال شـده در تعریـف نقـص هندسـی بـر رفتـار کمانـش تجهیـز و ارزیابـی میـزان حساسـیت آن بـه نقـص هندسـی، تحلیـل کمانـش غیرخطـی بـا در نظـر گرفتـن چهـار مقـدار متفـاوت فرضـی ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ بـرای ایـن ضریـب، عـلاوه بـر مقـدار واقعـی mm ۵ انجـام شـد. ضریـب صفـر بـه معنـای عـدم اعمـال نقـص هندسـی اولیـه می‌باشـد.
شـکل ۹ وابسـتگی الگـوی تغییـرات منحنی‌هـای بارجابجایـی بـه دسـت آمـده از ایـن تحلیل‌هـا را نشـان می‌دهـد. همان‌طـور کـه در ایـن شـکل بـه روشـنی قابـل مشـاهده اسـت، رفتـار کمانـش تجهیـز در حضـور مقادیـر کوچکتـر نقـص هندسـی (از مرتبـه انـدازه تلرانس‌هـای واقعـی سـاخت) تفـاوت قابـل ملاحظـه‌ای بـا حالـت بـدون نقـص نـدارد، امـا بـا افزایـش هـر چـه بیشـتر انـدازه نقـص بـه سـمت مقادیـر فرضـی بزرگتـر، میـزان حساسـیت رفتـار تجهیـز بـه ایـن پارامتـر افزایـش می‌یابـد.



شکل ۹. نمودار تغییرات بار بر حسب جابجایی محوری تیوب در طرح اولیه بویلر برای مقادیر متفاوت ضریب اندازه نقص هندسی

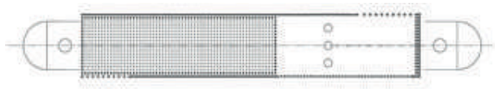
نکتـه قابـل توجـه دیگـر در مـورد شـکل فـوق، کاهـش ظرفیـت تحمـل بـار تجهیـز، واگرایـی و توقـف زودتـر حـل عـددی و افزایـش میـزان تغییرشـکل افقـی و محـوری تجهیـز در لحظـه واگرایـی حـل می‌باشـد. همان‌طـور کـه ملاحظـه می‌شـود، بـار بحرانـی کمانـش بـرای تجهیـز بـدون نقـص در حـدود kN ۲۰۹ و بـرای مقادیـر ضریـب ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ نیـز بـه ترتیـب تقریبـاً برابـر بـا kN ۲۰۷، kN ۱۹۵، kN ۱۸۲ و kN ۱۶۳ بـوده اسـت. همچنیـن درصـد پیشـرفت تحلیـل قبـل از واگرایـی از مقـدار ۵۵٪ در حالـت بـدون نقـص بـه ترتیـب بـه مقـدار ۵۴٪، ۵۱٪، ۴۸٪ و ۴۳٪ کاهـش یافتـه و در مقابـل، میـزان جابجایـی افقـی درام بخـار از mm ۴۴۶ در حالـت بـدون نقـص بـه ترتیـب تـا مقادیـر mm ۴۴۳، mm ۴۸۰، mm ۵۱۱ و mm ۵۶۷ افزایـش یافتـه اسـت.
بـا توجـه بـه مشـاهدات فـوق می‌تـوان نتیجـه گرفـت کـه تجهیـز بویلـر پکیـج مـورد نظـر در ایـن پژوهـش، بـا پیکربنـدی و شـرایط بارگـذاری مشـخص شـده، و در محـدوده تلرانس‌هـای سـاخت گـزارش شـده، از نـوع سـازه‌های حسـاس بـه نقـص هندسـی نیسـت، زیـرا وجـود نقـص هندسـی در محـدوده ابعـاد مذکـور، رفتـار کمانـش آن را تقریبـاً تحـت تأثیـر قـرار نمی‌دهـد و در نتیجـه قابـل صرف‌نظـر اسـت. بنابرایـن هرچنـد تکیـه بـر شـکل مـود اول تجهیـز بـرای ایجـاد نقـص هندسـی در تجهیـز بـا توجـه بـه تصریـح نسـخه ۲۰۲۵ کـد ASME BPVC از منظـر انطبـاق بـا الزامـات ایـن کـد کافـی اسـت، امـا بررسـی‌های دقیـق انجـام شـده نیـز نشـان

می‌دهد که چالش‌های مربوط به انتخاب تعداد و نسبت ضرایب مودهای کمانش مشارکت کننده در ایجاد نقص هندسی که در مقدمه پژوهش برای سازه‌های حساس به وجود نقص بیان گردید اصولاً برای این تجهیز مطرح نخواهد بود.
به منظور رفع مشکل پایین بودن ظرفیت سازه‌ای طرح اولیه بویلر برای تحمل بار فشاری وارده و جلوگیری از وقوع کمانش، یک بازنگری در طراحی بویلر با انجام تغییراتی نظیر افزایش قطر و ضخامت تیوب‌ها (به ترتیب تا ۶۳/۵ mm و ۴/۷ mm) صورت گرفت. در نتیجه این بازطراحی، نیروی محوری فشاری در ردیف بحرانی تیوب‌ها تا حدود ۱۰۷ kN (۱۸۰ kN با احتساب ضریب بار β_b = ۱/۶۷) کاهش یافت. انجام مجدد تحلیل کمانش غیرخطی الاستیک-پلاستیک بر روی مدل بازطراحی شده به شرح فوق منجر به همگرایی و اتمام موفقیت‌آمیز حل عددی گردید که نتیجه آن در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.
علی‌رغم همگرا شدن تحلیل در این حالت که طبق معیار پذیرش کد به معنای پایداری تجهیز در برابر کمانش خواهد بود، شیب منحنی بارجابجایی در پایان این تحلیل نسبت به لحظه شروع بارگذاری به طور قابل ملاحظه‌ای (حدود ۷۵٪) کاهش یافته است که اطمینان از پایداری تجهیز در برابر کمانش را با تردید مواجه می‌سازد.



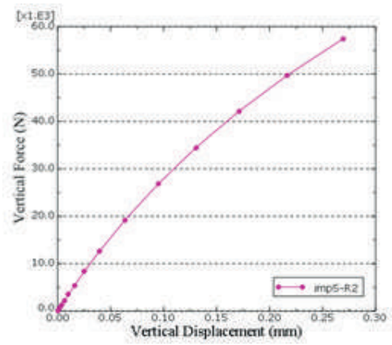
شکل ۱۰. نمودار تغییرات بار بر حسب جابجایی محوری در بازطراحی اول بویلر

به منظور حذف هر گونه ریسک احتمالی کمانش، با انجام یک مرحله بازطراحی دوم شامل اضافه کردن یک ردیف سه‌تایی از لوله‌های ۶ اینچ در فضای خالی مجاور تیوب‌بانک و دو لوله قطور ۱۴ اینچ در کناره‌ها به عنوان ساپورت مابین درام‌های آب و بخار مطابق با شکل ۱۱، نیروی محوری فشاری در ردیف بحرانی تیوب‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و به حدود ۳۵ kN (۵۸ kN با احتساب ضریب بار β_b= ۱/۶۷) رسید.



شکل ۱۱. اضافه کردن لوله‌های تقویتی به عنوان ساپورت مابین درام‌های آب و بخار در بازطراحی دوم بویلر

انجام مجدد تحلیل کمانش غیرخطی الاستیک-پلاستیک پس از اعمال تغییرات فوق بر روی مدل، مشابه با حالت بازطراحی اول و مطابق با انتظار، منجر به همگرایی و اتمام موفقیت‌آمیز حل گردید. شکل ۱۲ منحنی بارجابجایی حاصل از این تحلیل را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این شکل، شیب منحنی تغییر بسیار کمتری (زیر ۱۰٪) نسبت به حالت بازطراحی اول بویلر داشته است و لذا می‌توان با اطمینان گفت که در حالت بازطراحی دوم، ظرفیت تحمل بار تجهیز به شکل قابل قبولی حفظ شده و در نتیجه این طرح از منظر وقوع کمانش ایمن می‌باشد.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات بار بر حسب جابجایی محوری در بازطراحی دوم بویلر

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و ارزیابی ریسک وقوع واماندگی کمانش ستونی در تیوب‌های اواپراتور یک بویلر پکیج تیپ D با استفاده از روش تحلیل کمانش غیرخطی الاستیک-پلاستیک ارائه شده در کد ASME BPVC Sec.VIII Div .2 پرداخته شده است.
بر اساس نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نشان داده شده است که با توجه به الگوی توزیع بار ایجاد شده بر روی این تیوب‌ها در طرح اولیه، در بخشی از آنها کمانش رخ می‌دهد. به منظور رفع این مشکل، دو مرحله بازطراحی بر روی بویلر انجام شده و با اعمال برخی تغییرات و افزودن اجزاء تقویتی، نهایتاً ایمنی در برابر کمانش حاصل گردیده است.
در ضمن تحلیل‌های انجام شده نشان داده شده که بویلر پکیج مورد نظر در این پژوهش، با پیکربندی و شرایط بارگذاری مشخص شده و در محدوده تلرانس‌های ساخت گزارش شده، از نوع سازه‌های حساس به نقص هندسی نیست، زیرا وجود نقص هندسی در محدوده ابعاد مذکور، رفتار کمانش آن را تقریباً تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و بنابراین اثر آن قابل صرف‌نظر است.
همچنین کفایت معیار پذیرش کد ASME BPVC Sec.VIII Div .2 برای تضمین ایمنی تجهیز در برابر مود واماندگی کمانش مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است که اکتفا به همگرایی تحلیل عددی و اتمام موفقیت‌آمیز حل برای این منظور در حالت کلی ممکن است به نتایج غیرمحافظه کارانه بیانجامد. برای رفع این عارضه پیشنهاد می‌شود که الگوی تغییرات منحنی بارجابجایی نیز مورد بررسی قرار گرفته و معیاری بر روی میزان افت مجاز شیب این منحنی نیز علاوه بر همگرایی تحلیل برای پذیرش تجهیز در نظر گرفته شود.

مراجع و منابع

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, ۲۰۲۳ Edition, Section I, Rules for Construction of Power Boilers, USA: The American Society of Mechanical Engineers, ۲۰۲۳.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, ۲۰۲۳ Edition, Section VIII, Division ۲, Rules for Construction of Pressure Vessels-Alternative Rules, USA: The American Society of Mechanical Engineers, ۲۰۲۳.
- Abaqus user's manual, version ۲۰۱۷, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA, ۲۰۱۸.

بالانس جرمی و حرارتی دی‌اریتور در حالت استفاده از بخار خروجی توربین‌های فن و پمپ به عنوان بخار Pegging

مهران شاکری، علی فیروزی

چکیده

بخار مورد استفاده برای Pegging دی‌اریتور در پروژه‌های بدون فن و پمپ توربینی از خروجی بخار تحویلی به کارفرما دریافت می‌شود که دارای فشار و دمای بالایی است. این بخار پس از شکسته شدن فشار توسط شیر کنترل و کاهش دما توسط اسپری در نهایت وارد دی‌اریتور می‌شود.

در پروژه‌های اخیر بویلرپکیج موارد زیادی وجود دارد که از پمپ‌ها و فن‌های توربینی استفاده می‌شود. بخار خروجی از این توربین‌ها به شرایط بخار مورد نیاز برای دی‌اریتور نزدیک‌تر است لذا با اتلاف انرژی کمتر یک منبع بخار برای استفاده در دی‌اریتور در این حالات وجود خواهد داشت. انجام محاسبات بالانس جرمی و حرارتی دی‌اریتور در حالتی که بخار خروجی توربین‌ها به عنوان Pegging مورد استفاده قرار گیرد موضوعی است که در پروژه‌های اخیر مطرح شده است. این محاسبات از آنجا حائز اهمیت است که باید محاسبات دقیقی پیرامون بخار مورد نیاز دی‌اریتور صورت پذیرد و مشخص شود که آیا در حالت استفاده از پمپ و فن‌های توربینی بخار خروجی این توربین‌ها برای Pegging کافی است یا بایستی مقداری بخارHP به عنوان کمکی مورد استفاده قرار گیرد.

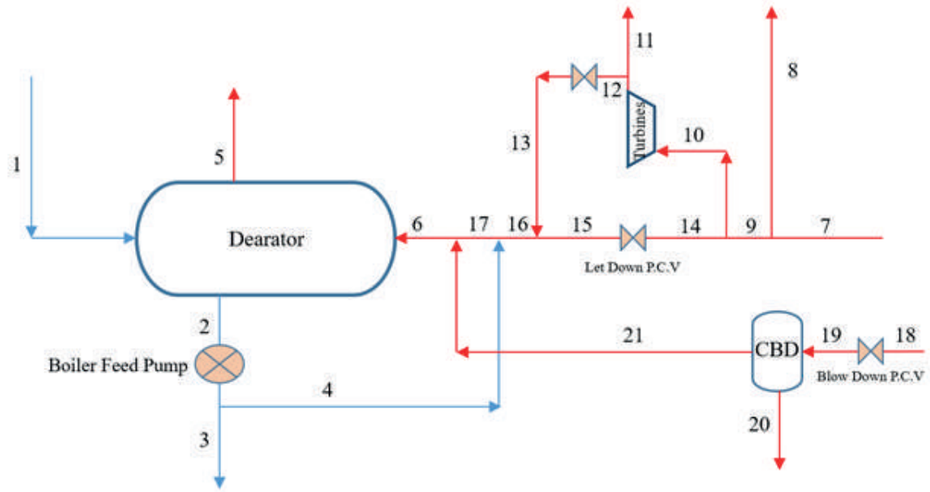
در این پژوهش شماتیکی از مسئله مورد نظر ترسیم شده و با ارائه معادلات لازم برای انجام محاسبات بالانس جرمی و حرارتی مسئله ذکر شده بررسی خواهد شد. نتایج حاصل از یک نمونه انجام شده بررسی و صرفه‌جویی انجام شده در مصرف سوخت و مقدار کاهش کربن دی اکسید منتشر شده تخمین خواهد شد. محاسبات نمونه برای یک مورد بررسی شده نشانگر کاهش مصرف سوخت به مقدار ۵ کیلوگرم بر ساعت و کاهش انتشار کربن دی اکسید به مقدار ۹۰ تن در سال است.

کلیدواژه‌ها: دی‌اریتور، بالانس جرمی و حرارتی، بخار خروجی توربین

مقدمه

بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی و کاهش آلاینده‌های منتشر شده با توجه به لزوم حرکت در جهت توسعه پایدار بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. در مپنا بویلر با توجه به فلسفه وجودی شرکت تلاش حداکثری در این راستا صورت می‌پذیرد. یکی از فرصت‌های بهینه‌سازی که در پروژه‌های اخیر نیز اجرا شده است؛ مربوط به دی‌اریتور بویلرهای پکیج است. دی‌اریتور که به صورت کلی وظیفه پیش‌گرمایش آب ورودی به اکونومایزر و خروج گازهای محلول از آن را دارد، برای کارکرد صحیح نیازمند بخار گرم است. فشار این بخار با توجه به فشار طراحی دی‌اریتور تعیین می‌شود و دمای آن بسته به الزامات مکانیکی و دستیابی به Approach در نظر گرفته شده برای مخزن است. تأمین این بخار در پروژه‌های پیشین با بخار سوپرهیت فشار و دما بالا صورت می‌پذیرفت. فشار مورد نظر با عبور بخار در شیر کنترل تنظیم می‌شد و دمای آن با آب اسپری به دمای مورد نظر می‌رسید. در پروژه‌های اخیر که استفاده از پمپ و فن توربینی مطرح شده است بخار با فشار و دمای کمتری برای استفاده در دی‌اریتور در دسترس است. با استفاده از این منبع بخار اتلاف کمتری صورت می‌پذیرد و در نتیجه با کاهش مصرف سوخت به کاهش آلایندگی نیز کمک شایانی در بلند مدت خواهد شد.

محاسبه کفایت بخار خروجی از توربین‌ها برای استفاده از دی‌اریتور موردی بود که نیازمند نوشتن معادلات ترمودینامیکی و حل بالانس جرمی و انرژی داشت. این مورد در پروژه‌های اخیر صورت پذیرفته و در این پژوهش خلاصه‌ای از فعالیت انجام شده گزارش می‌شود.



شکل ۱: شماتیک دی‌اریتور، Letdown Station، توربین و تانک بلودان

در شکل ۱ شماتیک دی‌اریتور، Letdown Station، توربین و تانک بلودان نمایش داده شده است. به ازای تغییرات دبی، دما یا فشار نقطه جدیدی نام‌گذاری شده است. در نقطه ۱ آب ورودی دی‌اریتور با دمای پایین‌تر و گازهای محلول وارد می‌شود. نقطه ۲ مربوطه به آبی است که دمای آن تا دمای اشباع در فشار کاری دی‌اریتور بالا رفته و گازهای محلول آن خارج شده‌اند. این آب برای استفاده بویلر می‌تواند وارد اکونومایزر شود.

دمای بخار ورودی به دی‌اریتور برای افزایش دما و خارج کردن گازهای محلول نمی‌تواند از مقدار مشخصی فراتر رود. الزامات مکانیکی دی‌اریتور در تعیین این دما تأثیرگذارند. به منظور کنترل این دما مقداری از آب خروجی دی‌اریتور به عنوان اسپری به بخار خروجی درنظر گرفته می‌شود.

نقطه ۵ مربوط به بخاری است که به همراه گازهای محلول شده از دی‌اریتور خارج می‌شود و حداقل مقدار مشخصی برای اطمینان از خروج گازهای محلول دارد. نقطه ۶ نیز مربوط به بخار Pegging مورد نیاز دی‌اریتور است.

نقطه ۷ مربوط به بخار فشاربالای تولیدی بویلر است که در صورت عدم استفاده از توربین‌ها، بخار Pegging به طور کامل از این طریق تأمین خواهد شد و از نقطه ۱۴ وارد Let Down Station خواهد شد و مابقی آن از نقطه ۸ تحویل کارفرما می‌شود. بدیهی است در صورت عدم نیاز به این منبع بخار و تأمین کامل بخار مورد نیاز از توربین‌ها تمام بخار تولیدی بویلر در نقطه ۷ از نقطه ۸ تحویل کارفرما خواهد شد و دبی نقطه ۱۴ صفر خواهد شد.

نقاط ۱۰ تا ۱۳ مربوط به بخار مورد استفاده توربین‌ها هستند. در صورت استفاده از توربین سعی بر آن است تا بخار مورد استفاده دی‌اریتور از خروجی توربین‌ها تأمین شود و چنانچه مقدار بخار خروجی توربین‌ها برای استفاده در دی‌اریتور مازاد باشد، این مقدار اضافه از نقطه ۱۱ تحویل هدر فشار پایین کارفرما خواهد شد. فشار بخار ورودی به دی‌اریتور بایستی با فشار کاری دی‌اریتور برابر باشد. به همین دلیل هم در مسیر بخار خروجی توربین‌ها و هم در مسیر بخار خروجی بویلر شیر کنترل نصب شده است تا فشار بخار را به فشار کاری دی‌اریتور برساند.

تانک بلودان پیوسته به هنگام تخلیه آب مقداری بخار تولید می‌کند. این بخار نیز می‌تواند در ورودی دی‌اریتور مورد استفاده قرار گیرد. به دلیل فشار پایین این مخزن دمای بخار خروجی از آن بالا نیست و از آنجا که این فشار با فشار مخزن دی‌اریتور برابر است نیاز به کنترل فشار نیز ندارد. به همین دلیل این بخار مستقیماً وارد مسیر بخار Pegging می‌شود.

محاسبه مواردی از جمله مقدار آب مورد نیاز در ورودی دی‌اریتور جهت رسیدن به آب مورد نیاز ورودی بویلر، مقدار بخار مورد نیاز پرفشار خروجی بویلر چه در حالت بدون توربین و چه در حالت توربینی، کفایت بخار خروجی از توربین‌ها در حالات مختلف استفاده از آن‌ها در تعدادهای مختلف و به طور کلی بالانس جرمی این مجموعه برای حالات مختلف کاری بویلر از جمله بارهای مختلف، درصدهای متفاوت بلودان، سوخت مصرفی (تعیین کننده فشار کاری دی‌اریتور و مخزن بلودان پیوسته) و استفاده و یا عدم استفاده از توربین‌ها و در صورت استفاده از توربین تعداد آن‌ها از جمله مواردی بودند که برای بررسی نیازمند نوشتن کد برای بالانس جرمی و حرارتی مجموعه داشتند. این مهم با درخواست کارفرما برای ارائه بالانس جرمی در حالات مختلف در مدرکProcess Flow Diagram اهمیت دو چندان پیدا کرد.

در این مقاله معادلات بالانس جرمی و حرارتی این مجموعه برای دستیابی به دبی و خواص نقاط مختلف ارائه می‌شوند. دبی جرمی محاسبه شده برای ورودی‌های مشخص در حالت با توربین و بدون توربین ارائه شده و صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش کربن دی اکسید منتشر شده تخمین زده می‌شوند.

معادلات و روش حل

ابتـدا نیـاز اسـت برخـی پارامترهـا بـه عنـوان ورودی مسـئله مشـخص شـوند. از جملـه ایـن پارامتـر مـواردی ماننـد فشـار کاری دی‌اریتـور، دبـی آب مـورد نیـز بویلـر، درصـد بلـودان، دبـی مـورد نیـاز توربین‌هـا، تعـداد توربین‌هـای در مـدار و فشـار و دمـای خروجـی توربین‌هـا هسـتند. در ادامـه معـادلات بالانـس جرمـی و حرارتـی بخش‌هـای مختلـف ارائـه می‌شـوند. حـل هم‌زمـان ایـن معـادلات منجـر بـه مشـخص شـدن تمامـی مجهـولات مسـئله خواهـد شـد.

بالانس جرمی و حرارتی دی‌اریتور

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_6 = \dot{m}_2 + \dot{m}_5 \quad (۱)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 \quad (۲)$$

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = \dot{m}_2 \quad (۳)$$

بالانس جرمی و حرارتی تانک بلودان پیوسته

$$\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21} = \dot{m}_{19} \quad (۴)$$

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{19} \times x_{19} \quad (۵)$$

در معادلـه ۵ دبـی ورودی بـه تانـک بلـودان پیوسـته یعنـی $\dot{m}_{19}$ از ورودی‌هـای مسـئله قابـل محاسـبه اسـت. بـا داشـتن بخـار خروجـی از بویلـر و ضـرب آن در درصـد بلـودان ایـن دبـی مشـخص می‌شـود. از طرفـی دمـا و فشـار مخـزن بلـودان برابـر بـا فشـار و دمـای کاری دی‌اریتـور در نظـر گرفتـه می‌شـود و در نتیجـه کیفیـت سـیال ورودی بـه ایـن مخـزن مشـخص اسـت.
بدیـن ترتیـب دبـی بخـار خروجـی از ایـن مخـزن و متعاقبـاً آب خروجـی از ایـن مخـزن مشـخص می‌شـود و بالانـس ایـن قسـمت از سـیکل مسـتقل از سـایر معـادلات کامـل می‌شـود.

بالانس جرمی و حرارتی اختلاط بخار تانک بلودان پیوسته و بخار با دمای تنظیم شده

$$\dot{m}_4 + \dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \quad (۶)$$

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{16} h_{16} = \dot{m}_{17} h_{17} \quad (۷)$$

معـادلات ۶ و ۷ مربـوط بـه اختـلاط بخـار تانـک بلـودان بـا مخلـوط بخـار خروجـی توربین‌هـا و بخـار پرفشـار خروجـی توربیـن (یـا هـر یـک از این‌هـا بـه تنهایـی بسـته بـه سـناریوی اسـتفاده) می‌باشـد.
دبـی و دمـای تنظیـم شـده بایسـتی بـه نحـوی باشـد تـا در نهایـت دمـای بخـار Pegging تحویلـی بـه دی‌اریتـور منجـر بـه مقـدار در نظـر گرفتـه شـده در ورودی مسـئله شـود.

بالانس جرمی و حرارتی اختلاط بخار خروجی توربین یا بویلر و آب اسپری

$$\dot{m}_{15} + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{16} \quad (۸)$$

$$\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{13} h_{13} = \dot{m}_{16} h_{16} \quad (۹)$$

معـادلات ۸ و ۹ مربـوط بـه اسـپری آب بـه ترکیـب بخـار خروجـی توربین‌هـا و بخـار خروجـی بویلـر (یـا هـر یـک از ایـن دو بسـته بـه سـناریو) جهـت تنظیـم دمـا می‌باشـد. نتایـج حاکـی از آن اسـت کـه مقـدار آب اسـپری در حالتـی کـه از توربین‌هـا اسـتفاده می‌شـود تقریبـاً نصـف حالتـی اسـت کـه تنهـا از بخـار خروجـی توربیـن اسـتفاده می‌شـود.
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از بخار خروجی توربین‌ها منجر به اتلاف انرژی بسیار کمتری می‌شود.

بالانس جرمی و حرارتی اختلاط بخار خروجی بویلر و توربین‌ها

$$\dot{m}_{15} + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{16} \quad (۱۰)$$

$$\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{13} h_{13} = \dot{m}_{16} h_{16} \quad (۱۱)$$

معـادلات ۱۰ و ۱۱ مربوطـه بـه اختـلاط بخـار خروجـی توربین‌هـا و بخـار خروجـی بویلـر می‌باشـد. در حالـت اسـتفاده از بخـار خروجـی توربین‌هـا بـه تنهایـی (در صـورت کفایـت) $\dot{m}_{15}$ برابـر بـا صفـر و در حالـت اسـتفاده از بخـار بویلـر بـه تنهایـی $\dot{m}_{13}$ برابـر بـا صفـر خواهـد بـود. محاسـبه کفایـت بخـار خروجـی از توربین‌هـا بـرای اسـتفاده از دی‌اریتـور بخـش مهمـی از ایـن محاسـبات اسـت. روش حـل بدیـن شـکل اسـت کـه بـرای صرفه‌جویـی در انـرژی ابتـدا تمـام دبـی خروجـی توربین‌هـا وارد سـیکل می‌شـوند.
پـس از حـل معـادلات چنانچـه دبـی بخـار سـمت بویلـر یعنـی $\dot{m}_{15}$ مثبـت محاسـبه شـود، بدیـن معنـا اسـت کـه بخـار خروجـی توربین‌هـا بـرای دی‌اریتـور کافـی نبـوده و نیـاز بـه بخـار کمکـی از سـمت بویلـر می‌باشـد و مقـدار آن همـان مقـدار محاسـبه شـده بـرای $\dot{m}_{15}$ اسـت. چنانچـه دبـی محاسـبه شـده بـرای $\dot{m}_{15}$ منفـی محاسـبه شـود، می‌تـوان نتیجـه گرفـت بخـار خروجـی توربین‌هـا بـرای دی‌اریتـور کفایـت می‌کنـد. در ایـن مرحلـه مقـدار مـازاد بخـار تحویلـی از خروجـی توربین‌هـا محاسـبه شـده و بـه هـدر بخـار کم‌فشـار کارفرمـا در نقطـه ۱۱ تحویـل می‌شـود. هم‌چنیـن $\dot{m}_{15}$ برابـر بـا صفـر در نظـر گرفتـه خواهـد شـد و بالانـس جرمـی بدیـن صـورت بـه روزرسـانی می‌شـود.
مسـئله بـه دو روش بـرای ورودی‌هـای مختلـف هـم در محیـط اکسـل بـه صـورت سـعی و خطـا و بـا شـکل شـماتیک و هـم در بسـتر نرم‌افـزار EES و در قالـب کـد حـل و صحت‌سـنجی شـد. حـل ایـن مسـئله در EES شـامل حـل ۷۴ معادلـه و ۷۴ مجهـول بـود کـه نهایتـاً تمـام پارامترهـای لازم بـرای طراحـی محاسـبه شـدند.در نهایـت بـا تحلیـل نتایـج حاصـل شـده می‌تـوان بهینه‌سـازی بـرای دسـتیابی بـه بهتریـن سـناریوهای ممکـن صرفه‌جویـی در مصـرف انـرژی را انجـام داد.

نتایج

پـس از نوشـتن تمامـی معـادلات و حـل بالانـس جرمـی و حرارتـی بـه صـورت هم‌زمـان می‌تـوان خـواص ترمودینامیکـی و دبـی جرمـی تمـام نقـاط را بـه دسـت آورد. بـرای بویلـری بـا دبـی بخـار خروجـی ۸۰ تـن بـر سـاعت، بـا درصـد بلـودان ۱، دبـی توربیـن ۸ تـن بـر سـاعت و فشـار دی‌اریتـور ۲/۷ بـار معـادلات در دو حالـت بـا توربیـن و بـدون توربیـن حـل شـدند و دبـی نقـاط مختلـف بـرای هـر دو حالـت در جـدول ۱ لیسـت شـده‌اند.

جدول ۱: دبی نقاط مختلف سیکل برای دو حالت مختلف با و بدون توربین پس از حل بالانس جرمی و حرارتی

بدون توربین		با توربین	
نقطه	دبی(کیلوگرم بر ساعت)	نقطه	دبی(کیلوگرم بر ساعت)
۱	۷۶۰۷۹	۱	۷۵۷۰۹
۲	۸۱۷۰۶	۲	۸۱۳۰۹
۳	۸۰۸۰۰	۳	۸۰۸۰۰
۴	۹۰۶	۴	۵۰۹
۵	۲۸	۵	۲۸
۶	۵۶۵۵	۶	۵۶۲۸
۷	۸۰۰۰۰	۷	۸۰۰۰۰
۸	۷۵۴۶۴	۸	۷۲۰۰۰
۹	۴۵۳۶	۹	۰
۱۰	۰	۱۰	۸۰۰۰
۱۱	۰	۱۱	۳۰۹۴
۱۲	۰	۱۲	۴۹۰۶
۱۳	۰	۱۳	۴۹۰۶
۱۴	۴۵۳۶	۱۴	۰
۱۵	۴۵۳۶	۱۵	۰
۱۶	۴۵۳۶	۱۶	۴۹۰۶
۱۷	۵۴۴۲	۱۷	۵۴۱۵
۱۸	۸۰۰	۱۸	۸۰۰
۱۹	۸۰۰	۱۹	۸۰۰
۲۰	۵۸۷	۲۰	۵۸۷
۲۱	۲۱۳	۲۱	۲۱۳

همانطـور کـه پیش‌تـر و در بخـش روش حـل اشـاره شـد بالانـس جرمـی و حرارتـی تانـک بلـودان مسـتقل از سـایر بخش‌هـا قابـل حـل اسـت و در هـر دو حالـت دبـی برابـری بـرای ایـن قسـمت (نقـاط ۱۸ تـا ۲۱) محاسـبه شـده اسـت. در حالـت بـا توربیـن دبـی آب کمتـری بـرای اسـپری و در نتیجـه دی‌اریتـور مـورد نیـاز اسـت. در حالـت بـا توربیـن حـدود ۴۰۰ کیلوگـرم بـر سـاعت آب اسـپری کمتـری مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیـرد کـه خـود نشـان‌دهنده اتـلاف انـرژی کمتـر اسـت. بـا محاسـبات حرارتـی مربـوط بـه سـوخت مصرفـی در بویلـر می‌تـوان بـه ایـن نتیجـه رسـید کـه در ایـن حالـت بیـش از ۵ کیلوگـرم بـر سـاعت در مصـرف سـوخت صرفه‌جویـی می‌شـود.
بـا محاسـبه مقـدار کربـن دی‌اکسـید انتشـار یافتـه مشـخص شـد در صـورت اسـتفاده از بخـار خروجـی توربین‌هـا در دی‌اریتـور بـه ازای هـر بویلـر ۹۰ تـن کربـن دی‌اکسـید در سـال کمتـر بـه محیـط منتشـر می‌شـود.
لازم بـه ذکـر اسـت در ایـن مثـال حـل شـده دمـای ورودی آب بـه دی‌اریتـور دمـای نسـبتاً بالایـی در نظـر گرفتـه شـده اسـت. در صـورت درنظـر گرفتـن دمـای آب ورودی برابـر بـا دمـای محیـط مقـدار بخـار مـورد نیـاز بـه همـراه آب اسـپری مـورد نیـاز بـه طـور چشـمیگیری افزایـش خواهنـد یافـت. در چنیـن شـرایطی اسـتفاده از بخـار خروجـی توربین‌هـا در دی‌اریتـور سـبب صرفـه چنـد برابـری خواهـد شد .

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

افزایـش بازدهـی سیسـتم‌های انـرژی و افزایـش بهـره‌وری بـا توجـه بـه مفاهیـم توسـعه پایـدار از مـوارد ضـروری دنیـای امـروز اسـت. دی‌اریتـور یکـی از اجـزای بویلرهـا اسـت کـه نقـش اساسـی پیش‌گرمایـش آب در کنـار خـارج کـردن گازهـای محلـول از آب بـه منظـور جلوگیـری از خوردگـی را دارد. در گذشـته بخـار مـورد نیـاز دی‌اریتـور عمومـاً از بخـار پـر فشـار خروجـی بویلـر تأمیـن می‌شـد. از آنجـا کـه دمـا و فشـار ایـن بخـار بـرای اسـتفاده در دی‌اریتـور خیلـی زیـاد اسـت؛ لـذا فشـار ایـن بخـار توسـط شـیر کنتـرل بـه فشـار لازم شکسـته شـده و دمـای آن توسـط آب اسـپری کنتـرل می‌شـود.
بـا توجـه بـه اسـتفاده از فـن و پمـپ توربینـی در پروژه‌هـای اخیـر، محاسـبات پیرامـون اسـتفاده از بخـار خروجـی ایـن توربین‌هـا بـه عنـوان بخـار ورودی بـه دی‌اریتـور بررسـی شـد. از آنجـا کـه ایـن بخـار انـرژی کمتـری دارد و شـرایط آن بـه شـرایط بخـار لازم بـرای دی‌اریتـور نزدیک‌تـر اسـت، لـذا ایـن امـر موجـب افزایـش بازدهـی بویلـر می‌شـود. محاسـبات انجـام شـده بـرای یـک مـورد خـاص حاکـی از آن بـود اسـتفاده از ایـن سیسـتم موجـب کاهـش ۵ کیلوگرمـی مصـرف سـوخت در سـاعت و کاهـش ۹۰ تنـی انتشـار کربـن دی‌اکسـید در سـال می‌شـود.

علائم و نشانه‌ها

فهرست علائم

دبی جرمی	$\dot{m}$
انتالپی	h
کیفیت بخار	x

بررسی تأثیر روش‌های راه‌اندازی پمپ بر گشتاور و انتخاب الکتروموتور در کاربردهای نیروگاهی

زهـرا منصوری، بهـزاد قشلاق سفلایی، فرهـاد سررشته‌داری

چکیده

راه‌انـدازی پمپ‌هـای گریـز از مرکـز در شـرایط مختلـف یکـی از چالش‌هـای اصلـی در بهره‌بـرداری ایمـن و بهینـه تجهیـزات دوار نیروگاهـی اسـت. انتخـاب روش مناسـب راه انـدازی، نه‌تنهـا گشـتاور مـورد نیـاز موتـور را تعییـن می‌کنـد، بلکـه بـر رفتـار هیدرولیکـی پمـپ، منحنـی تـوان و ریسـک‌هایی نظیـر کاویتاسـیون یـا اضافه‌بـار موتـور نیـز اثرگـذار اسـت. انتخـاب بهینـه موتـور نیـز مسـتقیماً در کاهـش هزینـه سـرمایه‌گذاری و افزایـش قابلیـت اطمینـان تأثیـر دارد. در ایـن مقالـه بـا معرفـی روش‌هـای مختلـف راه انـدازی پمـپ، اثـر آن‌هـا بـر منحنـی گشـتاور_سـرعت و تـوان مـورد نیـاز بررسـی می‌شـود. همچنیـن بـا تمرکـز بـر پمپ‌هـای کلیـدی نیروگاهـی شـامل پمـپ تغذیـه بویلـر، پمـپ اسـتخراج کندانـس و پمـپ گـردش آب پیـش گرمکـن، تحلیـل می‌شـود کـه هـر روش چـه اثـری بـر انتخـاب موتـور، هزینـه و ریسـک کل سیسـتم دارد.

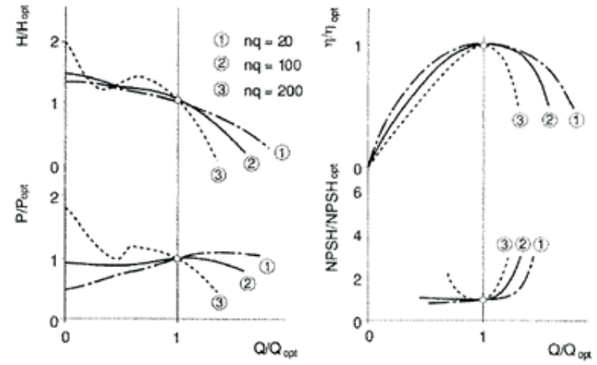
مقدمه

پمپ‌هـای گریـز از مرکـز جـزء حیاتی‌تریـن اجـزای سـیکل آب و بخـار در نیروگاه‌هـا محسـوب می‌شـوند و عملکـرد صحیـح آن‌هـا مسـتقیماً بـر راندمـان و پایـداری کل واحـد اثـر دارد. راه‌انـدازی ایـن پمپ‌هـا از حالـت سـکون تـا رسـیدن بـه سـرعت نامـی، یـک فرآینـد گـذرا و حسـاس اسـت کـه در آن تعامـل میـان گشـتاور موتـور و گشـتاور مقـاوم پمـپ تعیین‌کننـده موفقیـت راه انـدازی محسـوب می‌شـود. انتخـاب روش راه‌انـدازی مناسـب عـلاوه بـر تضمیـن عملکـرد ایمـن، نقـش مهمـی در افزایـش طـول عمـر تجهیـز و کاهـش هزینه‌هـای سـرمایه‌گذاری و بهره‌بـرداری دارد. بنابرایـن، تحلیـل هم‌زمـان منحنـی گشـتاور موتـور و پمـپ در مرحلـه طراحـی، اهمیـت ویـژه‌ای در پروژه‌هـای نیروگاهـی دارد.
هـدف از ایـن مقالـه آن اسـت کـه بـا مـرور اصـول فنـی راه انـدازی پمپ‌هـا و تحلیـل رفتـار گشـتاوری آن‌هـا تحـت روش‌هـای مختلـف راه‌انـدازی، تأثیـر ایـن روش‌هـا بـر انتخـاب الکتروموتـور مناسـب و رفتـار دینامیکـی سیسـتم در لحظـه راه انـدازی مـورد بررسـی قـرار گیر د .

مبانی راه اندازی پمپ گریز از مرکز

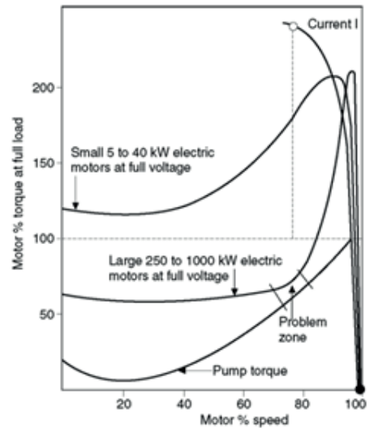
گشتاور موردنیاز در لحظه شروع به کار

فرآیندراه‌اندازی یک پمپ، یک دوره گذراست که طی آن مجموعه پمپ موتور از حالت سکون به سرعت نامی می‌رسد.
شـرط موفقیـت آن اسـت کـه در تمـام طـول مسیرگشـتاور محـرک موتـور بیشـتر از گشـتاور مـورد نیـاز پمـپ باشـد. در ابتـدا هـر دو منحنـی گشـتاور تولیـدی موتـور و منحنـی گشـتاور مـورد نیـاز پمـپ می‌بایسـت مشـخص باشـد. منحنـی گشـتاور موتـور توسـط سـازنده مشـخص می‌شـود. در ابتـدای فرآینـد راه‌انـدازی پمـپ، موتـور بایـد بـر اصطـکاک سـاکن (یاتاقان‌هـا، آب‌بندهـا) غلبـه کنـد کـه حـدود ۱۰ تـا ۱۵ درصـد گشـتاور در بهتریـن نقطـه عملکـردی اسـت. پـس از غلبـه بـر ایـن مقاومـت اولیـه، گشـتاور مـورد نیـاز تـا رسـیدن بـه حـدود ۱۰ تـا ۲۰ درصـد سـرعت نامـی کاهـش می‌یابـد و سـپس بـا افزایـش دبـی، گشـتاور هیدرولیکـی رشـد می‌کنـد. در صورتی‌کـه در هـر نقطـه از مسـیر راه انـدازی، گشـتاور موتـور از گشـتاور پمـپ کمتـر شـود، شـتاب‌گیری متوقـف و جریـان الکتریکـی به‌طـور غیرعـادی افزایـش می‌یابـد؛ ایـن پدیـده می‌توانـد بـه سـوختن سـیم‌پیچ موتـور یـا بـروز لـرزش مکانیکـی منجـر شـود.
بنابرایـن انتخـاب موتـور نـه صرفـاً بـر اسـاس تـوان نامـی، بلکـه بایـد بـا توجـه بـه شـکل منحنـی راه انـدازی آن صـورت پذیـرد. همـان طـور کـه در شـکل (۱) مشـاهده می‌شـود رفتـار منحنـی عملکـرد پمـپ بـه سـرعت ویـژه پمـپ بسـتگی دارد.
پمپ‌هـای شـعاعی بـا سـرعت مخصـوص پاییـن دارای منحنـی تـوان صعـودی و پمپ‌هـای محـوری بـا سـرعت مخصـوص بـالا دارای منحنـی تـوان نزولـی می‌باشـند.



شکل (۱) : منحنی‌های عملکردی پمپ در سرعت مخصوص‌های متفاوت

پر یا خالی بودن مسیر تخلیه پمپ از سیال، هد استاتیکی و وجود مسیر حداقل جریان از جمله عواملی هستند که منحنی بار پمپ را در لحظه راه‌اندازی تغییر می‌دهند. شکل منحنی گشتاور پمپ به روش‌های راه‌اندازی پمپ بستگی دارد[۱]. پمپ‌هایی با سرعت ویژه پایین‌تر، دارای ویژگی گشتاوری هستند که با افزایش دبی، گشتاور نیز افزایش می‌یابد. در مقابل، پمپ‌هایی با سرعت ویژه بالا، دارای ویژگی گشتاوری هستند که با افزایش دبی، گشتاور کاهش می‌یابد.
بسته به نوع و اندازه موتورهای الکتریکی، ویژگی‌های گشتاور آن‌ها متفاوت است به‌ویژه در مواردی که توان ورودی بالا است، باید فرآیند راه‌اندازی به دقت بررسی شود. گشتاور موتور الکتریکی ممکن است در حدود ۸۰ درصد سرعت نامی، به سطح گشتاور پمپ کاهش یابد. در این حالت، گشتاور شتاب‌دهی به صفر می‌رسد و مجموعه در این سرعت قفل می‌شود. در نتیجه، موتور جریان بالایی مصرف می‌کند که می‌تواند خطر آسیب به سیم‌پیچ‌ها را به دنبال داشته باشد [۲].شکل (۲) منحنی گشتاور-سرعت مورد نیاز پمپ و تولیدی موتور را نمایش می دهد نکته حائز اهمیت این است که در تمام سرعت‌ها گشتاور تولیدی موتور می‌بایست از گشتاور مورد نیاز پمپ بیشتر باشد. بدین صورت که حداقل ۱۵ درصد گشتاور نامی بیشتر از منحنی گشتاور-سرعت دستگاه تحت بار باشد، در حالی که ولتاژ پایانه‌های موتور ۸۰ درصد ولتاژ نامی است. در واقع حتی اگر ولتاژ تغذیه موتور به دلایلی (مثل افت ولتاژ در شبکه یا شرایط خاص) به ۸۰ درصد مقدار نامی کاهش یابد نیز موتور همچنان باید توانایی تولید گشتاور موردنیاز (با حاشیه ۱۵ درصد) را داشته باشد [۳].



در شکل (۲) : منحنی‌های گشتاور پمپ و موتور در لحظه راه‌اندازی [۲].

گشتاور مورد نیاز پمپ (T) طبق معادله ۱ محاسبه می‌شود:

معادله (۱) $$T = \frac{P}{\omega}$$

معادله (۲) $$T = 9549\ \frac{P}{\mathrm{n}}$$

معادله (۳) $$T_2 = T_1(\frac{n_2}{n_1})^2$$

که در آن:
T : گشتاور (نیوتن‌متر)
P : توان (وات)
ω : سرعت زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)
معادله ۱ و ۲ نشان می‌دهد که گشتاور پمپ به توان ورودی و سرعت زاویه‌ای آن بستگی دارد. برای محاسبه دقیق، باید مقادیر توان و سرعت زاویه‌ای پمپ در شرایط عملیاتی مشخص شوند. طبق قانون وابستگی (معادله ۳) گشتاور با مربع دور تغییر می کند[۲].
محاسبه زمان شروع راه‌اندازی برای انتخاب موتور مناسب، بهینه‌سازی مصرف انرژی، تضمین ایمنی و پایداری سیستم، تطابق با استانداردهای صنعتی و عیب‌یابی عملکرد ضروری است. زمان شروع مدت زمان لازم برای رسیدن پمپ گریز از مرکز از حالت سکون به سرعت عملیاتی است. این پارامتر از طریق گشتاور شتاب‌دهنده متوسط و ممان اینرسی محاسبه می‌شود و نقش کلیدی در طراحی و بهره‌برداری کارآمد سیستم دارد. این پارامتر به صورت معادله (۴)تعریف می‌شود [۴].

معادله(۴) $$t_a \approx \frac{\pi * J * n_B}{30 * T_{b,ave}}$$

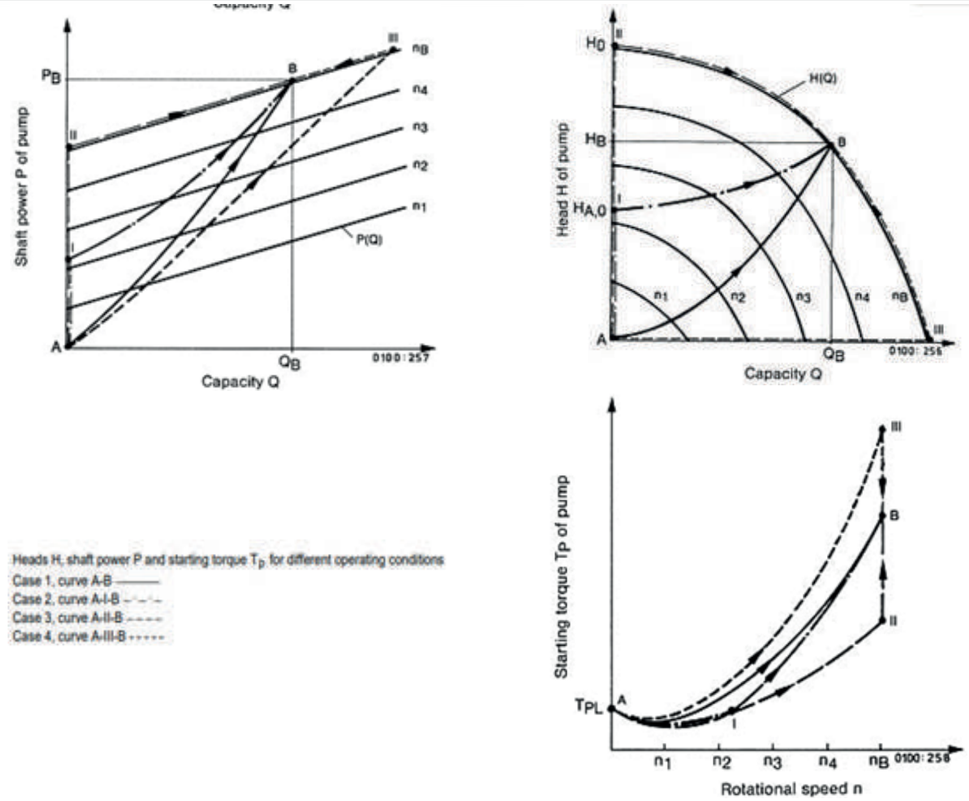
که در آن:
- n_B : دور عملیاتی (دور بر دقیقه)
- $T_{b.ave}$: گشتاور شتاب‌دهنده متوسط (نیوتن متر)
- t_a : زمان شروع به کار (ثانیه)
- J : ممان اینرسی (کیلوگرم مترمربع)

عوامل زیر تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر گشتاور راه‌اندازی دارند:
- شکل منحنی‌های مشخصه برای هد و توان پمپ، به صورت تابعی از ظرفیت و دور پمپ،
- موقعیت نقطه عملیاتی روی این منحنی‌های مشخصه،
- رفتار شروع موتور، که با زمان شروع مجموعه پمپاژ مشخص می‌شود،
- مشخصه‌های سیستم، با در نظر گرفتن هرگونه شیر تعبیه‌شده در سیستم (شیرهای ایزوله، شیرهای یک‌طرفه یا شیرهای غیربازگشتی).
- زمان شروع برای شتاب‌گیری جرم سیال در خط لوله پرشده

در معادله(۵) زمان شروع برای شتاب‌گیری جرم سیال به صورت تابعی از دبی، هد سیال و مشخصات فیزیکی خط لوله نمایش داده شده است.
معادله(۵) $$t_{aQ} \approx \frac{3 * Q}{2 * g(H_{0-}\ H_{A-0})} * \frac{L}{A}$$

که در آن:
- t_{aQ} : زمان شروع برای شتاب‌گیری جرم سیال
- Q : ظرفیت
- H_0 : هد شات آف
- $H_{A,0}$: هد استاتیک
- L : طول خط لوله
- A : سطح مقطع خط لوله

شکل منحنی گشتاور اولیه راه اندازی یک پمپ شعاعی(با سرعت ویژه پایین و با این فرض که توان پمپ به‌صورت خطی با افزایش ظرفیت افزایش می‌یابد) برای چهار نوع مختلف عملکرد در شکل (۳) نمایش داده شده است. در هر چهار منحنی، گشتاور اولیه (Tp) از همان گشتاور جدایش (TpL) آغاز می‌شوند که برای غلبه بر اصطکاک استاتیکی یاتاقان‌ها و آب‌بند مورد نیاز است. پس از آن، این منحنی‌ها از دو فرآیند تشکیل شده‌اند که یا به‌صورت هم‌زمان یا به‌صورت متوالی اجرا می‌شوند، یعنی:
۱. افزایش گشتاور با افزایش دور پمپ (n)،
۲. افزایش گشتاور متناسب با افزایش نیاز به توان پمپ (P) با افزایش ظرفیت (Q)



شکل (۳) : منحنی‌های گشتاور پمپ و موتور در سناریوهای مختلف

عملکردهای تعریف شده بسته به نسبت زمان‌های شروع به کار پمپ(ta)، زمان شتابگیری سیال در اثر راه اندازی پمپ(taQ)، شیرها و اتصالات تعبیه‌شده در سیستم، طول خطوط تخلیه پمپ و همچنین رفتار پمپ و سیال در لحظه راه اندازی متفاوت هستند. با توجه به شکل (۳) در اینجا چهارعملکرد متفاوت برای راه اندازی پمپ در شرایط فیزیکی متفاوت مورد بررسی قرار می گیرد.

- عملکرد ۱، (راه اندازی پمپ با مسیر تخلیه بسته و طول خط کوتاه):

همان طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می شود در این سناریو مسیر منحنی از نقطه A به نقطهB می باشد که در آن خروجی پمپ یک خط لوله پر از سیال با طول بسیار کوتاه می باشد، زمان شروع (taQ) برای جرم‌های سیال ناچیز است و هیچ فشار متقابل استاتیکی (HA,۰) وجود ندارد. در این حالت، پمپ در زمان شروع (ta)، به‌طور مستقیم به نقطه عملیاتی B می‌رسد، بدون اینکه به هد شات آف (H۰) برسد. در این حالت پمپ در حالت خروجی بسته راه‌اندازی می‌شود، پس از آن که پمپ به سرعت نامی رسید ولو تخلیه باز می‌شود. اگر مسیر حداقل جریان باز باشد منحنی راه‌اندازی از نقطه معادل هد مسیر حداقل جریان که کمتر از H۰ است و با دبی مسیر حداقل جریان شروع می‌شود.

- عملکرد ۲، (راه‌اندازی پمپ با مسیر تخلیه باز با وجود هد استاتیک پشت چک ولو):

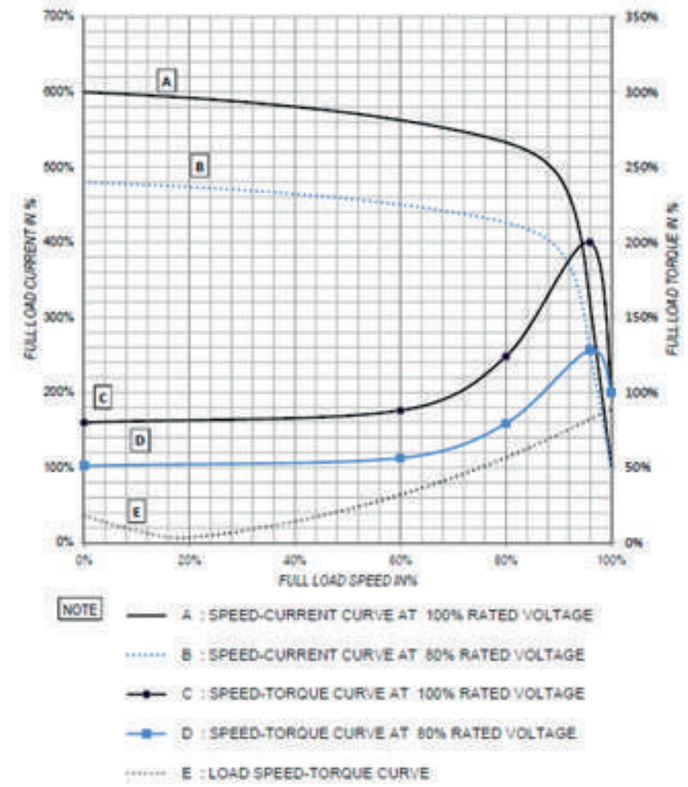
همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود مسیر منحنی از نقطه A به نقطه I وB می‌باشد که در این سناریو منحنی مشخصه سیستم شامل یک بخش استاتیکی (HA,۰) است که توسط یک شیر یک‌طرفه کنترل می‌شود، در واقع شیر یک‌طرفه یا غیربازگشتی پس از رسیدن به هد H = HA,۰ در نقطه I باز می‌شود و پمپ شروع به تخلیه می‌کند.
زمان شروع (taQ) برای جرم‌های سیال ناچیز است. گشتاور اولیه در امتداد منحنی I-B افزایش می‌یابد، که موقعیت آن توسط منحنی مشخصه سیستم تعیین می‌شود. این حالت می‌تواند برای راه‌اندازی پمپ‌هایی استفاده شود که مسیر تخلیه از سیال پر باشد و پشت چک ولو سیال تحت فشار موجود باشد.

- عملکرد ۳، (راه‌اندازی پمپ با مسیر تخلیه بسته و طول خط بلند پر از سیال):

همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود مسیر منحنی از نقطه A به نقطه II وB می‌باشد در این سناریو خروجی پمپ یک خط لوله پر از سیال با طول زیاد می‌باشد، در نتیجه با توجه به جرم سیال پیش روی پمپ زمان شروع (taQ) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از زمان راه‌اندازی (ta) پمپ و موتور است.
در این حالت با شروع زمان راه‌اندازی شتاب‌گیری سیال تا رسیدن به دور نامی پمپ (nB) در نقطه II ادامه پیدا می‌کند پس از آن، پمپ با افزایش گشتاور اولیه و با دور تقریباً ثابت (nB) در زمان شروع (taQ) به نقطه عملیاتی B می‌رسد.
مورد توصیف‌شده بالا را می‌توان به راه‌اندازی پمپ درحالتی که شیر خروجی بسته است نیز نسبت داد، در این حالت ولو خروجی تنها زمانی باز می‌شود که پمپ به سرعت نامی خود در نقطه II برسد.

- عملکرد ۴، (راه‌اندازی پمپ با مسیر تخلیه باز و بدون هد استاتیک و خط لوله خالی):

همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود مسیر منحنی از نقطه A به نقطه III وB در این سناریو پمپ سیال را به یک خط لوله خالی تخلیه می‌کند. بنابراین، ابتدا به نقطه اضافه‌بار III با هد H = ۰ می‌رسد و سپس به‌تدریج با پر شدن خط لوله و افزایش هد، به نقطه عملیاتی B می‌رسد، در حالی که همزمان گشتاور اولیه کاهش می‌یابد. (از آنجا که خطوط لوله خالی هستند افزایش دور پمپ و افزایش دبی همزمان انجام می‌شود در نتیجه نمودار گشتاور بالاتر از سناریوهای اول تا سوم قرار می‌گیرد).
عملکرد ۴ معمولا در مورد پمپ‌های سانتریفیوژ با سرعت ویژه بالا (مانند پمپ‌های پروانه‌ای) کاربرد دارد و الگوی گشتاور اولیه متفاوت خواهد بود، زیرا توان پمپ با افزایش دبی به‌تدریج کاهش می‌یابد. به همین دلیل در هنگام راه‌اندازی درمقایسه با یک شیر تخلیه بسته، گشتاور اولیه بیشتری در این حالت مورد نیاز است در حالی که در هنگام راه‌اندازی در یک خط لوله خالی، گشتاور اولیه کمتر خواهد بود [۱] [۲] [۴].
به طور کلی بسته به نسبت زمان‌های شروع (ta) و (taQ) و همچنین شیرها و اتصالات تعبیه‌شده در سیستم، گشتاور اولیه برای پمپ ها با سرعت ویژه پایین و متوسط الگوهای متفاوتی را دنبال می‌کند که بین موارد‌سناریوهای ۱ و ۳ قراردارد [۴].
در پروژه‌های نیروگاهی سیکل ترکیبی داخل ایران پمپ‌های کلیدی نیروگاهی شامل پمپ تغذیه بویلر (BFP)، پمپ استخراج کندانس(CEP) و پمپ گردش آب پیش گرمکن (PRH) می‌باشند.
این پمپ‌ها نقش حیاتی در عملکرد ایمن و کارآمد سیستم ایفا می‌کنند. در ادامه، به بررسی شرایط عملیاتی این پمپ‌ها در مرحله راه‌اندازی نیروگاه‌های بازیافت حرارتی پرداخته می‌شود. تمرکز اصلی بر مسیرهای جریان و چالش‌های راه‌اندازی، به ویژه در سناریوهای تعویض پمپ‌های آماده به کار می‌باشد. به طور کلی پمپ های CEP، BFP و PRH استفاده شده در نیروگاه‌های بازیافت حرارتی در حوزه پمپ با سرعت ویژه پایین تا متوسط قرار می‌گیرند.
پمپ‌های CEP وظیفه استخراج آب کندانس‌شده از تانک ذخیره کندانس و افزایش فشار آن برای تحویل به بویلر بازیافت حرارتی را بر عهده دارند. آرایش استاندارد این پمپ‌ها به صورت ۱+۱ است، به این معنا که یک پمپ اصلی در حال کار است و پمپ دوم به عنوان به صورت آماده به کار آماده بهره‌برداری در شرایط اضطراری قرار دارد.
در مسیر تخلیه این پمپ‌ها، یک شیر یک‌طرفه و یک شیر ایزوله دستی نصب شده است. همچنین، مسیر حداقل جریان توسط یک شیر کنترلی مدیریت می‌شود که سیگنال آن از ترانسمیتر فشار نصب‌شده در خروجی پمپ دریافت می‌گردد.
در مرحله راه‌اندازی، باید اطمینان حاصل شود که تمام خطوط لوله، درام مبدأ و مقصد پمپ با سیال پر شده‌اند و شیر کنترل مسیر حداقل جریان در حالت اتوماتیک قرار دارد. تا زمان آماده‌سازی بویلر بازیاب حرارتی برای راه‌اندازی، پمپ CEP در حالت حداقل جریان باقی می‌ماند. بنابراین، راه‌اندازی اولیه پمپ‌ها با خروجی بسته و مسیر حداقل جریان باز انجام می‌شود.
با این حال، در حین عملیات عادی، ممکن است نیاز به ورود پمپ دوم(آماده به کار) به مدار باشد. در این سناریو، خروجی پمپ دوم دیگر بسته نیست و پمپ با مسیر خروجی باز و ستون مایع تحت فشار پشت شیر یک‌طرفه مواجه می‌شود. این شرایط نسبت به حالت خروجی بسته، بحرانی‌تر است و نیازمند گشتاور بیشتری برای راه اندازی موتور می‌باشد.
بنابراین، در فرآیند خرید موتور برای پمپ‌های CEP، باید سناریو راه اندازی پمپ استندبای به عنوان ملاک اصلی در نظر گرفته شود تا از عملکرد ایمن آن اطمینان حاصل گردد. در واقع می‌توان گفت در این حالت پمپ CEP برای راه‌اندازی از الگوی عملکرد ۲ پیروی می‌کند.
در شکل ۴ نمودار گشتاور مورد نیاز پمپ نسبت به گشتاور موتور که توسط سازنده تهیه شده، آورده شده است.



در شکل (۴) : منحنی‌های گشتاور پمپ و موتور در لحظه راه‌اندازی برای پمپ CEP

پمپ‌های BFP از نوع چندمرحله‌ای هستند و معمولاً از مراحل میانی آن‌ها انشعابی برای تأمین آب سطوح میانی فشار (IP) گرفته می‌شود. این پمپ‌ها آب را از مخزن کم‌فشار (LP) دریافت کرده و به سطوح فشار بالا (HP) و سطوح میانی (IP) می‌رسانند.
حداقل جریان این پمپ‌ها به صورت مکانیکی مدیریت می‌شود و توسط شیر ARC که در مسیر HP نصب شده، کنترل می‌گردد. آرایش استاندارد این پمپ‌ها نیز ۱+۱ است و در عملیات عادی، تنها یک پمپ در مدار قرار دارد.
مشابه پمپ‌هایCEP، در بخشی از عملیات ممکن است نیاز به راه‌اندازی پمپ BFP آماده به کار باشد. در این حالت نیز گشتاور مورد نیاز برای راه اندازی پمپ آماده به کار شرایط بحرانی‌تری ایجاد می‌کند. بنابراین در بررسی مدارک خرید، این سناریو باید به عنوان ملاک اصلی برای انتخاب موتور مناسب در نظر گرفته شود تا از پایداری سیستم اطمینان حاصل شود.
پمپ‌های PRH برای تنظیم دمای آب ورودی به اکونومایزرها استفاده می‌شوند. با توجه به توان مصرفی پایین این پمپ‌ها و بر اساس تجربیات خرید پیشین، انتخاب روش‌های مختلف راه‌اندازی تأثیر محسوسی بر اندازه موتور ندارد. بنابراین فلسفه راه اندازی پمپ در این مورد تأثیری بر سایز موتور انتخابی ندارد.
در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با تمرکز بر بازیافت حرارتی، توجه به شرایط راه‌اندازی پمپ‌های کلیدی CEP و BFP ضروری است، زیرا سناریوهای تعویض پمپ اصلی به آماده به کار می‌تواند چالش‌های فنی مانند نیاز به گشتاور بالاتر ایجاد کند. این امر باید در مراحل طراحی، خرید و بهره‌برداری مد نظر قرار گیرد تا کارایی و ایمنی سیستم حفظ شود. در مقابل، پمپ‌های PRH انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و نیاز به تغییرات خاص ندارند.

جمع‌بندی

پمپ‌های گریز از مرکز، به‌ویژه پمپ‌های کلیدی نیروگاهی مانند پمپ تغذیه بویلر (BFP)، پمپ استخراج کندانس (CEP) و پمپ گردش آب پیش‌گرمکن (PRH)، نقش حیاتی در عملکرد ایمن و کارآمد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ایفا می‌کنند. انتخاب روش مناسب راه‌اندازی این پمپ‌ها، تأثیر مستقیمی بر گشتاور مورد نیاز موتور، رفتار هیدرولیکی پمپ، منحنی توان و ریسک‌های عملیاتی نظیر کاویتاسیون و اضافه‌بار موتور دارد. روش‌های مختلف راه اندازی، از جمله راه‌اندازی با خط لوله پر یا خالی، وجود شیرهای کنترلی و شرایط عملیاتی مانند تعویض پمپ آماده به کار، منحنی گشتاور_سرعت پمپ و موتور را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تحلیل دقیق این منحنی‌ها در مرحله طراحی، امکان انتخاب موتور بهینه را فراهم می‌کند که نه‌تنها هزینه‌های سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد، بلکه قابلیت اطمینان و طول عمر تجهیزات را افزایش می‌دهد. برای پمپ‌های CEP و BFP، سناریوی راه‌اندازی پمپ آماده به کار به دلیل نیاز به گشتاور بالاتر، بحرانی‌ترین حالت بوده و باید به‌عنوان ملاک اصلی در انتخاب موتور در نظر گرفته شود.
در مقابل، پمپ‌های PRH به دلیل توان مصرفی پایین، انعطاف‌پذیری بیشتری در انتخاب روش راه‌اندازی دارند و نیاز به تغییرات خاص در طراحی موتور ندارند.

مراجع

- Termomeccanica Centrifugal Pump Handbook, Published by: TM.P. S.pA Termomeccanica Pompe - La Spezia - Italy First edition ۲۰۰۳
- Centrifugal Pump Handbook, ۲۰۱۰ Elsevier Ltd,Sulzer Co Third edition ۲۰۱۰.
- American Petroleum Institute. (۲۰۲۱). API Standard ۶۱۰: Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries (۱۲th ed.). API Publishing.
- Centrifugal Pumps Lexicon, Holzenberger, K., & Jung, K, Germany: KSB, Third edition , ۱۹۹۰.

بـررسی و آشنـایی با آزمون RFT جهت تعیین میزان خوردگـی تیـوب‌ها

علی متولی، مهدی طلائیان

مقدمه

تیوب‌هـای مـورد اسـتفاده در نیـروگاه بازیافـت حرارتـی (HRSG) مسـتعد بـه مکانیسـم هـای تخریـب ماننـد خوردگـی یـا ترک‌هـا هسـتند. ایـن تیوب‌هـا معمـولا بصـورت فشـرده بـوده و بـا محدودیـت دسترسـی مواجـه هسـتند. بررسـی سـلامت تیـوب هـا در حیـن بهـره بـرداری کمـک شـایانی در اطمینـان از صحـت عملکـرد مجموعـه را بـه همـراه خواهـد داشـت. جهـت تعییـن میـزان خوردگـی یـا ناپیوسـتگی هـای تیـوب هـا روش هـای مختلفـی در حـوزه آزمـون هـای غیـر مخـرب معرفـی شـده اسـت کـه یکـی از آنهـا آزمـون RFT یـا REMOTE FILED TESTING می‌باشـد کـه بـرای ارزیابـی میـزان خوردگـی یـا ناپیوسـتگی‌ها بـا انتقـال تجهیـز تسـت بـه داخـل تیوب‌هـا اسـتفاده می‌گـردد. هـدف از ایـن مقالـه معرفـی ایـن روش تسـت، اسـاس کار و مزایـا و محدودیت‌هـا و معرفـی اسـتانداردهای مربوطـه می‌باشـد.

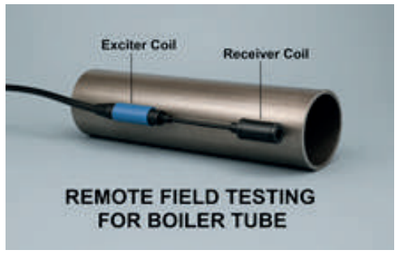
۱. معرفی روش تست

آزمـون RFT (کـه بـر اسـاس امـواج الکترومغناطیسـی می‌باشـد) یکـی از آزمون‌هـای قابـل اسـتفاده بـرای تعییـن خوردگـی، کاهـش ضخامـت، تـرک یـا ناپیوسـتگی‌ها در تیـوب یـا فیـن تیوب‌هـای بویلـر می‌باشـد کـه در زمـان خاموشـی بویلرهـا بـه دلیـل تعمیـرات قابـل اسـتفاده اسـت. ایـن آزمـون عمومـا بـرای تسـت مـواد فـرو مگنـت مثـل فولادهـای فریتـی کاربـرد دارد.
استاندارد ASME SEC V-Article-17 یا ASTME2096 به روش اجرای تست و جزئیات مربوطه می‌پردازد.

۲. اساس کار RFT

در ایـن روش از یـک پـروب اسـتفاده می‌شـود کـه دارای یـک سـیم‌پیچ تحریک‌کننـده (exciter coil) و یـک سـیم‌پیچ گیرنـده (receiver coil) اسـت. سـیم‌پیچ تحریک‌کننـده بـا یـک جریـان متنـاوب (AC) راه‌انـدازی می‌شـود. فاصلـه بیـن سـیم‌پیچ تحریـک و گیرنـده معمـولاً چنـد قطـر لولـه اسـت (تقریبـاً دو تـا سـه برابـر قطـر لولـه) اسـت. ایـن فاصلـه بـه ایـن دلیـل اسـت کـه میـدان مغناطیسـی بتوانـد از دیـواره تیـوب عبـور کنـد، اطـراف تیـوب حرکـت کنـد و مجـدداً از دیـواره وارد شـده و بـه سـیم‌پیچ گیرنـده برسـد. پـروب مربوطـه در طـول تیـوب بـا یـک سـرعت مشـخص حرکـت می‌کنـد و البتـه بدیـن منظـور می‌تـوان از یـک حمـل کننـده (crawler) اسـتفاده نمـود. وقتـی در دیـواره لولـه کاهـش ضخامـت (بـه خاطـر خوردگـی، فرسـایش، خوردگـی داخلـی یـا خارجـی) وجـود داشـته باشـد، میـدان مغناطیسـی در مسـیر عبـور مقاومـت کم‌تـری دارد، و ایـن باعـث می‌شـود کـه زمـان عبـور میـدان (phase delay) و دامنـه سـیگنال دریافتـی (amplitude) تغییـر کننـد. ایـن تغییـرات توسـط دسـتگاه دریافـت و بصـورت یک سـیگنال نمایـان مـی شـود کـه بایسـتی توسـط اپراتـور مـورد ارزیابـی قـرار گیـرد.
RFT می‌توانـد ضعف‌هـا، خوردگی‌هـا و کاهـش ضخامـت را در داخـل یـا خـارج دیـواره بـا حساسـیت تقریبـاً برابـر تشـخیص دهـد، اگرچـه تمایـز دقیـق بیـن داخلـی یـا خارجـی بـودن نقـص همیشـه ممکـن نیسـت.
شکل ۱و۲ نمایی از دستگاه و پراب انتقالی به داخل تیوب می‌باشد.

شکل ۱. دستگاه اصلی تست RFT



شکل ۲. پراب انتقالی

۳. مزایای RFT

- حساسـیت برابـر بـه نقص‌هـای داخلـی و خارجـی برخـلاف بعضـی روش‌هـای دیگـر کـه عیـوب خارجـی یـا داخلـی را بهتـر تشـخیص می‌دهنـد.
- نیاز کمتر به تماس مستقیم یا کوپلنت از آنجا که میدان از طریق دیواره لوله عبور می‌کند.
- عدم نیاز به آماده‌سازی سطح (فقط در موارد خاص مانند وجود رسوب سنگین، گل یا لجن در تیوب)
- امکان اسکن سریع‌تر تیوب‌ها و بررسی کل گروه تیوب‌ها در زمان کمتر.

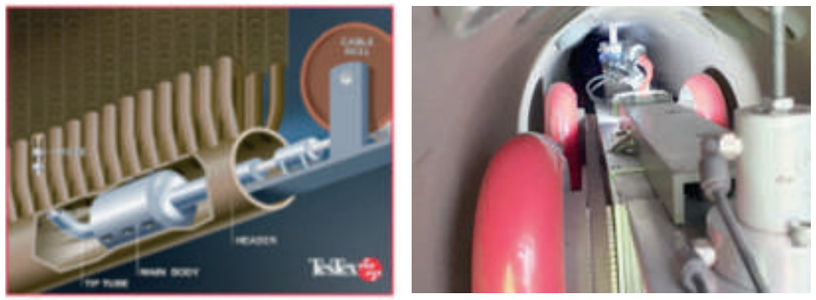
۴. معایب RFT

- دقـت آن در نقص‌هـای بسـیار موضعـی (مثـل سـوراخ‌های کوچـک یـا ترک‌هـای ریـز) نسـبت بـه برخـی روش‌هـا مثـل اولتراسـونیک ضعیفتـر اسـت.
- مجـاورت یـا وجـود اشـیاء فلـزی یـا مـواد رسـانا در بیـرون لولـه مثـلاً صفحـات نگهدارنـده لوله‌هـا، تیغه‌هـای پشـتیبان tube supports می‌توانـد میـدان را مختـل کـرده و نتایـج را تحـت تأثیـر قـرار دهـد.
- معمولاً نیاز به تجهیزات تخصصی‌تر و تکنیسین‌های آموزش‌دیده دارد.
- لزوم دسترسی به داخل تیوب‌ها.
- تعیین داخلی بودن یا خارجی بودن عیب همیشه ممکن نیست.

۵. نکاتی برای اجرای بهینه آزمون

برای این که RFT نتیجه‌ای دقیق و قابل اعتماد بدهد، چند نکته باید رعایت شود:

- تمیـز بـودن سـطح لولـه: لـزوم حـذف رسـوبات، زنگ‌زدگـی، پوشـش‌های ضخیـم خارجـی کـه ممکـن اسـت انتشـار میـدان را مختـل کننـد. اگـر سـطح نـا مناسـب باشـد، سـیگنال ممکـن اسـت ضعیـف یـا نویـزی شـود.
- کالیبراسـیون مناسـب: اسـتفاده از لوله‌هایـی بـا ضخامـت شـناخته شـده یـا بخش‌هایـی کـه دارای کاهـش ضخامـت مشـخص هسـتند بـرای تنظیـم و مرجع‌دهـی سـیگنال‌ها ضـروری اسـت.
- انتخـاب پـروب مناسـب: انتخـاب فاصلـه بیـن تحریک‌کننـده و گیرنـده، فرکانـس مناسـب، انـدازه و نـوع سـیم پیـچ بـر اسـاس قطـر لولـه، ضخامـت دیـواره.
- تجربـه و آمـوزش اپراتـور: اپراتـور بایـد قـادر باشـد سـیگنال‌ها را تحلیـل کنـد، نویـز را شناسـایی کنـد، و تأثیـرات محیطـی (مثـلاً دمـای بـالا، میدان‌هـای مغناطیسـی پیرامـون، اتصـال بـه سـاختارهای فلـزی بیرونـی) را در نظـر بگیـرد.
- مقایسـه و تأییـد بـا روش‌هـای دیگـر: گاهـی ممکـن اسـت، نتایـج RFT بـا روش‌هایـی مثـل اولتراسـونیک یـا بازرسـی ظاهـری مـورد ارزیابـی قـرار گیـرد تـا اطمینـان از تشـخیص عیـب حاصـل شـود.
- لزوم تهیه پروسیجر مناسب و مطابق با استاندارد ASME SEC V



شکل۳. تصویر مربوط به اجرای آزمون برای تیوب‌های هارپ

۶. نتیجه‌گیری

تنهـا روشـی کـه امـکان بازرسـی تمـام تیوب‌هـا را در تجهیـز هـارپ فراهـم می‌کنـد، نیـاز بـه بـرش End Capهـا و ارسـال تجهیـز بـه کمـک یـک ربـات بـه داخـل هـدر اسـت. بـرش End Cap هـا و تعمیـر هـدر هزینـه بـر اسـت و عمـلا بدیـن منظـور بایسـتی بخشـی از Casing و همچنیـن End Cap جهـت دسترسـی داخـل هـدر بریـده شـوند و لـذا بـه نظـر می‌رسـد کـه ایـن موضـوع بزرگتریـن محدودیـت ایـن روش بـرای تسـت تیوب‌هـا می‌باشـد.

۷. منابع

- وبسایت شرکت‌های LMATS و TESTEX (www.testex-ndt.com ,www.lmats.com.au)
- کارگروه آزمون‌های غیرمخرب در شرکت مپنا بویلر

حسگرهای آکوستیک در بویلرهای بخار

سپیده سهراب

چکیده

استفاده از حسگرهای آکوستیک به عنوان یک فناوری نظارت و پایش پیشرفته در بویلرهای بخار، رویکردی نوآورانه برای بهینه‌سازی عملکرد و افزایش ایمنی عملیاتی است.

این حسگرها، که بر مبنای دریافت و تحلیل امواج صوتی عمل می‌کنند، قادرند اطلاعات حیاتی را از محیط داخلی بویلر جمع‌آوری کنند که دسترسی به آن‌ها با روش‌های سنتی دشوار است.

در محیط پرنویز بویلر، هر پدیده غیرطبیعی مانند نشتی لوله‌های بخار، فرآیندهای احتراق نامناسب، یا تجمع رسوبات، الگوی صوتی خاصی تولید می‌کند که توسط این حسگرها قابل تشخیص است.

این فناوری امکان پایش پیوسته وضعیت بویلر را فراهم می‌آورد و از این رو، به عنوان یک ابزار پیش‌بینی کننده و تشخیص‌دهنده عیوب عمل می‌کند.

مهم‌ترین کاربرد حسگرهای آکوستیک در بویلرها، تشخیص نشتی لوله‌ها است. نشتی بخار یا آب از یک لوله فشار قوی، یک جریان پرسرعت ایجاد می‌کند که نویز با فرکانس بالا تولید می‌کند.

حسگرهای آکوستیک که در نقاط استراتژیک بویلر نصب می‌شوند، می‌توانند این نویز را دریافت و با تحلیل فرکانس و شدت آن، محل دقیق نشتی را حتی در مراحل اولیه، پیش از آنکه با چشم غیرمسلح قابل رؤیت باشد، شناسایی کنند.

تشخیص به موقع نشتی‌ها از گسترش آسیب، از کارافتادگی ناگهانی و حوادث فاجعه‌بار جلوگیری کرده و زمان تعمیرات و هزینه‌های مربوطه را به شدت کاهش می‌دهد. این قابلیت، به ویژه برای بویلرهای نیروگاهی که به طور مداوم در حال کار هستند، بسیار حیاتی است[۱,۲].

علاوه بر تشخیص نشتی، حسگرهای آکوستیک در پایش احتراق نیز کاربرد دارند. این حسگرها می‌توانند تغییرات در صدای شعله را که نشان‌دهنده احتراق نامنظم، نوسانات فشار یا مشکلات مشعل است، تشخیص دهند. پایش آکوستیک احتراق به بهینه‌سازی نسبت سوخت به هوا کمک کرده و منجر به احتراق کامل‌تر، افزایش راندمان حرارتی و کاهش انتشار آلاینده‌هایی مانند مونوکسید کربن (CO) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) می‌شود. همچنین، این حسگرها می‌توانند برای پایش تجمع رسوبات و عملکرد سیستم‌های پاک‌سازی آکوستیک یا مکانیکی به کار روند. با اندازه‌گیری تغییرات نویز ناشی از پاکسازی، می‌توان کارایی فرآیند را ارزیابی و بهینه‌سازی کرد.

در مجموع، حسگرهای آکوستیک یک ابزار قدرتمند و چند منظوره برای افزایش ایمنی، بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی در بویلرهای بخار محسوب می‌شوند [۳].

کلیدواژه‌ها: آکوستیک, سنسور هوابرد, سنسور پیزوالکتریک, بویلرهای صنعتی, عیب‌یابی

مقدمه

در صنایع حرارتی و نیروگاهی، بویلرها به‌عنوان قلب تولید بخار و انرژی نقش حیاتی دارند. عملکرد ایمن، پایدار و بهینه این تجهیزات نیازمند پایش دقیق و مداوم پارامترهای عملیاتی است. در این راستا، استفاده از انواع حسگرها برای اندازه‌گیری، کنترل و تحلیل شرایط کاری بویلرها به یک ضرورت تبدیل شده است.

در کنار حسگرهای معمول، یکی از فناوری‌های نوین و مؤثر در پایش بویلرهای بخار، استفاده از حسگرهای آکوستیک است.

این حسگرها با تحلیل امواج صوتی تولیدشده از جریان بخار، فرایند احتراق و ساختار مکانیکی بویلر، امکان تشخیص ناهنجاری‌هایی مانند نشتی بخار و اختلالات احتراقی را فراهم می‌کنند. در این بررسی، عملکرد حسگرهای آکوستیک در نشتی بویلرها بررسی شده است.

حسگرهای آکوستیک به دو نوع اصلی تقسیم می‌شوند: حسگرهای هوابُرد (air-borne) و حسگرهای ساختاری (Structure borne). در حالی که روش کار در هر دو سیستم شامل تجزیه و تحلیل صدا می‌باشد، اما در نحوه ضبط و پردازش امواج صوتی متفاوت بوده و انتخاب بهینه بین این دو حسگر تا حد زیادی وابسته به کاربرد آن و نوع ناهنجاری ایجاد شده دارد.

اصطلاح «air-borne sound» نوعی نویز است که توسط یک تجهیز در محیط‌های صنعتی منتشر شده و از طریق هوا منتقل می‌شود. این امواج صوتی از طریق میکروفون‌ها یا سایر حسگرهای صوتی در محدوده فرکانس بالا (۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز) که معمولاً نزدیک دستگاه قرار می‌گیرند، دریافت می‌شوند.

داده‌های صوتی برای تشخیص هرگونه تغییر یا ناهنجاری که نشان دهنده نقص یا خرابی باشد، تجزیه و تحلیل می‌شوند.

از سوی دیگر، اصطلاح «structure-borne sound» به نویزی اطلاق می‌شود که از طریق سازه‌های صلب و نه از طریق هوا منتقل می‌شود. این امواج از طریق حسگرهایی که روی سطح آیتم تحت آزمایش قرار می‌گیرند، دریافت می‌شوند.

این امواج صوتی می‌توانند توسط منابع مختلفی از جمله تجهیزات الکتریکی و تجهیزات مکانیکی مانند موتورها، پمپ‌ها و بویلرها تولید شوند. تجزیه و تحلیل صدای منتقل شده از سازه در طیف اولتراسونیک، امواجی با باندهای فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز تا چند ده مگاهرتز را شناسایی می‌کند. [۴, ۵]

مطالعات نشان داده‌اند که تحلیل طیفی داده‌های صوتی با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) و الگوریتم Yule_Walker می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره وضعیت عملکردی بویلرها ارائه دهد.

حسگرهای آکوستیک در دو جنبه می‌توانند برای بویلرهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرند. جنبه اول کاربرد آنها در normal operation بوده که با دریافت و تحلیل امواج اکوستیک منتشر شده در محیط بویلر، الگوهای معیوب و غیرنرمال را شناسایی می‌کند. در حالت دوم می توان با ارسال و دریافت آگاهانه امواج صوتی در یک بویلر خارج از سرویس، جهت شناسایی و تحلیل عیوب ساختاری بویلر (مانند وجود شکاف ریز در تیوب ها) قبل از قرارگیری در سرویس اقدام نمود.

در مجموع، حسگرهای آکوستیک به‌عنوان مکملی قدرتمند برای حسگرهای سنتی، نقش مهمی در تحول پایش هوشمند بویلرهای صنعتی ایفا می‌کنند و مسیر را برای توسعه سیستم‌های نگهداری پیش‌بین و بهینه‌سازی انرژی هموار می‌سازند.

حسگرهای هوا برد و ساختاری

نوع هوابُرد از میکروفون‌های حساس به امواج صوتی استفاده می‌کند، در حالی‌که نوع ساختاری از حسگرهای پیزوالکتریک بهره می‌برد که ارتعاشات ناشی از نشتی یا ضربه را ثبت می‌کنند[۶].

حسگرهای پیزوالکتریک، با استفاده از پدیده فیزیکی پیزوالکتریسیته، ارتعاشات و فشارهای مکانیکی را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کنند.

پدیده پیزوالکتریسیته زمانی رخ می‌دهد که یک ماده کریستالی خاص مانند کوارتز یا سرامیک‌های PZT در اثر اعمال فشار مکانیکی، بار الکتریکی تولید کند. این ویژگی به سنسور اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به منبع تغذیه خارجی، تنها با تحریک مکانیکی، جریان الکتریکی تولید کند. در بویلرهای صنعتی، این تحریک معمولاً ناشی از ارتعاشات، ضربه‌های ناشی از نشتی بخار، یا تغییرات فشار در لوله‌ها و دیواره‌هاست.

سنسورهای پیزوالکتریک به‌صورت مستقیم روی سطح فلزی یا لوله‌های بویلر نصب می‌شوند و ارتعاشات ناشی از نشتی یا ترک‌های داخلی را دریافت می‌کنند. برخلاف حسگرهای هوابُرد که امواج صوتی را از طریق هوا دریافت می‌کنند، حسگرهای پیزوالکتریک امواج را از طریق سازه جامد منتقل می‌کنند.

یکی از مزایای مهم سنسورهای پیزوالکتریک در بویلرهای صنعتی، مقاومت بالای آن‌ها در برابر دمای بالا، فشار زیاد و شرایط خورنده است. این حسگرها می‌توانند در دمایی تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای بالا بدون افت عملکرد با دقت بالا عمل کنند.

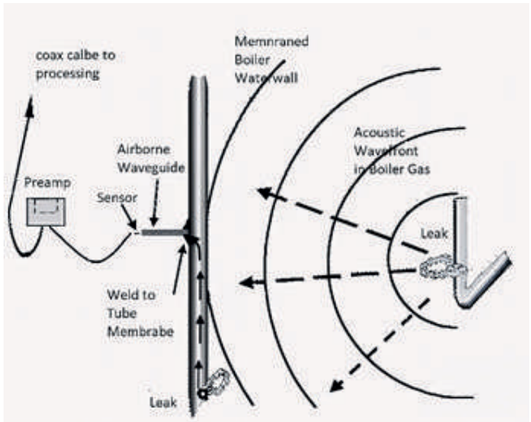
سنسورهای پیزوالکتریک دارای پاسخ بسیار سریع به تغییرات دینامیکی هستند و می‌توانند ارتعاشات لحظه‌ای و ضربه‌های گذرا را با دقت بالا ثبت کنند.

این ویژگی آن‌ها را برای پایش لحظه‌ای و تشخیص زودهنگام نشتی‌ها بسیار مناسب کرده است. همچنین، به دلیل خروجی ولتاژ بالا در پاسخ به تحریک کوچک، این حسگرها نیازی به تقویت‌کننده‌های پیچیده ندارند و می‌توانند مستقیماً به سیستم‌های مانیتورینگ متصل شوند. همچنین، با توجه به ویژگی‌های این سنسور، نصب آن‌ها در نقاط حساس و دور از دسترس بویلر امکان‌پذیر است.

شکل ۱. سنسور پیزوالکتریک

سنسورهای هوابُرد (Airborne Acoustic Sensors) بر پایه دریافت امواج صوتی منتشرشده در هوا عمل می‌کنند. در فرآیند نشتی بخار، زمانی که بخار تحت فشار از یک ترک یا شکاف در لوله‌های بویلر خارج می‌شود، امواج صوتی با فرکانس‌های خاص تولید می‌گردند. این امواج در محیط اطراف منتشر شده و توسط سنسور هوابُرد دریافت می‌شوند. سنسور معمولاً در فاصله‌ای امن از منبع نشتی نصب می‌شود و از طریق موج‌برهای صوتی (waveguides) یا کانال‌های آکوستیک، صدا را دریافت می‌کند. این طراحی موجب محافظت حسگر در برابر دمای بالا، ذرات معلق و شرایط خورنده محیط بویلر می‌شود. درون سنسور، یک دیافراگم حساس وجود دارد که با برخورد امواج صوتی به ارتعاش درمی‌آید. این دیافراگم به یک سیم‌پیچ یا کریستال پیزوالکتریک متصل است که در اثر ارتعاش، جریان الکتریکی تولید می‌کند. این جریان متناسب با شدت و فرکانس موج صوتی دریافتی است و به‌عنوان سیگنال خام به واحد پردازش مرکزی ارسال می‌شود.

شکل ۲. نمونه سنسور هوابرد، سوراخ‌ها محل ورود امواج صوتی می‌باشد.

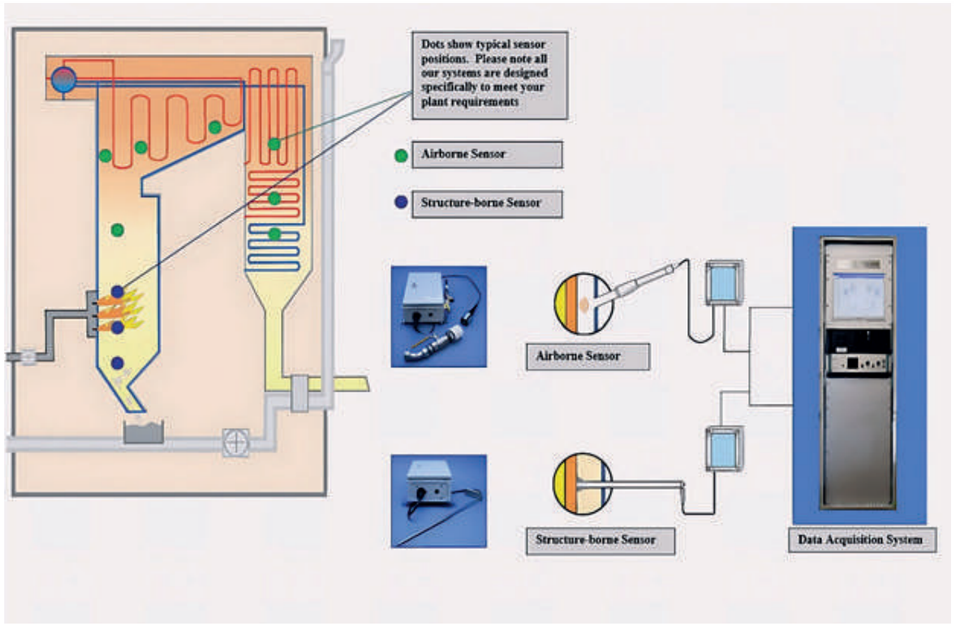


شکل ۳. تحلیل نحوه عملکرد سیستم آکوستیک. همانطور که در تصویر می‌توان دید امواج آلتراسونیک هم از طریق هوا و هم از طریق بدنه بویلر انتشار پیدا می کنند.

تکنولوژی حسگرهای آکوستیک در نشتی بخار (ASLD) Acoustic Steam Leak Detection:

سیستم تشخیص نشتی بخار آکوستیک (ASLD) بر پایه شناسایی امواج صوتی ناشی از نشتی بخار عمل می‌کند. این سیستم با دریافت و پردازش امواج صوتی، قادر است میزان نشتی بخار را تخمین زده و محل دقیق آن را مشخص کند. در روش‌های سنتی، تشخیص نشتی در لوله‌های بویلر عمدتاً از طریق شنیدن صدا و یا رویت محل نشتی توسط اپراتور انجام می‌شود. اما این روش به دلیل تأخیر در واکنش، می‌تواند منجر به آسیب‌های ثانویه گردد و ایمنی سیستم را به خطر اندازد. در مقابل، سیستم‌های تشخیص نشتی مبتنی بر رایانه از حسگرهای فشار دینامیک برای دریافت طیف‌های صوتی استفاده می‌کنند و شرایط عملیاتی واحد را تحلیل می‌نمایند.

زمانی که الگوی صوتی تغییر کند و نشتی تشخیص داده شود، سیستم به‌طور خودکار هشدارهایی را فعال کرده و محل نشتی را مشخص می‌کند. این سیستم ها عمدتا» شامل چندین حسگر است که به طور استراتژیک در اطراف بویلر و یا لوله‌های دیگ بخار، لوله‌های هدر، تنظیم‌کننده‌های فشار، گرم‌کن‌های آب تغذیه و هر جایی که بخار/هوا/آب تحت فشار وجود دارد، نصب می‌شوند و به طور مداوم دامنه گسترده‌ای از نویزها را رصد می‌کنند.



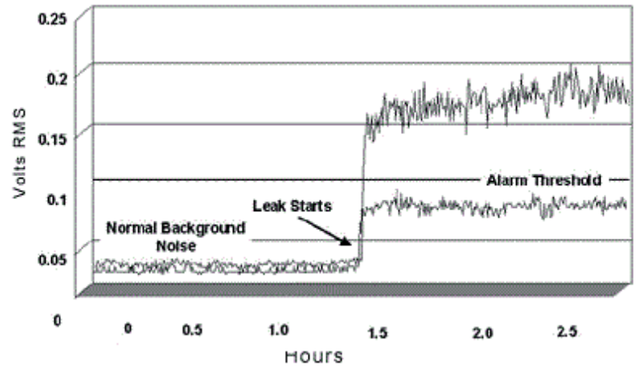
شکل ۴. در تصویر بالا دو نوع سنسور و محل قرارگیری آنها بر روی بویلر نشان داده شده است. نقاط آبی سنسورهای ساختاری می‌باشند که با توجه به قابلیت آنها در کنار مشعل نصب شده‌اند و نقاط سبز سنسورهای هوابرد می‌باشند که با استفاده از موجبر, به منظور جلوگیری از آسیب, در فاصله مشخصی از بدنه بویلر قرار گرفته‌اند.

اصل بنیادی این سیستم بر این واقعیت استوار است که بخار یا آب کنترل‌شده، هنگام عبور از یک مسیر یا شکاف، انرژی صوتی تولید می‌کند. این انرژی که حاصل از عبور سیال تحت فشار از یک ناحیه محدود است، تحت عنوان «انتشار آکوستیک» شناخته می‌شود.

انتشار آکوستیک دارای طیف وسیعی از فرکانس‌هاست (کمتر از ۱ هرتز تا بالاتر از ۱ مگاهرتز).

همچنین سیستم آکوستیک از ارتباط میان سرعت صوت و چگالی محیطی که موج صوتی در آن حرکت می‌کند بهره می‌برد. این اصل علمی بیان می‌کند که سرعت صوت با دمای محیطی که در آن منتشر می‌شود تغییر می‌کند، و بنابراین تغییرات در سرعت صوت می‌تواند به‌صورت لحظه‌ای دمای محیط را نشان دهد. این ویژگی، امکان پایش دقیق و بلادرنگ شرایط داخل بویلر را فراهم می‌سازد. که یکی دیگر از کاربردهای سیستم پایش آکوستیک می‌باشد.

شکل۵ . نمای کلی عملکرد سیستم آکوستیک برای سنسورهای هوابرد



شکل ۶. تغییرات ایجاد شده در سامانه پایش لحظه‌ای، پس از ایجاد نشتی یا شکاف در بویلر

تحلیل فرکانس‌های التراسونیک در بویلرهای صنعتی:

هنگامی که سیال از یک مجرای باریک (شکاف) تحت فشار عبور می‌کند، تولید صوت آئرودینامیکی (Aerodynamic Sound Generation) می‌کند.

اگر شکاف یک روزنه کوچک و جریان نسبتاً آرام فرض گردد، می‌توان از روابط زیر برای محاسبه سرعت خروجی سیال استفاده کرد [۷,۸].

نرخ حجمی سیال: $\dot{V} \approx C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$ سرعت خروجی سیال از شکاف: $v \approx C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$

از رابطه فرکانس استروهال استفاده می‌کنیم:

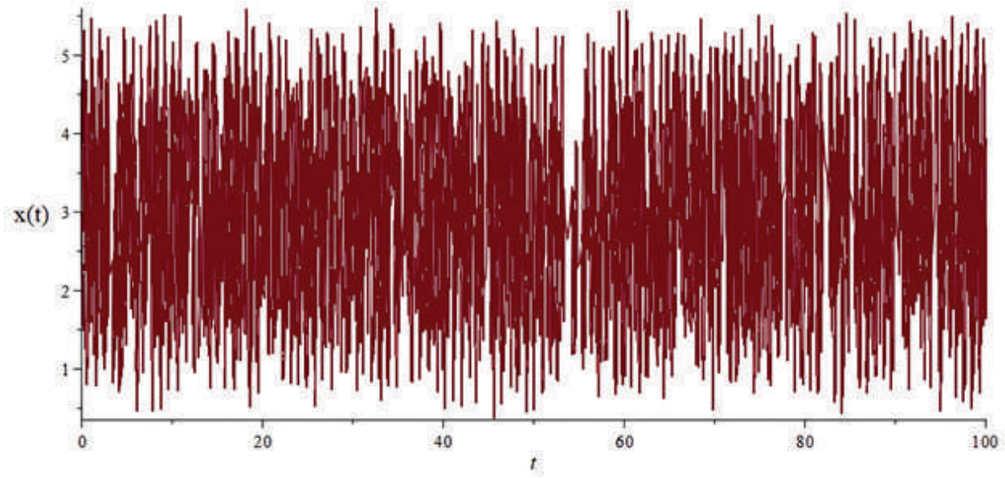
فرکانس صدا تولید شده توسط شکاف: $f = \frac{St\,,\, v}{d}$

A (m²)	Cross-sectional area of the crack
ΔP=Pin -Pout (Pa)	Pressure drop
ρ (kg/m³)	Gas/vapor density
v (m/s)	Crack exit velocity
C_d	Discharge coefficient (dimensionless, typical range 0.6–0.95)
$\dot{V}$ (m³/s)	Volumetric leak rate
St	Strouhal number (dimensionless, typical range 0.1–0.3)
f(Hz)	Frequency (Hz)

کاربرد روش FFT جهت تحلیل فرکانس‌های التراسونیک در بویلرهای صنعتی:

روش FFT (تبدیل فوریه سریع) تکنیکی است که سیگنال‌های التراسونیک را از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل می‌کند. این تبدیل امکان تحلیل دقیق فرکانس‌ها و مشخصه‌های سیگنال التراسونیک را فراهم می‌کند که در بویلرهای صنعتی برای شناسایی عیوب و کنترل کیفیت استفاده می‌شود. در بویلرها، آنالیز فرکانسی با FFT می‌تواند امواج بازتابی از ترک‌ها، خوردگی‌ها یا تغییرات ساختاری را به خوبی تشخیص دهد.

شکل زیر یک نمونه سیگنال دریافتی از سنسور می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود به دلیل وجود انواع پارازیت‌های مختلف در بازه زمانی مشخص امکان تفکیک و تجزیه و تحلیل سیگنال وجود ندارد لذا با استفاده از روش FFT سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال می‌دهیم.



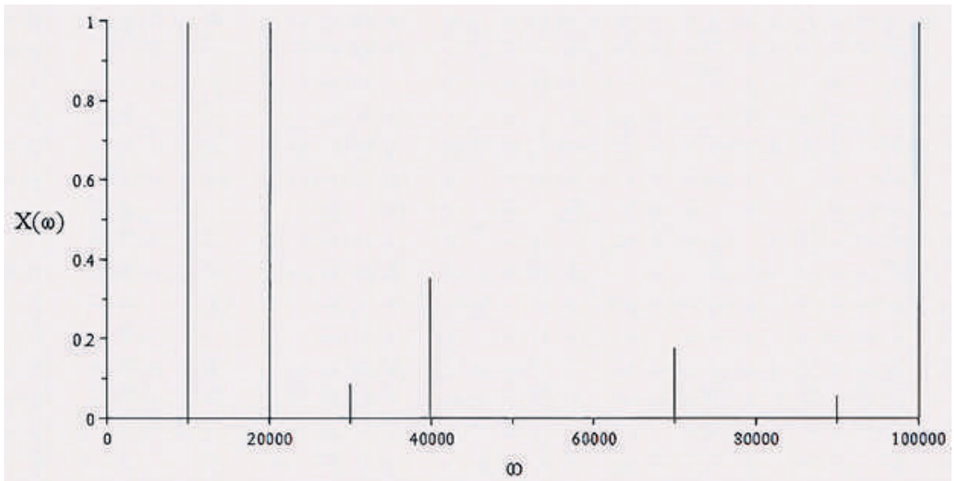
شکل ۷. سیگنال دریافتی در حوزه زمان

سیگنال نشان داده شده در شکل شماره ۷، ترکیب خطی از فرکانس‌های مختلف با دامنه‌های مختلف می‌باشد که در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$x(t) = 3 + \sin(10000t) + \left(\frac{1}{3}\right)\sin(30000t) + \left(\frac{1}{5}\right)\sin(40000t) + \frac{1}{2}\sin(70000t) + \left(\frac{1}{9}\right)\sin(90000t) + \sin(100000t) + \frac{1}{20}\sin(20000t)$$

سیگنال فوق در حوزه فرکانس در نمودار زیر نشان داده شده است. همانطور که می توان دید در این مثال، ۷ فرکانس مختلف با دامنه‌های متفاوت در این سیگنال وجود دارد.

به علت اینکه در حوزه فرکانس سیگال‌ها تفکیک شده‌اند این امکان فراهم می‌شود تا فرکانس مورد نظر (ناشی از عیب یا نشتی) به راحتی شناسایی شود و در صورت لزوم با فیلتر کردن محدوده فرکانسی مورد نظر، می‌توان سیگنال را سنتز کرده و به حوزه زمان برگرداند. و با استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری رفتار سیستم را مورد پایش دایمی قرار داد. در شکل زیر ω برابر $2\pi f$ می‌باشد که برابر فرکانس زاویه‌ای می‌باشد.



شکل ۸. نمودار سیگنال در حوزه فرکانس زاویه ای

نتایج و جمع‌بندی:

نتیجه‌گیری کلی نشان می‌دهد که بکارگیری سامانه‌های آکوستیکی در فرآیند پایش بویلرهای صنعتی، به‌خصوص در عرصه نیروگاه‌های حرارتی، مزایای فراوانی را به همراه دارد.

این فناوری به‌طور بارز سبب ارتقای سطح ایمنی می‌شود و ریسک حوادث ناخواسته را کاهش می‌دهد. همچنین، با استفاده از این سامانه‌ها، هزینه‌های نگهداری به شکل قابل توجهی پایین می‌آید و طول عمر و کارکرد بهینه تجهیزات تضمین می‌شود.

سامانه‌های آکوستیک با فراهم‌سازی داده‌های بلادرنگ و قابل اعتماد، نقش کلیدی در فرآیند تصمیم‌گیری اپراتورها ایفا می‌کنند. آنها امکان پایش مداوم وضعیت تجهیزات را فراهم می‌سازند و به‌سرعت نشانه‌های خطر را آشکار می‌کنند. بدین ترتیب، مدیریت انرژی در نیروگاه‌ها به سمت کارایی بیشتر هدایت می‌شود و اقدامات نگهداری پیشگیرانه مؤثرتر انجام می‌گردد.

منابع:

۱. N. Afgan, P.J. Coelho, M.G. Carvalho.(۱۹۹۸). Boiler tube leakage detection expert system. Applied Thermal Engineering. https://doi.org/۱۰/۱۰۱۶/S۹-۰۰۰۵۴(۹۷)۴۳۱۱-۱۳۵۹.

۲. P. Anujaa۱ , R. Babysree۲ , S. Divya Prabha۳ , D. Karthika۲۰۲۰), ۴) Acoustic Steam Leak Detection System. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).

۳. Matt Whelan, Charles E.A. Finney, Jacqueline O'Connor and Tyler Dare.(۲۰۲۲). INVESTIGATIVE APPROACH TO ADDRESS THERMOACOUSTIC VIBRATION IN GAS-FIRED HEATERS AND BOILERS. AFRC ۲۰۲۲ Industrial Combustion Symposium.

٤. JAMES J. KOVACEVICH, MICHAEL O. ROBERTSON, DARRYL P. SANDERS, AND STEVEN P. NUSPL. Recent advances in the application of acoustic leak detection to process recovery boilers. https://imisrise.tappi.org/download.aspx?key=۹۶JUN۱۴۹.

۵. Kursun, K., Ozdemir, L., & Ersoy, H. (۲۰۲۲). Performance Identification of a Steam Boiler Burner via Acoustic Analysis. Processes, ۱۲۲۳ ,(۶)۱۰. https://doi.org/۱۰/۳۳۹۰/pr۱۰۰۶۱۲۲۳.

٦. R. Saravanan , M.E.,Ap/Eee, R. Balambika , R.Chelvadharani , A. Divyadharshini , Faculty , Student .(۲۰۲۱) Acoustic Steam Leak Detection SystemInternational Journal of Scientific Research & Engineering Trends.

۷. White, Frank M. (۱۹۹۹). Fluid Mechanics (۴th ed.). McGraw Hill. ISBN ۶-۱۱۶۸۴۸-۰۷-۰.

۸. Sobey, Ian J. (۱۹۸۲). «Oscillatory flows at intermediate Strouhal number in asymmetry channels». Journal of Fluid Mechanics ۳۷۳-۳۵۹ :۱۲۵. Bibcode ۱۹۸۲JFM...۳۵۹..۱۲۵S. doi:۱۰/۱۰۱۷/S۰۰۲۲۱۱۲۰۸۲۰۰۳۳۷۱.

مروری بر فناوری‌های متمرکز انرژی خورشیدی
CSP (Concentrated Solar Power)

زهرا کلی‌وند

چکیده

فناوری انرژی خورشیدی متمرکز (CSP) یکی از فناوری‌های مهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح جهان است. بااین‌حال، این فناوری امروزه با چالش‌های متعددی مواجه است که هدف این مطالعه مرور آن‌هاست. در این مقاله، حدود ۱۴۳ پروژه CSP در سراسر جهان از نظر وضعیت، ظرفیت، نوع فناوری متمرکز، ضریب کاربری زمین، بازدهی، کشور میزبان و عوامل دیگر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

همچنین، چالش‌های پیش روی توسعه این سیستم‌ها، از جمله سیالات انتقال حرارت (HTF)، فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی (ES)، تکنیک‌های تبرید، مدیریت منابع آب و هزینه هم‌ترازی انرژی (LCOE) برجسته شده‌اند.

خواص حرارتی-فیزیکی مختلف HTF در محدوده عملیاتی CSP نیز مقایسه شده است. در پایان، فناوری‌های هیبریدی CSP با منابع انرژی تجدیدپذیر دیگر، از جمله فتوولتائیک، باد و زمین‌گرمایی، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و کشورهای پیشگام در استفاده از CSP، فناوری‌های متمرکزکننده به‌روز، فناوری مناسب ذخیره‌سازی انرژی و تکنیک‌های هیبریدی کارآمد بر اساس LCOE مشخص شده‌اند.

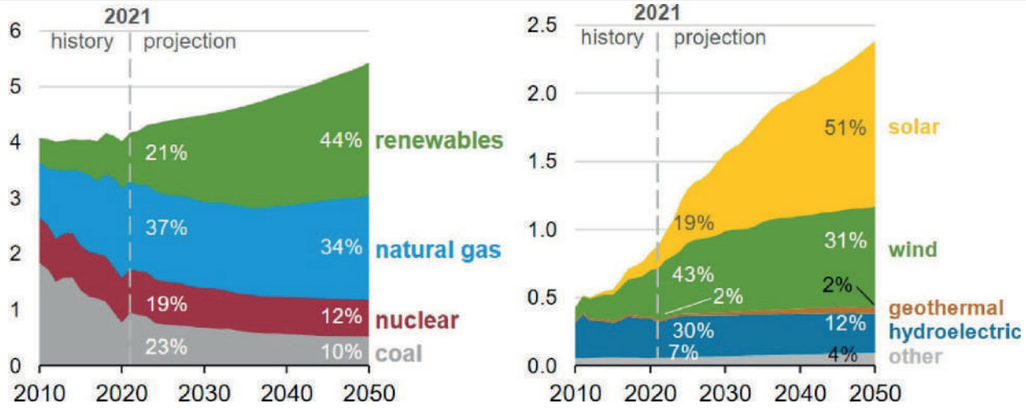
مقدمه

باوجود پیشرفت فناوری و صنعتی سازی، هنوز میلیون‌ها نفر در جهان به انرژی الکتریکی دسترسی ندارند و بسیاری از سیستم‌های تولید برق، انرژی را به دلیل هزینه‌ها ذخیره نمی‌کنند. برای پاسخ به نیاز مصرف، نیروگاه‌ها معمولاً از تجهیزات اضافی برای سوزاندن سوخت فسیلی جهت افزایش یا کاهش تولید برق بر اساس تقاضا استفاده می‌کنند؛ هرچند این روش راندمان پایینی دارد، زیرا نیروگاه‌ها در توان نامی عملکرد مؤثرتری دارند.

برای تأمین تقاضای برق، توصیه می‌شود سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر همراه با انواع مختلف سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به کار گرفته شوند.

با توجه به پیش‌بینی افزایش ۳٫۸ درصدی مصرف برق جهانی در سال ۲۰۲۵، پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ در سراسر جهان در حال نصب هستند و در نتیجه سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب تولید انرژی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است.

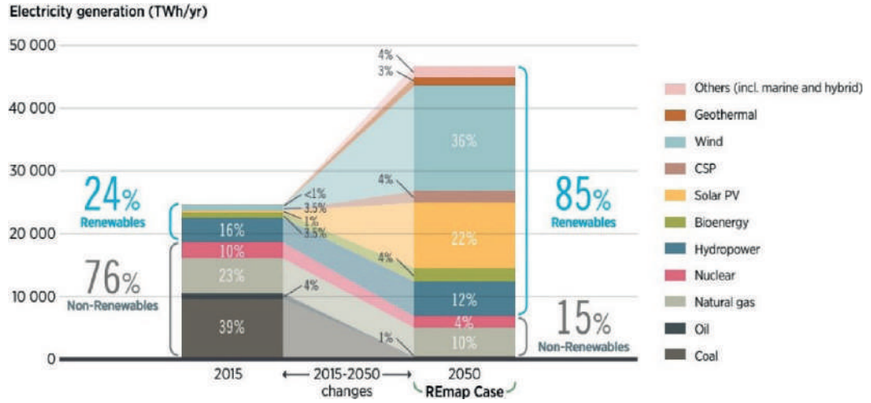
همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده، پیش‌بینی می‌شود که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق ایالات‌متحده تا پایان سال ۲۰۵۰ به ۲۳ درصد برسد. علاوه بر این، شکل ۱-ب تاریخچه و پیش‌بینی منابع انرژی تجدیدپذیر در این کشور را نشان می‌دهد.



الف) پیش‌بینی سهم ترکیب انرژی

ب) پیش‌بینی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در ایالات‌متحده

شکل ۱. پیش‌بینی ترکیب انرژی ایالات‌متحده به تریلیون کیلووات ساعت



شکل ۲. پیش‌بینی شکست تولید برق در جهان در سال ۲۰۵۰

فتوولتائیک (PV) و باد از رایج‌ترین فناوری‌های تجدیدپذیر هستند که برای تبدیل انرژی خورشیدی و باد به الکتریسیته در کاربردهایی مانند مصرف مسکونی، گلخانه‌ها، کشاورزی و نمک‌زدایی آب استفاده می‌شوند. بااین‌حال، این منابع انرژی متغیر بوده و نوسانات قابل‌توجهی در تولید برق ایجاد می‌کنند. برای غلبه بر این مشکل، محققان امکان‌سنجی افزودن سیستم‌های ذخیره انرژی به این نیروگاه‌ها را موردمطالعه قرار داده‌اند.

انرژی متمرکز خورشیدی (CSP) به‌طور خاص، فناوری امیدوارکننده‌ای برای تولید برق از انرژی خورشیدی است. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) نیز نقش حیاتی در نیروگاه‌های CSP دارد و امکان ذخیره گرمای اضافی جمع‌آوری‌شده از میدان خورشیدی و استفاده از آن در مواقع نیاز را فراهم می‌کند.

بر اساس گزارش اخیر آژانس بین‌المللی انرژی، پیش‌بینی می‌شود که با حمایت مناسب دولت‌ها، CSP تا سال ۲۰۵۰ قادر خواهد بود ۱/۳ درصد از تقاضای جهانی برق را تأمین کند، که شامل ۹/۶ درصد از انرژی خورشیدی و ۱/۷ درصد از سوخت‌های فسیلی خواهد بود.

یکی از چالش‌های کلیدی توسعه CSP در مناطق گرم و خشک، تأمین آب برای خنک‌سازی بلوک‌های برق و تمیز کردن آینه‌ها است.

علاوه بر این، محدودیت اصلی در گسترش CSP تنها به در دسترس بودن زمین مناسب محدود نمی‌شود، بلکه فاصله مکان‌های مناسب از مراکز مصرف نیز مسئله‌ای فنی و اقتصادی در زمینه انتقال برق ایجاد می‌کند.بااین‌حال، هزینه تراز شده انرژی (LCOE) نیروگاه‌های CSP طی سال‌های اخیر روند کاهش داشته و بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، در پایان سال ۲۰۲۱ به زیر ۰/۱ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت رسیده است.

شکل ۳. هزینه هم‌ترازی برق تولیدی CSP

اثربخشی نیروگاه‌های CSP عمدتاً در توانایی آن‌ها برای ذخیره مقادیر قابل‌توجهی از انرژی حرارتی نهفته است. این انرژی در طول روز توسط سیستم ذخیره انرژی حرارتی (TES) جمع‌آوری می‌شود و نیروگاه قادر است آن را برای استفاده در طول شب ذخیره کند. به‌این‌ترتیب، نیروگاه‌های CSP می‌توانند انرژی موردنیاز مصرف را به‌طور مداوم تأمین کنند، که این ویژگی، مزیت اقتصادی قابل‌توجهی نسبت به سایر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر فراهم می‌کند.

علاوه بر CSP، انرژی تولیدشده توسط منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر نیز می‌تواند با استفاده از سیستم‌های ذخیره متنوعی ازجمله خازن‌ها، سلول‌های سوختی، باتری‌ها و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، ذخیره شود.

مانند هر فناوری دیگر، CSP نیز می‌تواند اثرات مثبت و منفی بر محیط‌زیست داشته باشد. اگرچه این فناوری در گرمایش جهانی نقشی ندارد، سیستم‌های CSP در مناطقی با دسترسی محدود به آب، سازگارتر با محیط‌زیست هستند، زیرا نسبت به نیروگاه‌های سوخت فسیلی معمولی، آب کمتری مصرف می‌کنند. علاوه بر این، این سیستم‌ها برای تولید هر واحد برق، زمین کمتری نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و فتوولتائیک نیاز دارند.

بااین‌حال، استفاده از فناوری CSP می‌تواند اثرات ناخواسته‌ای نیز داشته باشد؛ به‌عنوان‌مثال، تغییر کاربری اراضی وسیع ممکن است تأثیر شدیدی بر محیط اطراف و زیستگاه حیات‌وحش بگذارد. همچنین، به‌کارگیری مواد مضر در چرخه عملیاتی، مانند سرب یا اسیدسولفوریک، در صورت دفع ناایمن می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشد. آلودگی صوتی ناشی از برخی سیستم‌ها نیز می‌تواند به حیات‌وحش آسیب برساند.

چارچوب اهداف توسعه پایدار (SDGs) به‌عنوان پاسخی به این پیامدها تدوین شده است. این چارچوب مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها را برای توسعه و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌گونه‌ای ارائه می‌دهد که دوستدار محیط‌زیست باشند. کاهش استفاده غیرضروری از زمین و حفظ زیستگاه‌های طبیعی، از اهداف اصلی این چارچوب است.

از توسعه‌دهندگان انتظار می‌رود که به جای زمین‌های اکوسیستم‌دار، از اراضی بایر استفاده کنند و ضمن کاهش یا حذف مواد بالقوه مضر، روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب را نیز به‌کار گیرند. علاوه بر این، فناوری‌های کاهش آلودگی صوتی نیز در این چارچوب حمایت می‌شوند.

۲. فن‌آوری‌های CSP، پیشرفت‌های نصب و ظرفیت‌های موجود

فناوری CSP با متمرکز کردن پرتوهای خورشیدی در یک گیرنده جذب گرما، الکتریسیته تولید می‌کند. این فناوری به‌ویژه برای مناطقی با ضریب تابش مستقیم بالا (DNI) مناسب است.

سه فناوری متداول CSP در بازار وجود دارد:

۱. سیستم‌های آینه‌های مقعر (Parabolic Trough Collector - PTC):

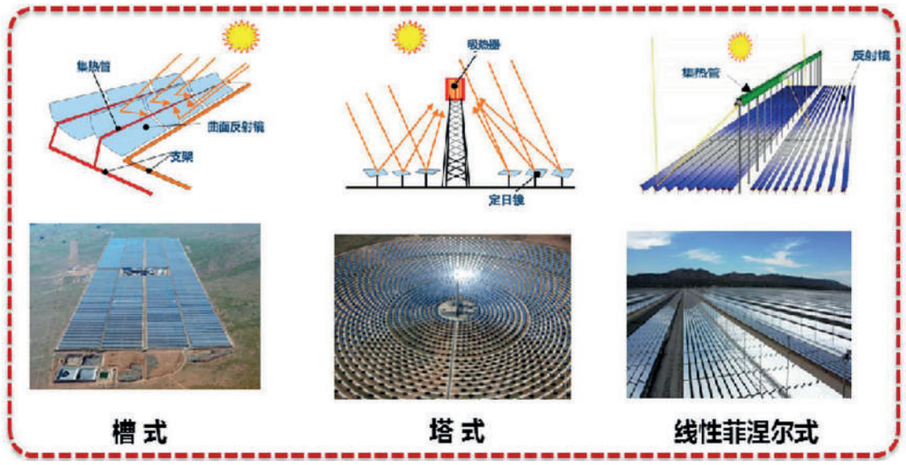
این سیستم‌ها از ردیف‌های موازی آینه‌های منحنی با بازتاب بالا تشکیل شده‌اند که طول برخی از آن‌ها به بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد. لوله‌های گیرنده (لوله‌های جاذب) از فولاد ضدزنگ ساخته شده و با پوشش انتخابی برای جذب تابش خورشیدی با طول موج کوتاه یا پرانرژی پوشیده شده‌اند. با جذب تابش خورشیدی، دمای لوله جاذب افزایش می‌یابد. در داخل این لوله‌ها معمولاً از روغن‌های حرارتی به‌عنوان سیال انتقال حرارت استفاده می‌شود تا گرما به واحدهای ذخیره انرژی و مولد بخار در چرخه رانکین منتقل شود.

۲. بازتابنده‌های فرنل خطی (Linear Fresnel Reflector - LFR):

این بازتابنده‌ها شبیه آینه‌های زاویه‌دار هستند و از ردیف‌های خطی آینه برای انعکاس پرتوهای خورشید به گیرنده‌ای ثابت و تخت استفاده می‌کنند. سیستم‌های LFR دارای طراحی گیرنده ثابت ساده هستند و هزینه سرمایه‌گذاری کمتری برای تولید بخار مستقیم دارند، اما در تبدیل انرژی خورشیدی به برق، کارایی کمتری نسبت به سیستم‌های آینه‌های مقعر دارند (شکل ۴).

۳. برج‌های خورشیدی یا گیرنده مرکزی (Central Receiver System - CRS):

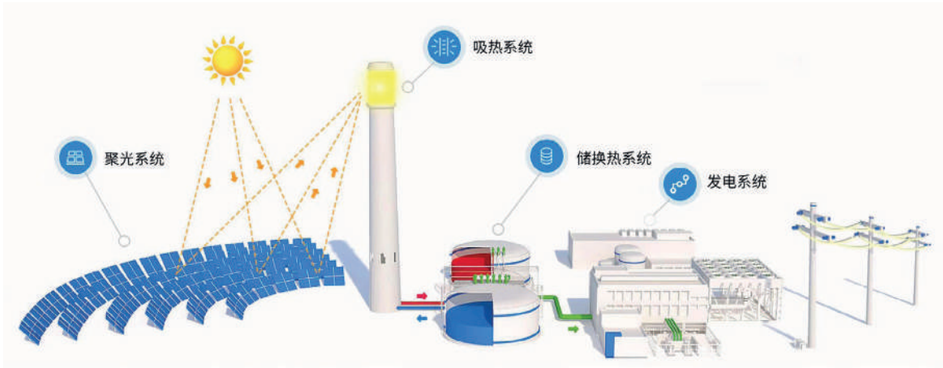
در این سیستم، هزاران هلیواستات (آینه‌های دنبال‌کننده خورشید) پرتوهای خورشید را به گیرنده‌ای مرکزی در بالای برج متمرکز می‌کنند. حرارت جمع‌آوری شده برای تولید بخار مستقیم استفاده می‌شود یا به نمک موجود در برج منتقل و مذاب می‌گردد. تمامی اجزای این سیستم حرکت خورشید را ردیابی می‌کنند تا بازدهی حرارتی به حداکثر برسد (شکل ۴).



شکل ۴. طرح شماتیک CSP

شکل ۵، طرح شماتیک یک سیستم CSP با آینه‌های متحرک و برج نمک را نشان می‌دهد. سه بخش اصلی این سیستم شامل مولد برق، ذخیره‌ساز انرژی حرارتی و بازتاب‌کننده‌های انرژی خورشیدی است. بازتابنده‌ها پرتوهای خورشید را متمرکز می‌کنند و انرژی تابشی خورشید را به گرما تبدیل می‌نمایند. این گرما سپس برای تولید بخار استفاده می‌شود و بخار تولیدشده مولد را به حرکت درمی‌آورد و برق تولید می‌کند.

در سیستم‌های بزرگ‌تر، مقادیر زیادی انرژی حرارتی قابل جمع‌آوری است که می‌توان آن را در سیستم ذخیره انرژی حرارتی (TES) ذخیره نمود و در مواقع نیاز استفاده کرد. یکی از رایج‌ترین و کم‌هزینه‌ترین فناوری‌های TES در این سیستم‌ها، استفاده از نمک مذاب است که ظرفیت بالای ذخیره انرژی و پایداری حرارتی مناسبی ارائه می‌دهد.

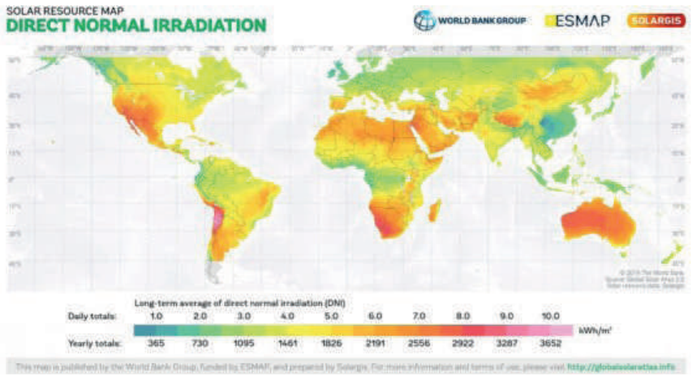


شکل ۵. طرح شماتیک آینه‌های CSP با برج نمک مذاب و ذخیره انرژی حرارتی

DNI (تابش مستقیم نرمال)، یک عامل اساسی است که بر اندازه میدان خورشیدی تأثیر می‌گذارد و باید در طراحی نیروگاه‌های CSP مورد توجه قرار گیرد. هرچه مقدار DNI بالاتر باشد، میدان خورشیدی کوچک‌تری برای تولید همان میزان انرژی لازم است و در نتیجه هزینه هم‌ترازی برق کاهش می‌یابد.

طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، توسعه‌دهندگان CSP مناطقی را با DNI سالانه بین ۱۹۰۰ تا ۲۱۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع به عنوان محدوده مناسب برای عملکرد نیروگاه انتخاب می‌کنند. در مناطقی که DNI کمتر از این محدوده باشد، معمولاً فناوری‌های دیگری مانند فتوولتائیک (PV) برای تولید برق ترجیح داده می‌شوند.

ازاین‌رو، انتخاب سایت مناسب برای طراحی نیروگاه CSP اهمیت زیادی دارد. مطابق شکل ۶، مناطقی مانند MENA، اسپانیا، آفریقای جنوبی، استرالیا و جنوب غربی ایالات‌متحده، بیشترین مقادیر DNI را دارا هستند و برای بهره‌برداری از CSP مناسب‌ترین مناطق به شمار می‌روند.



شکل ۶. نقشه تابش عادی مستقیم در سراسر جهان. (منبع: Solar Atlas)

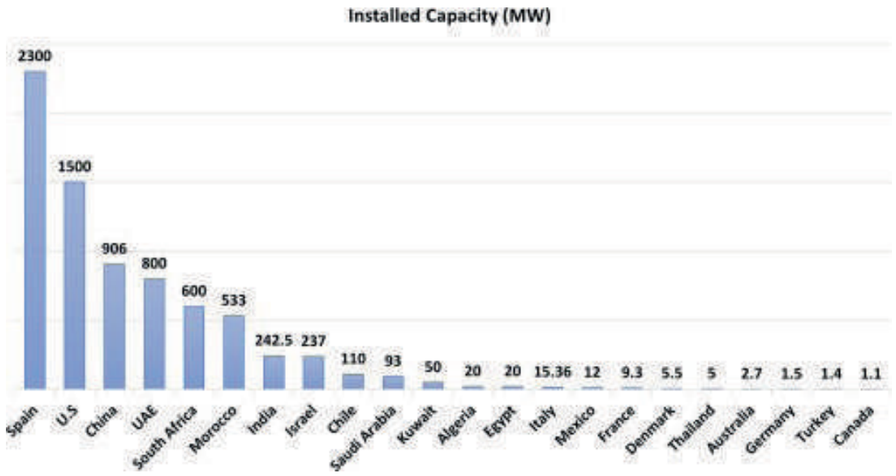
۱/۲. پروژه‌های جهانی CSP

بیش از۱۴۳ پروژه CSP در سراسر جهان مستقر شده‌اند که از این میان ۱۱۴ پروژه در حال بهره‌برداری، ۲۰ پروژه غیرعملیاتی یا از رده خارج‌شده و ۹ پروژه در دست‌ساخت هستند که پیش‌بینی می‌شود در سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ به بهره‌برداری برسند. اسپانیا، ایالات‌متحده و چین از کشورهای پیشرو در ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های CSP محسوب می‌شوند. اسپانیا با ۵۱ پروژه عملیاتی و بیش از ۲/۳ گیگاوات ظرفیت نصب شده، بالاترین ظرفیت نصب شده را دارد. در ایالات‌متحده، بیش از ۲۶ پروژه اجرا شده است، اما تنها ۱/۵ گیگاوات آن در حال بهره‌برداری است. چین نیز دارای ۵۹۶ مگاوات ظرفیت نصب شده است و چندین پروژه دیگر همچنان در دست ساخت می‌باشند.

شکل ۷ ظرفیت نصب شده CSP در هر کشور جهان، شامل نیروگاه‌های در حال ساخت، را مقایسه می‌کند. این داده‌ها بر اساس اطلاعات رسمی وب‌سایت آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر گردآوری شده‌اند.

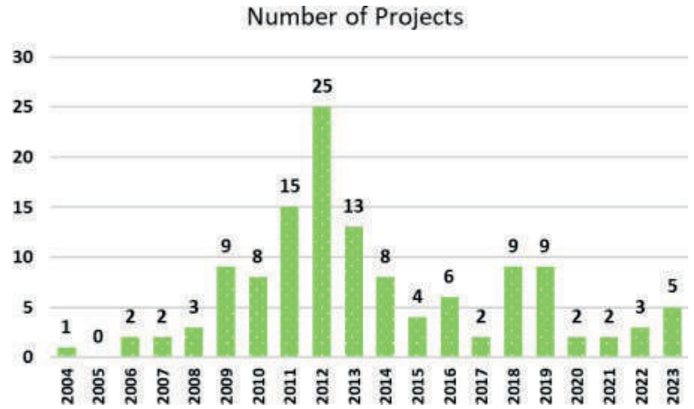
بر اساس داده‌های موجود، بیشترین فناوری مورد استفاده در پروژه‌های CSP، کلکتورهای سهموی (PTC) است که در ۹۱ پروژه به کار رفته است. پس‌ازآن، برج‌های حرارتی خورشیدی با ۳۴ پروژه و بازتابنده‌های فرنل خطی با ۱۶ پروژه قرار دارند. همچنین تنها دو پروژه بازتابنده بشقابی وجود داشته‌اند که هر دو از رده خارج‌شده‌اند. در مجموع، حدود ۷۵ درصد از ظرفیت نصب شده CSP به فناوری PTC اختصاص دارد.

علاوه بر این، فناوری بازتابنده‌های فرنل خطی بالاترین ضریب کاربری زمین را در میان فناوری‌های CSP دارد. با این‌حال، مساحت موردنیاز برای میدان خورشیدی به ازای هر ۱ مگاوات ظرفیت تقریباً ۱۱,۰۰۰ مترمربع برای سیستم‌های فرنل خطی و برج است.

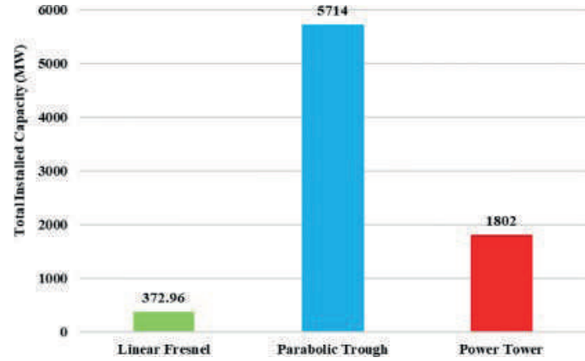


شکل ۷. توزیع جهانی ظرفیت نصب شده CSP (MW)

شـکل ۸ تعـداد پروژه‌هـای CSP تکمیل‌شـده در هـر سـال از سـال ۲۰۰۴ را نشـان می‌دهـد. همان‌طـور کـه مشـاهده می‌شـود، در سـال ۲۰۱۲ بیـش از ۲۵ پـروژه CSP نصـب شـده‌اند. در دوره همه‌گیـری کرونـا، تأثیـر بـر تکمیـل پروژه‌هـا مشـهود بـود و تنهـا حـدود ۷ پـروژه در ایـن مـدت تکمیـل شـدند.
شکل ۹ نیز کل ظرفیت نصب شده CSP را بر اساس فناوری برای ۱۴۱ نیروگاه مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸. تعداد پروژه‌های CSP نصب شده هرسال از سال ۲۰۰۴

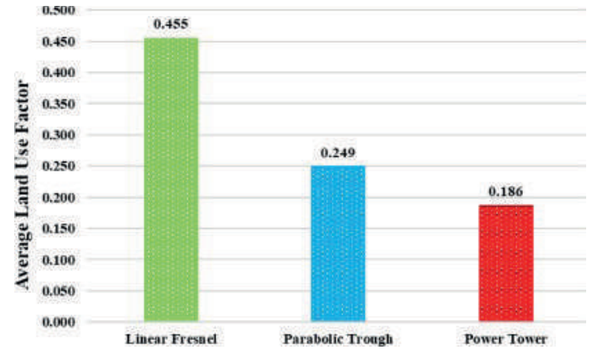


شکل ۹. مجموع ظرفیت نصب شده برای هر فناوری CSP

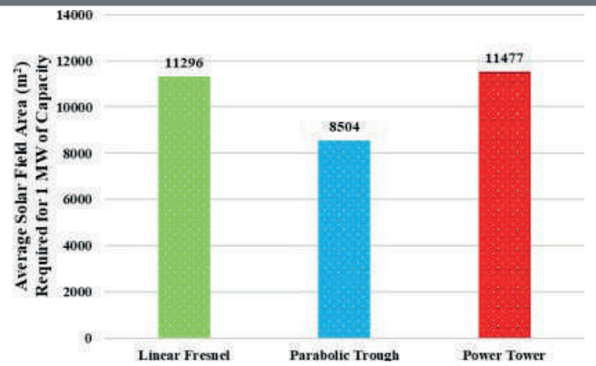
شـکل‌های ۱۰ و ۱۱ بـه ترتیـب ضریـب کاربـری زمیـن بـرای ۸۱ نیـروگاه و میانگیـن مسـاحت میـدان خورشـیدی موردنیـاز برحسـب مترمربـع بـرای هـر ۱ مـگاوات ظرفیـت در ۱۱۰ نیـروگاه را نشـان می‌دهنـد.

- کمترین ضریب کاربری زمین مربوط به گیرنده برج مرکزی با حدود ۱۸/۶٪ است.
- پس‌ازآن، سیستم آینه‌های مقعر سهموی (PTC) با ضریب حدود ۲۵٪ قرار دارد.
- بیشترین ضریب کاربری زمین مربوط به سیستم بازتابنده فرنل خطی (LFL) با حدود ۴۵/۵٪ است.

همچنیـن، نتایـج نشـان می‌دهـد کـه نیروگاه‌هـای CSP بـا آینه‌هـای مقعـر سـهموی بـرای هـر ۱ مـگاوات ظرفیـت بـه تقریبـاً ۸۵۰۴ مترمربـع زمیـن بـرای میـدان خورشـیدی نیـاز دارنـد.



شکل ۱۰. مقایسه میانگین ضریب کاربری زمین بین فناوری‌های مختلف



شکل ۱۱. میانگین میدان خورشیدی موردنیاز در مترمربع برای ۱ مگاوات ظرفیت برای هر فناوری

۲/۲. سیالات انتقال حرارت (HTF)

بـرای جمـع‌آوری گرمـا از میـدان خورشـیدی، اسـتفاده از سـیال انتقـال حـرارت (HTF) ضـروری اسـت. HTF نقـش بسـیار مهمـی در اثربخشـی و عملکـرد نیـروگاه CSP دارد. یـک نیـروگاه CSP بـرای راه‌انـدازی نیـاز بـه مقـدار قابل‌توجهـی HTF دارد، بنابرایـن کاهـش هزینه‌هـا و افزایـش بـازده HTF از اهمیـت بالایـی برخـوردار اسـت. ایـن سـیال گرمـا را بـه مولـد بـرق یـا مخـازن ذخیـره انـرژی حرارتـی (TES) منتقـل می‌کنـد و بایـد ویژگی‌هـای زیـر را دارا باشـد:

- نقطه ذوب پایین و نقطه‌جوش بالا
- پایداری حرارتی بالا
- فشار بخار کم (حدود ۱ اتمسفر در دمای بالا)
- خوردگی کم نسبت به آلیاژهای فلزی مورد استفاده
- ویسکوزیته پایین و رسانایی حرارتی بالا
- ظرفیت حرارتی مناسب برای ذخیره انرژی
- هزینه مقرون‌به‌صرفه

سـیالات مـورد اسـتفاده در فناوری‌هـای CSP شـامل هـوا، آب، نمک‌هـای مـذاب، روغن‌هـای مبتنـی بـر گلیکـول و گلیسـرول و روغن‌هـای مصنوعـی هسـتند.

- امـروزه هـوا و آب به‌نـدرت اسـتفاده می‌شـوند؛ زیـرا گرمایـش هـوا باعـث افزایـش حجـم آن و نیـاز بـه مبـدل حرارتـی بزرگ‌تـر می‌شـود کـه هزینـه سـرمایه‌گذاری را افزایـش می‌دهـد. همچنیـن، آب در دماهـای بـالا به‌سـرعت اکسـید شـده و می‌توانـد باعـث خوردگـی لوله‌هـا شـود.
- سـیالات مبتنـی بـر گلیکـول بـرای کاربردهـای بـا دمـای کمتـر از ۱۷۵ C° و مایعـات مصنوعـی بـرای دماهـای بالاتـر از۴۰۰ C° مناسـب هسـتند.
- در سیسـتم‌های تجـاری CSP، اغلـب از اکسـید بی‌فنیل/دی‌فنیـل به‌عنـوان HTF اسـتفاده می‌شـود. سـیالات ترمینـول و داوتـرم نیـز بـه صـورت تجـاری در دسـترس هسـتند.

در حـال حاضـر، هشـت نیـروگاه CSP در جهـان از اکسـید بی‌فنیل/دی‌فنیـل اسـتفاده می‌کننـد کـه همـه آن‌هـا در اسـپانیا واقـع شـده‌اند. ایـن سـیال دارای دامنـه دمایـی توصیه‌شـده بیـن ۱۲ تـا ۳۹۳ C° اسـت.

۲/۳. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) برای CSP

در حال حاضر، دو فناوری تجاری‌شده ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) در پروژه‌های CSP در سراسر جهان استفاده می‌شوند:

۱. مخازن ذخیره‌سازی نمک مذاب
۲. انباشته‌های بخار

انباشـته‌های بخـار معمـولاً بـه شـکل اسـتوانه‌ای بـا انتهـای بیضـی شـکل و از صفحـات دیـگ بخـار سـاخته می‌شـوند. یکـی از مزایـای مهـم ایـن فنـاوری ایـن اسـت کـه سـیال ذخیره‌سـازی آن آب اسـت؛ بنابرایـن نوسـانات قیمـت در محیـط ذخیره‌سـازی کـم می‌شـود. بـه دلیـل زمـان واکنـش کوتـاه و نـرخ تخلیـه بـالا، انباشـته کننده‌هـای بخـار گزینـه‌ای مناسـب بـرای جبـران گـذرا و ذخیره‌سـازی میان‌مـدت هسـتند و می‌تواننـد تقاضـا و عرضـه بـرق را در دوره‌هایـی کـه تابـش خورشـیدی محـدود اسـت، متعـادل کننـد.

۳. چالش‌های فنی و اقتصادی

نیروگاه‌هـای خورشـیدی متمرکـز (CSP) بـا چالش‌هـای فنـی و اقتصـادی متعـددی مواجـه هسـتند کـه بایـد از طریـق بهینه‌سـازی فنـاوری، سـیالات انتقـال حـرارت (HTF) و سیسـتم‌های ذخیـره انـرژی حرارتـی (TES) مدیریـت شـوند.

چالش‌های اقتصادی شامل موارد زیر هستند:

- هزینه‌های سرمایه‌ای بالا
- غیرقابل‌پیش‌بینی بودن قیمت‌ها و مسائل مالی
- کمبود یا افزایش قیمت مواد اولیه
- محدودیت در دسترسی به تجهیزات و منابع
- هزینه‌های عملیاتی

در خصوص موانع فنی و تکنولوژیکی نیز می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- تغییرپذیری منابع خورشیدی
- یکپارچه‌سازی با شبکه برق
- خوردگی و کاهش پایداری حرارتی مواد
- پیچیدگی سیستم‌ها

این محدودیت‌ها نیاز به نوآوری و سرمایه‌گذاری مداوم در فناوری CSP را برجسته می‌کنند تا هم کارایی و مقرون‌به‌صرفه بودن نیروگاه افزایش یابد و هم موانع توسعه در مقیاس بزرگ، چه از نظر تکنولوژیکی و چه اقتصادی، کاهش یابد. همچنین، حمایت‌های دولتی و چارچوب‌های نظارتی نقش مهمی در پیشبرد توسعه CSP دارند.
نوسانات منابع خورشیدی، ناشی از شرایط جوی مانند ابرها و گردوغبار، اثربخشی نیروگاه‌ها را کاهش می‌دهد. فناوری‌های TES نیز ممکن است تحت تأثیر تلفات حرارتی و پیچیدگی سیستم قرار گیرند. با توجه به طبیعت غیرقابل‌پیش‌بینی این منابع، یکپارچه‌سازی با شبکه و نگهداری منظم برای حفظ عملکرد بهینه ضروری است.

سیالات انتقال حرارت (HTF) نیز با چالش‌های خاص خود مواجه هستند:

- ماهیت خورنده و دمای بالای HTF می‌تواند طول عمر تجهیزات و مواد را کاهش دهد.
- نیاز به حمل‌ونقل و مدیریت ویژه برای ایمنی.
- بازیافت و دفع این سیالات ممکن است پرهزینه و پیچیده باشد.

علاوه بر این، راندمان سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی ممکن است تحت تأثیر تلفات حرارتی نوسان داشته باشد که باعث افزایش هزینه‌های راه‌اندازی مجدد می‌شود. سیستم‌های بزرگ‌تر، به دلیل پیچیدگی بیشتر و نیاز به تجهیزات و مواد تخصصی و ردیابی دقیق پرتو گرما، هزینه‌های ساخت، نگهداری و عملیاتی بالاتری دارند، که این موضوع به‌ویژه برای سیستم‌های مبتنی بر نمک مذاب صادق است.

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل‌های ارائه‌شده در این مطالعه، نکات و توصیه‌های زیر برای تحقیقات آینده در حوزه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی و ذخیره انرژی حرارتی (TES) حائز اهمیت هستند:

۱. بهینه‌سازی طراحی TES: طراحی سیستم‌های TES به پارامترهایی مانند ضریب تابش خورشیدی نیروگاه CSP و ظرفیت مولد برق وابسته است. بنابراین، مطالعات بهینه‌سازی برای تعیین اندازه بهینه سیستم‌های TES ضروری است تا هزینه هم‌ترازی برق (LCOE) تا حد ممکن کاهش یابد.
۲. صرفه‌جویی در مصرف آب: توسعه فناوری‌های کاهش مصرف آب برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی در نیروگاه‌های CSP اهمیت ویژه‌ای دارد. این موضوع نه‌تنها برای جوامع محلی که میزبان پروژه‌های CSP هستند حیاتی است، بلکه برای اجرای پروژه‌ها در مناطق خشک نیز ضروری است.
۳. ترکیب فناوری‌های هیبریدی: تلفیقPV، باد و CSP با استفاده از TES می‌تواند یک گزینه عملی با ضریب ظرفیت بالا و LCOE پایین باشد و این ترکیب را به انتخابی رقابتی برای کشورهایی با مقادیر بالای DNI و GHI تبدیل کند.
۴. تحقیقات در HTF و سیستم‌های ذخیره: تحقیقات بیشتر در زمینه سیالات انتقال حرارت و سیستم‌های ذخیره انرژی برای کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر حیاتی است.

مراجع:

- “Why our work matters - solar sister.” https://solarsister.org/what-we-do/why-our-work-matters/?gclid=Cj0KCQjwhY-aBhCUARIsALNIC04FNkVthgT8CYZ_6elyMB5KAWir5-ZMZCetdCOhjU9l6US2UbKsRnZcaArI8EALw_wcB (accessed Oct. ۲۰۲۲ ,۱۰).
- “Why is energy storage such an important part of the renewables mix | Greentech renewables.” https://www.greentechrenewables.com/article/why-energy-storage-such-important-part-renewables-mix (accessed Oct. ۲۰۲۲ ,۱۰).
- “Executive summary - electricity market report - July ۲۰۲۲ - analysis - IEA.” https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-july۲۰۲۲-/executive-summary (accessed Oct. ۲۰۲۲ ,۰۶).
- U. Nations, “The true costs of conventional energy | United Nations”, Accessed: Oct. ۲۰۲۲ ,۰۶. [Online]. Available: https://www.un.org/en/chronicle/article/true-costs-conventional-energy.
- E.T. Sayed, et al.
- Renewable energy and energy storage systems
- “Annual energy outlook ۲۰۲۲ - U.S. Energy Information Administration (EIA).” https://www.eia.gov/outlooks/aeo/(accessed Oct. ۲۰۲۲ ,۰۶).
- I. Renewable Energy Agency, “Global energy transformation: a roadmap to ۲۰۱۸ “,۲۰۵۰, Accessed: Oct. ۲۰۲۲ ,۰۶. [Online]. Available: www.irena.org.
- K. Obaideen, et al.
- On the contribution of solar energy to sustainable developments goals: case study on Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park
- M. Rashad, N. Khordehgah, A. Zabnienska-Gora, L. Ahmad, H. Jouhara
- The utilisation of useful ambient energy in residential dwellings to improve thermal comfort and reduce energy consumption
- A. Yano, M. Cossu
- Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies
- M.A.Z. Abidin, M.N. M.ahyuddin, M.A.A.M. Zainuri
- Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: a review
- M.A. A.bdelkareem, M. el Haj Assad, E.T. S.ayed, B. Soudan
- Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants

کارگروه بـــــازار

بررسی تاثیر سیاست‌های جهانی حفاظت از محیط زیست بر بازار صنایع حوزه نفت و گاز و فولاد

رضا براتی

چکیده

در سال‌های اخیر، افزایش نگرانی جهانی درباره تغییرات اقلیمی و آلودگی محیط‌زیست، دولت‌ها را واداشته است تا سیاست‌های زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری اعمال کنند. این سیاست‌ها شامل اعمال مالیات کربن، تعرفه‌های وارداتی سبز، استانداردهای انتشار، و الزامات گزارش‌دهی پایدار هستند که هدف‌شان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقای پایداری صنعتی است.

با وجود مزایای زیست‌محیطی، این سیاست‌ها بازار شرکت‌های صنعتی را تحت تأثیر قرار داده‌اند: برخی از صنایع در اروپا شاهد تعطیلی یا کاهش تولید بوده‌اند، در حالی که سایر مناطق با فشارهای کمتر یا حمایت مالی، عملکرد بهتری داشته‌اند. مطالعات نشان می‌دهند که سیاست‌های محیط‌زیستی قوی می‌توانند باعث نوآوری در شرکت‌ها شوند؛ این ایده مبنای «فرضیه پورتر» است که عنوان می‌کند فشار مقررات محیط‌زیستی، ممکن است هزینه‌های انطباق را جبران کرده و مزایای رقابتی ایجاد کند. در این مقاله برخی اثرات مستقیم و غیر مستقیم این سیاست ها را بر شرایط بازار صنایع بزرگ از جمله نفت و گاز و فولاد بررسی خواهیم کرد.

کلیدواژه‌ها: محیط زیست، نفت و گاز، فولاد، بازار، صنایع

مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش نگرانی جهانی درباره تغییرات اقلیمی و آلودگی محیط‌زیست، دولت‌ها را واداشته است تا سیاست‌های زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری اعمال کنند. این سیاست‌ها شامل اعمال مالیات کربن، تعرفه‌های وارداتی سبز، استانداردهای انتشار، و الزامات گزارش‌دهی پایدار هستند که هدف‌شان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقای پایداری صنعتی است. با وجود مزایای زیست‌محیطی، این سیاست‌ها بازار شرکت‌های صنعتی را تحت تأثیر قرار داده‌اند: برخی از صنایع در اروپا شاهد تعطیلی یا کاهش تولید بوده‌اند، در حالی که سایر مناطق با فشارهای کمتر یا حمایت مالی، عملکرد بهتری داشته‌اند (Fabrizi et al., ۲۰۲۴).

یک تحلیل جامع نشان می‌دهد که به‌رغم افزایش هزینه‌ها، تأثیر منفی قابل‌توجهی بر بهره‌وری بخش‌ها مشاهده نشده است؛ در سطح کلان اقتصادی، اگر مزایای زیست‌محیطی بر هزینه‌ها غلبه کند، رفاه اجتماعی افزایش می‌یابد (EPA Working Paper, ۲۰۲۴).

همچنین، سیاست‌های بازارمحور زیست‌محیطی (مانند مالیات یا سیستم‌های تجارت انتشار) می‌توانند اثرات منفی را کاهش و اثرات مثبت را تقویت کنند (OECD, ۲۰۲۴).

در سال‌های اخیر، تحول در سیاست‌های زیست‌محیطی جهانی شامل اعمال مالیات کربن، مکانیزم‌های تجارت انتشار و حمایت از فناوری‌های پاک به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. یکی از نمونه‌های بارز، اجرای سیستم قیمت‌گذاری کربن است که در برخی کشورها به کاهش قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شده است؛ طبق یک متاآنالیز، سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن بین ۵٪ تا ۲۱٪ موجب کاهش انتشار شدند. این تحولات نه‌تنها بر جنبه‌های زیست‌محیطی تأثیر گذاشته‌اند، بلکه بازار شرکت‌های صنعتی اعم از تولیدکنندگان فولاد، پتروشیمی و انرژی را نیز به‌صورت قابل‌توجهی تحت فشار قرار داده‌اند؛ برای مثال، اتحادیه اروپا گزارش داده که هزینه‌های مرتبط با اجرای مقررات زیست‌محیطی برای شرکت‌های شیمیایی سالانه بیش از ۲۰ میلیارد دلار است (Dhumal, ۲۰۲۴).

شواهد تجربی در صنایع نوظهور

در صنعت انرژی‌های نوین چین، یافته‌های تجربی نشان می‌دهد که مقررات زیست‌محیطی باعث افزایش بهره‌وری کلی عوامل تولید می‌شود و نوآوری‌های سبز به‌عنوان واسطه‌ای قدرتمند عمل می‌کنند. همچنین، اثر مثبت مقررات بر بهره‌وری بیشتر در مناطق شرقی چین قابل مشاهده است (Shan et al., ۲۰۲۵).

هزینه‌های تطبیق صنایع بزرگ بین‌المللی

تحقیقی در اروپا نشان داده است که اجرای دقیق‌تر مقررات زیست‌محیطی باعث تحمیل هزینه قابل‌توجهی بر صنایع کلیدی شده است؛ به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۲۳، شرکت‌های شیمیایی اروپایی بالغ بر ۱۰٪ از سرمایه‌گذاری‌های خود را صرف انطباق با مقررات کرده‌اند، به‌علاوه صرف ۱٫۳۲ میلیارد یورو برای خرید اعتبارات کربنی (Dhumal, ۲۰۲۴).

تحلیل سیاست‌های زیست‌محیطی جهانی

- اثرگذاری قیمت‌گذاری کربن

تحلیل اخیر نشان می‌دهد که سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، شامل مالیات کربن و سیستم‌های تجارت انتشار (ETS)، به کاهش بلندمدت انتشار دی‌اکسیدکربن منجر شده‌اند؛ کاهش تخمینی این انتشار بین ۵٪ تا ۲۱٪ است، حتی این کاهش در بازه زمانی ای که قیمت‌ها پایین بوده‌اند هم اتفاق افتاده است. گزارش سال ۲۰۲۴ بانک جهانی بیان می‌کند که اکنون ۲۴٪ از انتشار جهانی تحت پوشش ابزارهای قیمت‌گذاری مستقیم قرار گرفته و درآمد این ابزارها به بیش از ۱۰۴ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۳ رسیده است (Banaji, ۲۰۲۵).

تحلیل فایننشال تایمز (۲۰۲۵) نیز گزارش می‌دهد که اکنون ۲۸٪ از انتشار جهانی توسط قیمت‌گذاری کربن پوشش داده می‌شود و این ابزار در حال گسترش است، اما هنوز این میزان فاصله قابل توجهی با اهداف کنوانسیون پاریس دارد (Financial Times, ۲۰۲۵).

- ترکیب سیاست‌ها برای اثربخشی بهتر

مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد، ترکیب سیاست قیمت‌گذاری کربن با سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر، به‌طور متوسط باعث کاهش حدود ۶.۵٪ در انتشار می‌شود؛ در نیمی از موارد، ترکیبی از سیاست گزاری ها اثربخش‌تر بوده است (Midoes et al., ۲۰۲۳).

تأثیر سیاست‌ها بر بازار شرکت‌های صنعتی

- واکنش بازار سهام

اعلام و اجرای سیاست‌های محیط‌زیستی (مثل معرفی مالیات کربن یا استانداردهای سخت‌تر انتشار) معمولاً واکنش سریع بازار سرمایه را در پی دارد؛ مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اعلان سیاست‌های اقلیمی می‌تواند بازده سهام بخش‌های پرانتشار را در کوتاه‌مدت کاهش دهد، هرچند اندازه و جهت اثر بستگی‌دار به شدت و طراحی سیاست دارد. این یافته‌ها با نتایج بررسی‌های تجربی اخیر که واکنش قیمت سهام نسبت به سیاست‌های کربن چین و سایر کشورها را تحلیل کرده‌اند همخوانی دارد (Li et al., ۲۰۲۴).

- سودآوری و هزینه‌های انطباق

شواهد تجربی تازه نشان می‌دهد که برای شرکت‌های با نرخ انتشار کربن بالا، اجرای سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن می‌تواند به‌طور موقت سودآوری را کاهش دهد؛ برخی کارها کاهش حاشیه سود را در سال‌های اولیه اجرای سیاست ثبت کرده‌اند، به‌خصوص زمانی که قیمت کربن قابل‌توجه و پوشش سیستم وسیع باشد. اما این تأثیر توزیعی است، به گونه ای که شرکت‌های کم‌شدت و نوآور معمولاً کمتر آسیب می‌بینند یا حتی منفعت هم می‌برند (Green & Colleague, ۲۰۲۴).

- بهره‌وری و نوآوری

مطالعات ۲۰۲۴-۲۰۲۵ نشان می‌دهد که مقررات زیست‌محیطی، از طریق انگیزش سرمایه‌گذاری در نوآوری سبز و تقویت اکوسیستم نوآوری، می‌توانند TFP (بهره‌وری کل عوامل تولید) را در صنایع نوآور افزایش دهند؛ به‌ویژه در بخش‌هایی که دسترسی به فناوری و بازار مناسب فراهم است. بنابراین اثر بلندمدت بر مشروط بر وجود سیاست‌های تکمیلی و حمایت از نوآوری بهره‌وری، می‌تواند مثبت باشد (Sun et al., ۲۰۲۵).

- تجارت بین‌المللی و رقابت‌پذیری

تحقیقات سازمانی و آکادمیک ۲۰۲۳-۲۰۲۴ نشان داده‌اند که اثرات منفی بر رقابت‌پذیری و صادرات در برخی صنایع وجود دارد، اما در مجموع شواهد گسترده حاکی از این است که اثرات «فرار از سیاست هایکربنی » در بسیاری از بخش‌ها کوچک یا

قابل‌کنترل بوده‌اند؛ طراحی سیاست معافیت محور یا CBAM و سیاست‌های حمایتی تعیین‌کننده‌اند (OECD, ۲۰۲۴).

• سرمایه‌گذاری و دسترسی به تأمین مالی

سرمایه‌گذاران و بانک‌ها در واکنش به سیاست‌های اقلیمی، ریسک‌پذیری و معیارهای اعتبارسنجی خود را بازبینی کرده‌اند؛ شواهد ۲۰۲۳-۲۰۲۵ نشان می‌دهد شرکت‌هایی با برنامه‌ریزی شفاف کاهش انتشار و پروژه‌های سرمایه‌ای حوزه «انرژی سبز» از هزینه تأمین مالی پایین‌تر یا دسترسی بهتر به سرمایه برخوردار می‌شوند، در حالی که شرکت‌های آلاینده با هزینه سرمایه گذاری بالاتری مواجه شده‌اند (Metcalf et al., ۲۰۲۴).

• ناهمگونی اثرها بین صنایع و مناطق

اثر سیاست‌های زیست‌محیطی بر شرکت‌ها بسیار ناهمگن است: صنایع سنگین‌مثل فولاد و پتروشیمی تحت فشار مستقیم هزینه‌ای قرار می‌گیرند، اما صنایع فناوری‌محور یا خدمات کمتر آلودگی‌دهنده می‌توانند از فرصت‌های بازار «اقتصاد سبز» بهره ببرند. همچنین، کشورهایی با سیاست‌های انتقال درآمد و حمایت از نوآوری معمولاً اثرات منفی اقتصادی کمتری را تجربه می‌کنند (Dobbeling-Hildebrandt et al., ۲۰۲۴).

اثرات سیاست‌های زیست‌محیطی بر بازار فولاد

• وضعیت پایه و ضرورت تحول

تولید فولاد خام امروز سهم قابل‌توجهی از انتشار جهانی CO_2 دارد و روند جاری انرژی/فرآیندهای سنتی BF/BOF مبتنی بر زغال نمی‌تواند با سرعت لازم برای رسیدن به مسیرهای «Net-Zero» پاسخ دهد؛ بنابراین سیاست‌گذاران و بازارها فشار زیادی برای حرکت به سمت فناوری های پاک با انرژی سبز مانند DRI -H_2 ، CCS ، EAF و همچنین افزایش بازیابی انرژی اعمال کرده‌اند. این فشار زمینه‌ساز تغییرات ساختاری در هزینه‌ها، سرمایه‌گذاری‌ها و محل تولید خواهد شد (IEA, ۲۰۲۴).

• ابزارهای سیاستی مهم و نحوه تأثیرگذاری‌شان بر قیمت و رقابت

ابزارهایی مثل بازارهای معاملات انتشار (EU-ETS)، قیمت‌گذاری کربن و مکانیسم‌های مرزی مانند CBAM، مستقیماً هزینه تولید فولاد پرکربن را افزایش می‌دهند یا ریسک‌های ورود به بازارهای هدف را بالا می‌برند؛ در عمل این مکانیزم‌ها هم از طریق افزایش هزینه‌های متغیر (خرید حقوق انتشار/گواهی‌ها) و هم از راه تغییر انتظارات سرمایه‌گذاران و مشتریان باعث کاهش بازده انتظاری پروژه‌های سنتی و افزایش تقاضا برای «فولاد سبز» می‌شوند (ICAP, ۲۰۲۴; Taxation and Customs Union, ۲۰۲۳).

• اثر کوتاه‌مدت بر حاشیه سود و تصمیمات تولیدی

در کوتاه‌مدت، وقتی یک سیاست مثلاً افزایش پلکانی قیمت‌کربن یا الزام گزارش‌دهی تحت CBAM اعلام یا اجرا می‌شود، واحدهای فولادی با انتشار کربن بالا با دو ضربه همزمان روبرو می‌شوند:

۱) افزایش هزینه‌های عملیاتی و مستمر (سوخت، اعتبارات کربنی)

۲) فشار بر قیمت‌گذاری صادراتی به‌خاطر کاهش رقابت‌پذیری در بازارهایی که سیاست‌های مرزی دارند

نتیجه معمولاً کاهش موقت حاشیه سود و افزایش احتمال تأخیر در سرمایه‌گذاری‌های جدید یا حتی تعطیلی واحدهای کم‌بازده است (IEA, ۲۰۲۳; ICAP, ۲۰۲۴).

• سرمایه‌گذاری‌ها و مسیر فناوری هیدروژن، CCS، EAF

تحول فناوری نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین اولیه دارد: مسیرهای DRI/EAF -H_2 نصب CCS هزینه احداث بالایی دارند و برای رقابتی شدن به کاهش قیمت انرژی تجدیدپذیر و هیدروژن سبز و هم‌زمان پشتیبانی سیاسی/مالی (یارانه، صندوق‌های نوآوری) نیاز دارند. مطالعات فنی-اقتصادی و بررسی‌های واحدمحور نشان می‌دهد که در بسیاری از مناطق تبدیل کامل به DRI -H_2 تا ۲۰۳۰ پرهزینه خواهد بود؛ از آن‌سو، کشورها/شرکت‌هایی که زودتر به این فناوری‌ها دسترسی و حمایت دولتی دارند، شانس بدست آوردن مزیت رقابتی بلندمدت را خواهند داشت (Ji et al., ۲۰۲۴; Wang et al., ۲۰۲۵).

• تأثیر بر زنجیره تأمین و جابجایی مکانی تولید

وقتی هزینه تولید در یک منطقه بالا می‌رود، تولیدکنندگان ممکن است به‌سمت مناطق با انرژی ارزان‌تر یا مقررات کمتر حرکت کنند؛ اما جابجایی کامل تولید با موانع بزرگی مثل لجستیک، دسترسی به سنگ‌آهن و سرمایهٔ انسانی مواجه است. ابزارهایی مثل CBAM تلاش می‌کنند تا از « فرار از سیاست هایکربنی» جلوگیری کنند؛ بنابراین اثر خالص بر تجارت بین‌المللی به طراحی سیاست‌ها بستگی دارد (Carbon Trust, ۲۰۲۵; ICAP, ۲۰۲۴).

• پیام بازار سرمایه و ریسک مالی (هزینه سرمایه، تضییع دارایی)

سرمایه‌گذاران و بانک‌ها ریسک فناوری و نوسان درآمدی را بازنگری می‌کنند؛ پروژه‌هایی که مسیر واضح کاهش انتشار ندارند، ممکن است با هزینه سرمایه بالاتر یا دشواری در جذب اعتبار مواجه شوند و بالعکس پروژه‌های «فولاد سبز» ترجیح سرمایه‌گذارانی را که به ESG حساس‌اند جلب کنند. همچنین خطر «stranding» برای دارایی‌های سنتی فولاد در مناطقی با مقررات سخت وجود دارد (Carbon Tracker Initiative, ۲۰۲۵; IEA, ۲۰۲۴).

اثرات سیاست‌های زیست‌محیطی بر بازار نفت و گاز

• چشم‌انداز کلان تقاضا و نقش سیاست‌ها

سیاست‌های اقلیمی و فناوری (مثل نفوذ سریع‌تر خودروهای برقی، بهینه‌سازی انرژی، مقررات کارایی، و قیمت‌گذاری کربن) چشم‌انداز تقاضای نفت را دگرگون می‌کنند؛ گزارش‌های IEA نشان می‌دهند حتی با رشد اقتصادی، مسیرهای محتمل می‌توانند به «اوج تقاضا» نزدیک شوند و رشد آتی تقاضا را کند کنند این امر انتظارات بلندمدت درآمدی شرکت‌های نفتی را تغییر می‌دهد (IEA, ۲۰۲۴).

• سیاست‌های تأمین و تأثیر بر هزینه عملیاتی

در صنعت نفت و گاز، وضع مقرراتی که انتشار کربن دی اکسید، احتراق گازهای مشعل ، یا آلودگی‌های محلی را محدود می‌کنند، می‌توانند هزینه‌های عملیاتی تولید را بالا ببرند (سرمایه‌گذاری در تجهیزات کاهش انتشار، مانیتورینگ و گزارش‌دهی). کاهش شدید در انتشار کربن دی اکسید مخصوصاً برای احتراق بر پایه گاز طبیعی مهم است، چراکه بازارها و قانون‌گذاران بر این بخش تمرکز کرده‌اند؛ اجرای این مقررات ریسک عملیاتی و هزینه تولید را تغییر می‌دهد (IEA, ۲۰۲۴).

• واکنش بازارهای مالی و هزینه تأمین مالی

بانک‌ها و سرمایه‌گذاران نهادی علی‌الخصوص آنهایی که سیاست‌های net-zero یا معیارهای اعتباردهی سبز دارند در حال بازتعریف پرتفو و شرایط اعطای وام‌اند؛ شرکت‌هایی که طرح‌های شفاف برای کاهش تولید و انتشار ندارند، ممکن است با شرایط تنگ‌تر اعتباری یا هزینه سرمایه بالاتر روبه‌رو شوند؛ در عین حال، برخی بانک‌ها/نهادها در سال‌های اخیر تغییر موضع داده‌اند که این موضوع باعث نوسان انتظارات سرمایه‌گذاران شده است (Moody's, ۲۰۲۳).

• اثر بر قیمت و نوسانات کوتاه‌مدت

سیاست‌ها خود به‌تنهایی قیمت‌های جهانی نفت یا گاز را تعیین نمی‌کنند، قیمت کوتاه‌مدت همچنان حساس به عرضه، شوک‌های ژئوپلیتیک و تقاضای فصلی است اما انتظارات سیاسی (مثلاً سیگنال روشن به کاهش طولانی‌مدت تقاضا) می‌تواند موجب کاهش سرمایه‌گذاری اکتشافی/توسعه‌ای شود که در بلندمدت اثر کاهشی بر عرضه و در نتیجه افزایش نوسانات و گاهی افزایش قیمت می‌گذارد؛ بنابراین سیاست‌ها ممکن است ترکیبی از فشار تقاضا و محدودیت عرضه را همزمان تولید کنند (IEA, ۲۰۲۴).

• نقش فناوری‌های جبران‌کننده (CCS، هیدروژن، و سوخت‌های کم‌کربن)

شرکت‌های نفت و گاز که بتوانند به‌عنوان عرضه‌کننده راهکارهای کاهنده (مثل CCS، تولید هیدروژن آبی/سبز، یا سوخت‌های کم‌کربن) خود را بازتعریف کنند، ممکن است ریسک کاهش درآمد را کاهش داده و بازارهای جدیدی به‌دست آورند؛ اما فناوری‌های CCS و هیدروژن نیز هزینه سرمایه گذاری بالایی دارند و دارای ریسک تجاری‌اند و نیاز به چارچوب‌های سیاستی و مشوق‌های مالی دارند (IEA, ۲۰۲۴).

• جزئیات مالی تأثیر سیاست‌های زیست‌محیطی بر بازار نفت و گاز

۱. **کاهش ارزش بازار شرکت‌ها و تغییرات در سرمایه‌گذاری:** مطالعات بازار مالی در سال ۲۰۲۳ نشان داده‌اند که شرکت‌های بزرگ نفت و گاز که از سیاست‌های سختگیرانه‌تر اقلیمی تأثیر بیشتری می‌پذیرند، به‌طور متوسط ۱۵-۲۵ درصد کاهش ارزش بازار را نسبت به دوره‌های قبل تجربه کرده‌اند (Carbon Tracker Initiative, ۲۰۲۳; Bloomberg, ۲۰۲۴).

۲. **هزینه‌های انطباق و مالیات کربن:** هزینه‌های انطباق با سیاست‌های کاهش انتشار، به ویژه در مناطقی که مالیات کربن یا سیستم‌های تجارت انتشار (ETS) اجرا شده‌اند، بین ۲ تا ۱۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی شرکت‌های نفت و گاز را شامل می‌شود؛ شرکت‌های اروپایی به طور متوسط در سال ۲۰۲۳ بیش از ۱/۵ میلیارد یورو هزینه صرف خرید اعتبار کربن و اجرای فناوری‌های کاهش انتشار کردند که حدود ۷ درصد از هزینه عملیاتی‌شان بود (IEA, ۲۰۲۴).

۳. **تأثیر بر جریان نقدی و پروژه‌های توسعه‌ای:** افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی منجر به کاهش جریان نقدی آزاد بین ۱۰ تا ۱۸ درصد در دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۴ شده است که این موضوع کاهش سرمایه‌گذاری در پروژه‌های توسعه‌ای به ویژه پروژه‌های پرهزینه آفشور را در پی داشته است (Wood Mackenzie, ۲۰۲۴).

٤. **تغییر در هزینه تأمین مالی و ریسک اعتباری:** شرکت‌های با شدت بالای انتشار، هزینه تامین مالی بین‌المللی ۱۰۰ تا

۲۰۰ واحد پایه (bps) بیشتر از شرکت‌های با برنامه‌های کاهش انتشار داشته‌اند و فشارهای ESG باعث افزایش هزینه سرمایه سهام تا ۲ درصد شده است (Moody's, ۲۰۲۳).

۵. **اثر سیاست‌های کاهش انتشار متان بر هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری:** کاهش انتشار متان نیازمند سرمایه‌گذاری سنگین در تجهیزات پایش و کاهش نشت است و هزینه‌های عملیاتی ناشی از اجرای استانداردهای جدید کاهش متان به‌طور میانگین ۳ تا ۶ درصد هزینه کل تولید را افزایش داده است (IEA, ۲۰۲۴).

فهرست منابع:

۱) Bloomberg. (۲۰۲۴). Investor pressure mounts on North American oil and gas companies over climate risks. Bloomberg Terminal.

۲) Carbon Tracker Initiative. (۲۰۲۳). Absolute Impact ۲۰۲۳: Progress on oil and gas emissions targets has stalled. https://carbontracker.org/reports/absolute-impact۲۰۲۳-/

۳) Carbon Trust. (۲۰۲۵, January ۱۵). CBAM: What it means for exporters of steel, iron and aluminium. https://www.carbontrust.com/news-and-insights/insights/cbam-what-it-means-for-exporters-of-steel-iron-and-aluminium

۴) Dobbeling-Hildebrandt, N., et al. (۲۰۲۴). Systematic review and meta-analysis of ex-post evaluations on the effectiveness of carbon pricing. Nature Communications. https://doi.org/۱۰/۱۰۳۸/s-۰۲۴-۴۱۴۶۷XXXX-X

۵) Fabrizi, A., Gentile, M., Guarini, G., et al. (۲۰۲۴). The impact of environmental regulation on innovation and international competitiveness. Journal of Evolutionary Economics, ۲۰۴-۱۶۹ ,۳۴. https://doi.org/۱۰/۱۰۰۷/s-۰۲۴-۰۰۱۹۱-۰۰۸۵۲y

۶) Green, J., & Colleague. (۲۰۲۴). The impact of carbon policies on firm profitability. abfer.org. https://www.abfer.org

۷) ICAP (International Carbon Action Partnership). (۲۰۲۴). EU Emissions Trading System (EU ETS). https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets

۸) IEA (International Energy Agency). (۲۰۲۳). Breakthrough Agenda Report - Steel. IEA.

۹) IEA (International Energy Agency). (۲۰۲۴). Global Methane Tracker ۲۰۲۴ - Understanding methane emissions. https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker۲۰۲۴-/understanding-methane-emissions

۱۰) IEA (International Energy Agency). (۲۰۲۴). Iron & steel. IEA. https://www.iea.org/energy-system/industry/steel

۱۱) IEA (International Energy Agency). (۲۰۲۴). World Energy Outlook ۲۰۲۴. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook۲۰۲۴-

۱۲) Ji, Y., Chi, Z., Yuan, S., Chen, Y., Li, Y., Jiang, T., Liu, X., & Zhang, W. (۲۰۲۴). Development and Application of Hydrogen-Based Direct Reduction Iron Process. Processes, ۱۸۲۹ ,(۹)۱۲. https://doi.org/۱۰/۳۳۹۰/pr۱۲۰۹۱۸۲۹

۱۳) Li, X., et al. (۲۰۲۴). Short-term stock market reactions to climate policies. Journal of Financial Economics. https://doi.org/۱۰/۱۰۱۶/j.jfineco.۲۰۲۴.XX

۱۴) Metcalf, G., et al. (۲۰۲۴). The impact of environmental policies on investment and firm finance. PMCENGIE Impact. https://www.pmce.org

۱۵) Moody's Investors Service. (۲۰۲۳). Climate risk and credit rating implications for oil and gas. Moody's Analytics.

۱۶) Sun, X., Y. Innovation, & Competitiveness. (۲۰۲۵). The impact of environmental regulation on innovation and international competitiveness. Journal of Evolutionary Economics, ۲۰۴-۱۶۹ ,۳۴. SpringerLink. https://doi.org/۱۰/۱۰۰۷/s-۰۰۸۵۲-۰۲۴-۰۰۱۹۱y

۱۷) Taxation and Customs Union (European Commission). (۲۰۲۳). Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en

۱۸) Wang, Y., Chen, C., Tao, Y., … & Wen, Z. (۲۰۲۵). Uneven renewable energy supply constrains the decarbonization effects of excessively deployed hydrogen-based DRI technology. Nature Communications, ۱۶, Article ۴۹۱۶. https://www.nature.com/articles/s۱-۵۹۷۳۰-۰۲۵-۴۱۴۶۷

۱۹) Wood Mackenzie. (۲۰۲۴). Oil and Gas Capital Expenditure Trends and Impacts Report ۲۰۲۴. Wood Mackenzie.

استراتژی برندسازی بین‌المللی بر اساس مطالعه موردی یک شرکت بازار نوظهور

محسن پریمی

چکیده

هدف این مطالعه، کشف و مفهوم‌سازی فرآیند توسعه یک برند بین‌المللی موفق توسط یک شرکت بازار نوظهور است.

یک رویکرد کیفی مطالعه موردی در این پژوهش به کار گرفته شد. دو مرحله جمع‌آوری داده انجام گرفت. منابع داده شامل موارد آرشیوی، مصاحبه و یادداشت‌های میدانی است. در مجموع ۱۳ مصاحبه عمیق انجام شد. مصاحبه‌شوندگان از بخش‌های وظیفه‌ای مختلف و شامل مدیران ارشد تا کارمندان سطح پایین‌تر بودند. داده‌های جمع‌آوری شده در فرآیند تکراری تحلیل شدند، و موضوعات نوظهور از مطالعه موردی، اساس مفهوم‌سازی استراتژی را شکل دادند.

یک فرآیند مؤثر برندسازی بین‌المللی را می‌توان به صورت چهار گام استراتژیک متوالی مفهوم‌سازی کرد:

۱) ایجاد یک نام تجاری فراملی (transcultural).
۲) شناسایی یک جذابیت جهانی برای محصولات.
۳) توسعه یک جوهره برند جهانی.
۴) انتقال جوهره برند از طریق محصولات.

همچنین یافته‌های مطالعه موردی نشان می‌دهد که توانایی ترکیب (fuse) سه جفت عنصر به ظاهر متضاد در سراسر مرزهای جغرافیایی و زمانی، در فرآیند استراتژیک ضروری است. این سه جفت عنصر عبارتند از: فرهنگ‌های غربی و شرقی، عناصر تاریخی و مدرن، و صنایع دستی و تولید انبوه.

این مقاله از جزئیات کیفی غنی است، اما مانند هر تحقیق مطالعه موردی منفرد، محدودیت‌های آن به قابلیت کاربرد در سایر زمینه‌ها مربوط می‌شود. این قابلیت کاربرد ممکن است تحت تأثیر ویژگی‌های خاص شرکت مورد مطالعه و همچنین تفاوت بین صنایع و محصولات قرار گیرد.

این یافته‌ها بینشی در مورد چگونگی ایجاد برند بین‌المللی توسط یک شرکت در بازار نوظهور به شکلی سریع‌تر و مؤثرتر ارائه می‌دهد. فرآیند برندسازی بین‌المللی شناسایی شده، پیامدهای مدیریتی برای بازاریابان بین‌المللی در شرکت‌های بازار نوظهور و غیر نوظهور دارد.

این مطالعه خلا موجود در تحقیقات استراتژی برندسازی بین‌المللی شرکت‌های بازار نوظهور را پر می‌کند. مفهوم‌سازی یک برندسازی بین‌المللی، مبنایی برای تحقیقات بیشتر در مورد چگونگی ایجاد مؤثر یک برند بین‌المللی فراهم می‌کند.

مقدمه

برندهای بین‌المللی دیگر منحصراً در اختیار تولیدکنندگان کشورهای توسعه‌یافته نیستند. شکوفایی برندهای بین‌المللی بازار نوظهور در سال‌های اخیر، که تا حدی ناشی از ظهور شرکت‌های چندملیتی بازار نوظهور است، این سنت را که برندهای اقتصادهای توسعه‌یافته در سطح جهان غالب هستند، بر هم زده است. اگرچه بازار بین‌المللی از نظر تنوع فرهنگی و اجتماعی چالش‌های بسیار بیشتری نسبت به بازارهای داخلی دارد، برندهای بین‌المللی جدید اکنون به شدت با همتایان اقتصادهای توسعه‌یافته رقابت می‌کنند و پیچیدگی رقابت جهانی را افزایش می‌دهند.

اکثر شرکت‌های بازار نوظهور فاقد تجربه بین‌المللی و منابع رقبای بازار توسعه‌یافته خود هستند؛ با این حال، موفقیت آن‌ها در برندسازی بین‌المللی توجه گسترده دانشگاهیان و متخصصان را به خود جلب کرده است.

شرکت‌های بازار نوظهور برندهای خود را به دو روش اصلی بین‌المللی کرده‌اند:

۱. توسعه و ساخت دقیق برندهای خود؛ مانند شرکت کره‌ای تولیدکننده لوازم الکترونیکی مصرفی سامسونگ.
۲. خرید شرکت‌های مستقری که از قبل پایگاه مشتری جهانی دارند؛ مانند کاری که شرکت کامپیوتری چینی لنوو با خرید بخش کامپیوتر شخصی شرکت IBM انجام داد.

از این دو روش، روش اول دشوارتر و زمان‌برتر است و بنابراین علاقه بیشتری را برای تحقیق برانگیخته است.
استراتژی برندسازی بین‌المللی هنوز در مراحل اولیه خود است زیرا معمولاً در چارچوب جریان تحقیقاتی استراتژی بازاریابی استانداردسازی/انطباق مورد بحث قرار گرفته است. اخیراً، محققان با شناسایی استراتژی برندسازی بین‌المللی به عنوان یک جریان تحقیقاتی متمایز، به دلیل نقش برجسته‌اش در رقابت جهانی، آن را از استراتژی بازاریابی بین‌المللی جدا کرده‌اند.
تحقیقات در زمینه استراتژی برندسازی بین‌المللی عمدتاً بر اساس برندهای اقتصادهای توسعه‌یافته بوده است، و مطالعات کمی به طور سیستماتیک استراتژی برندسازی بین‌المللی شرکت‌های بازار نوظهور را بررسی کرده‌اند. این مطالعه برای کاهش این شکاف دانشی، فرآیند توسعه یک برند بین‌المللی موفق توسط یک شرکت بازار نوظهور را کاوش می‌کند.
فرآیند استراتژی چهار مرحله‌ای شناسایی شده و نیروی اساسی آن یعنی توانایی ترکیب (fusion ability)، پیامدهایی برای بازاریابان بین‌المللی در هر دو نوع شرکت‌های بازار نوظهور و غیر نوظهور دارد.

زمینه نظری

استراتژی برندسازی بین‌المللی

استراتژی برندسازی بین‌المللی به طور سنتی در جریان تحقیقاتی استراتژی بازاریابی بین‌المللی، به ویژه استراتژی استانداردسازی/انطباق، گنجانده شده است. با این حال، پیشرفت در تحقیقات برندسازی بین‌المللی کُند باقی مانده است.
وایت‌لاک و فاستوسو (۲۰۰۷) با انجام یک بررسی جامع، برندسازی بین‌المللی را به این صورت تعریف کردند:
«قلمرویی در بازاریابی بین‌المللی که به چالش‌هایی می‌پردازد که شرکت‌ها هنگام عبور برندهایشان از مرزهای ملی با آن مواجه می‌شوند. این چالش‌ها به جوهره برند از نظر نام برند، عناصر بصری (مانند لوگو، رنگ‌ها) و صوتی برند (مانند موسیقی متن، صدای تبلیغ)، و شخصیت برند مربوط می‌شوند.»
این دیدگاه فرآیندمحور برندسازی بین‌المللی، چارچوب د چرناتونی و همکارانش (۱۹۹۵) را تکرار می‌کند که استدلال می‌کند تصمیم‌گیری در مورد جوهره برند و اجرای استراتژی برندسازی دو فرآیند مهم در برندسازی بین‌المللی هستند.

بخش‌بندی و جایگاه‌یابی جهانی (Global Segmentation and Positioning)

وینـد و داگلاس (۱۹۷۲) دو فرآیند اصلی بخش‌بندی جهانی را پیشنهاد می‌کنند: بخش «ماکرو» (کشورها به عنوان بخش) و بخش «میکرو» (مشتری به عنوان بخش).
با تسریع جهانی شدن بازار و همگنی مصرف‌کننده، بسیاری از محققان پیشنهاد می‌کنند که بازار جهانی بر اساس شباهت بین مصرف‌کنندگان، صرف نظر از ملیت و مرزها، بخش‌بندی شود. این شباهت در نیازهای مشتری، بخش‌های افقی ایجاد می‌کند که از مرزهای کشورها می‌گذرند.
بنابراین، یک چالش اصلی برای بازاریابان بین‌المللی این است که بخش‌های بازار افقی را که مشتریان را با نیازها و خواسته‌های مشابه در سراسر مرزها گروه‌بندی می‌کنند، شناسایی کرده و محصولات خود را با ویژگی‌ها و مزایایی جایگاه‌یابی کنند که جذابیت جهانی داشته باشند.
اگرچه شناسایی یک جذابیت جهانی برای محصولات در میان مشتریان، در استراتژی جایگاه‌یابی جهانی امری محوری است، اما مطالعات کمی مستقیماً فرآیند جایگاه‌یابی جهانی را بررسی کرده‌اند.

شرکت و برند مورد مطالعه

FRANZ یک برند چینی‌آلات (ظروف چینی) است که در سال ۲۰۰۲ راه‌اندازی شد. این برند توسط Seagull Decor، یک شرکت تایوانی تولیدکننده تجهیزات اصلی/تولیدکننده طرح اصلی (OEM/ODM)، تأسیس شد.
به طور قابل توجهی، این برند جوان در سال راه‌اندازی خود برنده «بهترین جایزه در ظروف هدیه» در نمایشگاه بین‌المللی هدایای نیویورک شد، و موفقیت اولیه آن Seagull را وادار کرد تا شرکت جدیدی به نام Franz Collection, Inc را تأسیس کند تا کاملاً وقف توسعه این برند شود.

- مرکز طراحی و تحقیق شرکت جدید در تایوان است و تولید در چین انجام می‌شود.
- تا سال ۲۰۰۹، محصولات با برند FRANZ از طریق بیش از ۶۰۰۰ فروشگاه خرده‌فروشی در سراسر ایالات متحده آمریکا، اروپا، استرالیا، ژاپن و چین فروخته می‌شدند.
- فروش FRANZ به شدت در حال افزایش بوده است، از ۵۰۰,۰۰۰ دلار آمریکا در نیمه اول سال تأسیس به ۱۸ میلیون دلار آمریکا در سال ۲۰۰۷ رسید.
- این برند بین‌المللی جدید حتی در طول آشفتگی مالی ۲۰۰۸ نیز رشد فروش دو رقمی را تجربه کرد.

فرآیند تدوین استراتژی برندسازی بین‌المللی

آماده‌سازی مسیر برای یک برند بین‌المللی

شرکت مادر FRANZ، یعنی Seagull، بیش از ۳۰ سال در تجارت هدایای OEM/ODM فعال بوده است. با این حال، تغییرات در فضای رقابتی، از جمله افزایش هزینه نیروی کار در تایوان و جذابیت حاشیه سود بالا در بازار برندهای اختصاصی، و مهم‌تر از همه، جاه‌طلبی مالک برای ساخت یک برند ظروف چینی مشهور بین‌المللی، Seagull را بر آن داشت تا استراتژی خود را تغییر داده و بر تجارت برند اختصاصی (own-brand) تمرکز کند.
Seagull علی‌رغم تجربه ۳۰ ساله در صنعت ظروف هدیه، هرگز مستقیماً با بازار مصرف‌کننده نهایی بین‌المللی تعامل نداشته است. با توجه به مقیاس و منابع کوچک‌ترش نسبت به بازیگران مشهور جهانی (مانند وِجوود، رویال کپنهاگ)، این شرکت تصمیم گرفت تا استراتژی جایگاه‌یابی (niche) جهانی را اتخاذ کند.
Seagull با تاکید بر کیفیت برتر و خدمات به عنوان عوامل کلیدی موفقیتش در تجارت OEM/ODM، تصمیم گرفت خود را به عنوان یک برند لوکس (high-end) جایگاه‌یابی کند.
برند جدید، مشتریان بین‌المللی که برای کیفیت ارزش قائل بودند را هدف قرار داد.

استراتژی برندسازی بین‌المللی

استراتژی برندسازی بین‌المللی Seagull شامل یک فرآیند چهار مرحله‌ای متوالی بود:

۱. ایجاد یک نام تجاری فراملی:

- لوگوی FRANZ از سه جزء تشکیل شده است:
  - مرغ دریایی در حال پرواز: نماینده شرکت مادر (Seagull Group)، و مرتبط با مختصر بودن و آزادی (برگرفته از رمان مشهور «جاناتان مرغ دریایی» ریچارد باخ)، که به مصرف‌کنندگان بین‌المللی کمک می‌کند جاه‌طلبی FRANZ برای ورود به بازار جهانی را درک کنند.
  - FRANZ: برگرفته از نام انگلیسی بنیانگذار، لی-هنگ چن (Francis Chen). این نام اغلب به عنوان نام امپراتوران و اشراف در کشورهای اروپایی به کار رفته است. استفاده از چنین نام اشرافی، محصولات برند را با سلیقه بالا و کیفیت نفیس پیوند می‌دهد، زیرا برندهای لوکس ظروف چینی اغلب با خانواده‌های سلطنتی مرتبط بوده‌اند.
  - مهر قرمز کاراکتر چینی «Chen»: نه تنها نام خانوادگی بنیانگذار است، بلکه نمادی از منشأ چینی ظروف چینی نیز می‌باشد.
- کنار هم قرار دادن «Chen» و «Franz» یک جلوه بصری متمایز ایجاد می‌کند که به مشتریان اطلاع می‌دهد این برند جایی است که فرهنگ‌های شرق و غرب به هم می‌رسند. این ترکیب نقاط مرجع فرهنگی مختلف به FRANZ اجازه می‌دهد تا جذابیت فراملی ایجاد کند.

۲. شناسایی یک جذابیت جهانی (Identifying a universal brand theme):

- Seagull با ترکیب جوهره‌های فرهنگی غربی و شرقی، تم برند را توسعه داد.
- از یک سو، به طور طبیعی عناصر فرهنگی شرقی مانند کنفوسیوس‌گرایی، تائوئیسم و بودیسم را در محصولات خود گنجاند. به طور خاص، حکمت سنتی چینی «هماهنگی بین انسان و طبیعت» نقش مهمی در تم برند FRANZ ایفا کرده است.
- از سوی دیگر، سال‌ها تعامل OEM/ODM با مشتریان غربی، دانش فراوانی در مورد محدوده ترجیحات مصرف‌کننده غربی و تنوع فرهنگی به Seagull داد و پتانسیل سوءتفسیر فرهنگی را به حداقل رساند.
- Seagull همچنین یک پایگاه داده از محصولات محبوب و غیرمحبوب تولید شده برای مشتریان OEM/ODM گذشته نگهداری می‌کند، که اطلاعات ارزشمندی در مورد دلایل موفقیت یا شکست محصولات در بازارهای بین‌المللی ارائه می‌دهد.
- پس از بررسی دقیق، برند FRANZ سرانجام دو تم طبیعت و انسانیت را که بیش از همه توسط مشتریان در سراسر مرزها پذیرفته شده‌اند، استخراج کرد.
- محصولات FRANZ همیشه یک تم طبیعی دارند و عناصری را از طبیعت ترسیم می‌کنند.

۳. توسعه جوهره برند جهانی (Developing global brand essence):

- برای ساخت یک برند ماندگار، Seagull به میراث‌های هنری و صنایع دستی تاریخی شرق و غرب روی آورد تا

جذابیت خود را در طول نسل‌ها حفظ کند.

- رئیس جمهور چن تیم طراحی را رهبری کرد تا با بازدید از موزه‌ها و گالری‌های هنری اروپا، زیبایی‌شناسی غربی را درک کنند و همچنین مجموعه‌های چینی‌آلات باستانی چینی در موزه کاخ ملی تایپه را بررسی کردند.
- این تلاش‌ها به FRANZ منجر شد تا سبک کلاسیک آرت نوو (Art Nouveau) را بپذیرد، سبکی که اغلب نقوش گل و گیاه را در بر می‌گیرد و تم برند FRANZ را تقویت می‌کند.
- با این حال، تیم برندسازی با هدف «احیای صنایع دستی چینی‌آلات چین» دریافتند که تولیدکنندگان چینی در تکرار طرح‌های باستانی گرفتار شده و نوآوری ندارند و برای مشتریان امروزی جذاب نیستند.
- این امر نیاز به معرفی و ترکیب عناصر مدرن و نوآوری‌ها در برند جدید FRANZ را برای ایجاد جذابیت ماندگار برای نسل‌های قدیم و جدید برجسته کرد.
- در نتیجه، عناصر شیک معاصر مانند سبک‌ها و رنگ‌های محبوب عمداً در طرح‌های FRANZ گنجانده می‌شوند.
- این ترکیب میراث تاریخی و عناصر مدرن، محصول FRANZ را برای مشتریان نسل قدیم و جدید جذاب کرد.
- بر اساس جذابیت فراقومی و فرا نسلی کشف شده توسط Seagull، شرکت پنج عنصر متمایز را برای شکل دادن به جوهره جهانی FRANZ توسعه داد : منحصر به فرد (unique)، جذاب (inviting)، شیک (stylish)، انسان‌گرا (humanistic) و هنری (artistic). این جوهره برند، طراحی محصول FRANZ را هدایت می‌کند و بر پیامی که برند می‌خواهد به مشتریان بین‌المللی منتقل کند، غالب است.

۴. انتقال جوهره برند از طریق محصولات (Conveying brand essence through products):

- استراتژی Seagull ارائه محصولات با کیفیت نفیس (که شامل پنج عنصر جوهره برند است) و در عین حال با قیمتی نسبتاً مقرون‌به‌صرفه بوده است.
- تولید طرح‌های بسیار سبک، روان و منحنی آرت نوو، و همچنین استفاده زیاد از فیگورهای زنده مانند حیوانات و گل‌ها، بسیار دشوار است و به طور بالقوه می‌تواند منجر به هزینه تولید و نرخ شکست بالا شود و استراتژی کیفیت بالا و قیمت مناسب Seagull را به خطر اندازد.
- با این حال، Seagull این پیشنهاد جذاب را با توانایی خود در ترکیب صنایع دستی (craftsmanship) و تولید انبوه (mass-production) محقق کرد:
  - مرکز تحقیق و توسعه (R&D) در تایوان: با استخدام استادکاران ماهر و ترکیب صنایع دستی نفیس آن‌ها با آخرین فناوری مهندسان جوان، مشکل تکرار سبک سه‌بعدی آرت نوو حل شد. سرمایه‌گذاری بیش از ۱ میلیون دلار آمریکا در ابزار نمونه‌سازی سریع سه‌بعدی (RP) کارایی فرآیند تولید را بهبود بخشید.
  - تولید انبوه در چین: پس از طراحی یک محصول جدید و تعیین جزئیات رویه‌ای برای توسعه بهترین شیوه تولید در تایوان، این شیوه به خط تولید انبوه در چین منتقل و اجرا می‌شود.
  - این ساختار به FRANZ اجازه می‌دهد تا از هزینه تولید پایین در چین استفاده کند و در عین حال دقت فرآیند تحقیق و توسعه در تایوان را حفظ نماید.
- بنابراین، توانایی ترکیب صنایع دستی و تولید انبوه، به برند FRANZ کمک کرده است تا هم جوهره برند و هم استراتژی قیمت‌گذاری خود را به مشتریان بین‌المللی منتقل کند.

بحث

جوهره برند جهانی در سراسر مرزهای جغرافیایی و زمانی

شرکت مورد مطالعه، علی‌رغم بین‌المللی نبودن و محدودیت منابع، توانسته است یک برند بین‌المللی موفق ایجاد کند. فعالیت اصلی آن در استراتژی برندسازی بین‌المللی، شناسایی تم برند و جوهره برندی است که برای مشتریان بین‌المللی جذاب باشد.

- یافته مربوط به تم برند جهانی، یعنی طبیعت و انسانیت، مفهوم بخش افقی را تکرار می‌کند. تم برند توانایی عبور از مرزهای جغرافیایی را دارد؛ مشتریان هدف بر اساس شباهت در علاقه به تم، نه بر اساس کشوری که در آن زندگی می‌کنند، گروه‌بندی می‌شوند.
- علاوه بر عبور از مرزهای جغرافیایی، مطالعه موردی اهمیت دربرگرفتن نسل‌ها را هنگام جستجوی جوهره برند جهانی جذاب روشن می‌کند.
- یک مزیت شناسایی یک جوهره برند جهانی متمایز برای شرکت‌های بازار نوظهور این است که به کاهش قابل توجه زمان و تلاش صرف شده برای توسعه یک برند بین‌المللی کمک می‌کند.
- یک استراتژی استانداردسازی جهانی به شرکت‌های برندسازی بین‌المللی با استانداردسازی محصول و برنامه‌های بازاریابی برای مشتریان در کشورهای مختلف، برای کارایی بیشتر و کاهش هزینه از بهره‌برداری کامل از صرفه‌جویی در مقیاس، سود می‌رساند.

ترکیب عناصر به ظاهر متضاد (The fusion of seemingly contrasting elements)

مطالعه موردی نشان می‌دهد که استراتژی برندسازی بین‌المللی می‌تواند به طور مؤثر از ترکیب عناصر به ظاهر متضاد ساخته شود. شرکت مورد مطالعه سه جفت عنصر متضاد را ترکیب کرده است:

۱. فرهنگ‌های غربی و شرقی: ترکیب مراجع فرهنگی مختلف، برند FRANZ را به صورت شخصیتی آشنا اما نه بیش از حد عجیب به مشتریان بین‌المللی معرفی می‌کند.
۲. عناصر تاریخی و مدرن: این ترکیب به FRANZ اجازه می‌دهد تا هم توسط نسل‌های قدیم و هم نسل‌های جوان پذیرفته شود، به طوری که برند از مرزهای زمانی نیز فراتر می‌رود.
۳. صنایع دستی و تولید انبوه: این ترکیب برای بین‌المللی شدن برند حیاتی است. این ترکیب FRANZ را قادر می‌سازد تا محصولات استثنایی و جذابی را با قیمتی منطقی ارائه دهد و این به شدت به رقابت با رقبای بازار توسعه‌یافته کمک می‌کند.

به طور خلاصه، یافته مطالعه موردی نشان می‌دهد که یک استراتژی برندسازی بین‌المللی می‌تواند توسط شرکتی که قادر به ترکیب موفقیت‌آمیز تعدادی از عناصر متضاد است، تدوین و به طور مؤثر اجرا شود.

نتیجه‌گیری

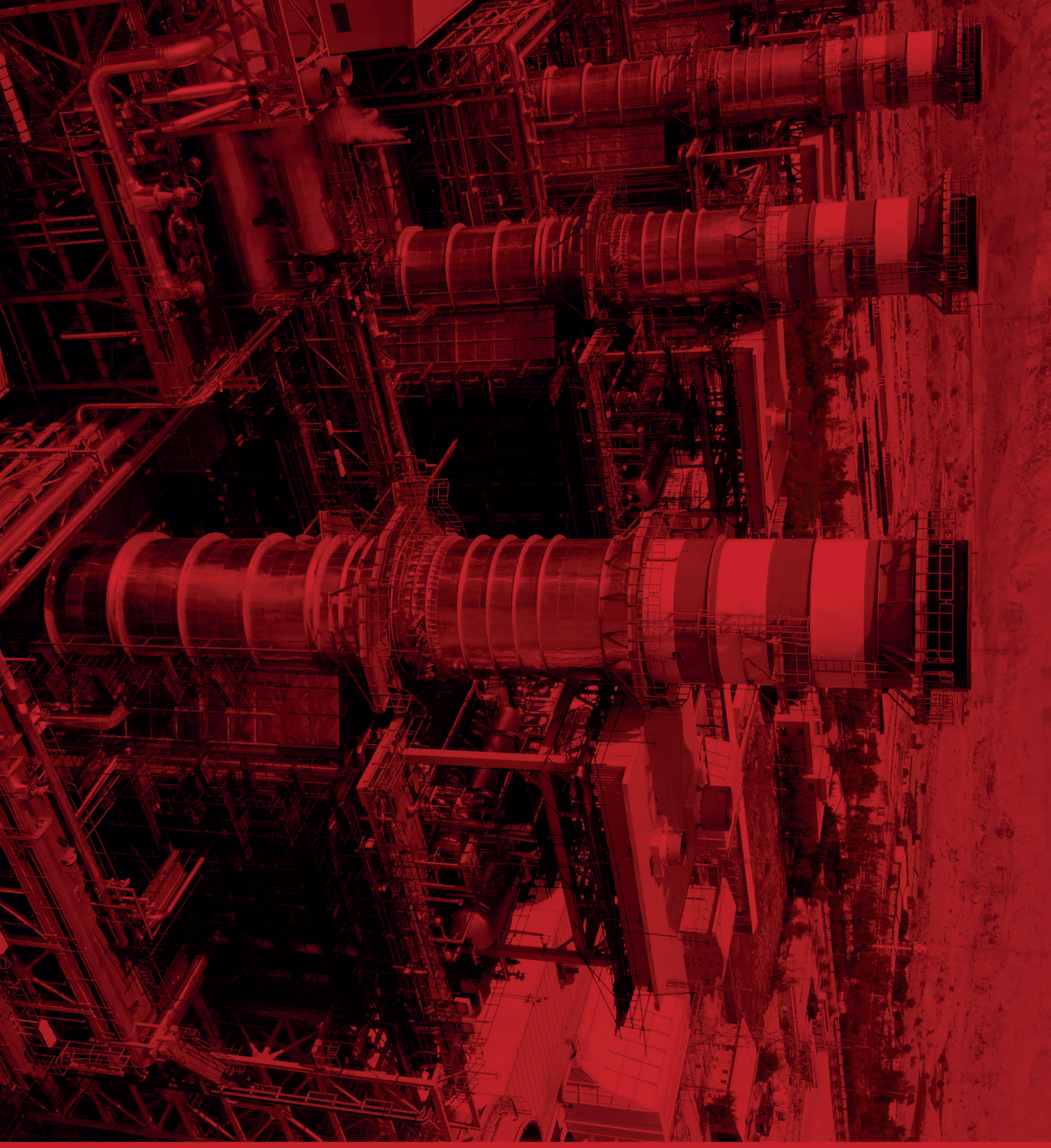
این مطالعه با بررسی فرآیند برندسازی بین‌المللی یک شرکت تایوانی، نشان می‌دهد که موفقیت از طریق چهار گام استراتژیک متوالی زیر قابل دستیابی است:

۱. ایجاد یک نام تجاری فراملی.
۲. شناسایی یک جذابیت جهانی.
۳. توسعه جوهره برند جهانی.
۴. انتقال جوهره برند از طریق محصولات.

این یافته‌ها با دیدگاه فرآیندمحور استراتژی برند بین‌المللی همخوانی دارد. علاوه بر این، یافته نشان می‌دهد که توانایی ترکیب (fusion) انواع عناصر متضاد در سراسر مرزهای جغرافیایی و زمانی، پایه و اساس فرآیند برندسازی بین‌المللی است.
این توانایی ترکیب با قادر ساختن یک شرکت به حک کردن مؤثر یک جایگاه (niche) جهانی و برآوردن کارآمد نیازهای آن بخش، بین‌المللی شدن برندهای بازار نوظهور را تسریع می‌بخشد. سرعت برندسازی بین‌المللی و دقت در شناسایی بازار هدف به ویژه برای شرکت‌های بازار نوظهور که نسبتاً از نظر تجربه بین‌المللی و منابع محدودتر از رقبای توسعه‌یافته خود هستند، اهمیت دارد.
این یافته‌ها می‌تواند با ارائه بینش‌هایی در مورد تجربیات شرکت مورد مطالعه، به متخصصان بازاریابی بین‌المللی در برنامه‌ریزی و اجرای استراتژی برندسازی خود کمک کند.

منابع

۱. Banerjee, S. (۲۰۱۸), “Strategic brand-culture fit: a conceptual framework for brand management”, Journal of Brand Management, Vol. ۱۵ No. ۵, pp. ۲۱-۳۱۲.
۲. (The) Economist (۲۰۱۸), “A bigger world”, The Economist, ۲۰ September, pp. ۶-۳.
۳. Whitelock, J. and Fastoso, F. (۲۰۱۷), “Understanding international branding: defining the domain and reviewing the literature”, International Marketing Review, Vol. ۲۴ No. ۳, pp. ۷۰-۲۵۲.
٤. Wong, H.Y. and Merrilees, B. (۲۰۱۷), “Multiple roles for branding in international marketing”, International Marketing Review, Vol. ۲۴ No. ۴, pp. ۴۰۸-۳۸۴.



کارگروه کسب و کار

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و مدیریت پایان عمر (EoL) پنل‌های فوتوولتاییک (PV)

امیرحسین عبدالملکی

چکیده

سیستم‌های فتوولتاییک (PV) به‌واسطه عدم نیاز به سوخت‌های فسیلی در مرحله بهره‌برداری و انتشار اندک گازهای گلخانه‌ای، به‌عنوان راهکاری مؤثر در گذار به انرژی‌های کم‌کربن پذیرفته شده‌اند. با این وجود، برتری عملیاتی این فناوی نباید موجب نادیده گرفتن بارهای زیست‌محیطی وابسته به چرخه عمر ماژول‌ها شود؛ زیرا استخراج مواد خام، تصفیه و تولید کریستالین سیلیکون، ساخت ویفرها و تولید ماژول‌های فیلم‌نازک با انتشار مجموعه‌ای از آلاینده‌ها همراه است.

در این میان گازهای گلخانه‌ای، گازهای اسیدی‌کننده، ذرات معلق، حلال‌های آلی فرار و فلزات سنگین (نظیر کادمیوم و سرب) از مهم‌ترین عوامل آلودگی‌اند. علاوه بر این، استفاده از گازهای فلوئورین مانند نیتروژن تری‌فلوراید (NF۳) در سیستم‌های پوشش‌دهی، پتانسیل گرمایش جهانی بالایی دارد و می‌تواند ریسک‌های اقلیمی بلندمدت ایجاد کند. در مرحله بهره‌برداری، تجمع گردوغبار در سایت‌های شنی و نیاز به پاک‌سازی دوره‌ای صفحات PV، در صورت مدیریت نامناسب، موجب کاهش بازدهی و کوتاه‌شدن عمر مفید ماژول‌ها می‌شود. مرحله پایان عمر (EoL) حساسیت ویژه‌ای دارد؛ روش‌های قدیمی دفع پسماند پایان عمر (دفن یا احتراق) می‌تواند به آزادسازی ترکیبات سمی در خاک و آب‌های زیرزمینی منجر و «سمیت زیست‌محیطی» را تشدید نماید.

فرایندهای بازیافت شامل روش‌های حرارتی برای جداسازی لایه EVA (اتیلن وینیل استات)، روش‌های شیمیایی برای بازیافت لایه‌های نیمه‌هادی، و روش‌های مکانیکی برای بازیابی شیشه، سیلیکون و فلزات باارزش می‌باشند؛ با این حال هر مسیر بازیافتی نیازمند ملاحظات زیست‌محیطی خاص خود (مصرف انرژی، تولید پس‌آب یا انتشار ذرات و گازهای فلوئورین) می‌باشد. با توجه به تفاوت صفحات خورشیدی در ترکیب و فناوری ساخت، به‌ویژه میان صفحات سیلیکونی و فناوری‌های فیلم‌نازک مانند صفحات CdTe و CIGS، اتخاذ استراتژی‌های مدیریت پایان عمر اختصاصی و ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی برای هر نوع ماژول ضروری است.

این مقاله به‌طور نظام‌مند ترکیبات و فناوری ساخت نسل‌های مختلف صفحات خورشیدی را ریسک بررسی و اثرات زیست‌محیطی مراحل چرخه عمر و گزینه‌های مدیریتی پایان عمر هر یک را تحلیل می‌کند و راهکارهایی برای کاهش و بهبود فرایند بازیابی منابع از پسماند پایان عمر این صفحات ارائه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: انرژی خورشیدی، پنل‌های خورشیدی، اثرات زیست محیطی، ارزیابی چرخه عمر، مدیریت پسماند

۱. نیروگاه‌های خورشیدی

پاسخ به نگرانی‌های کنونی در زمینه امنیت انرژی، حفاظت از محیط‌زیست و تغییرات اقلیمی جهانی، به‌عنوان یکی از اهداف اصلی در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه با تمرکز ویژه بر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر مطرح است؛ در این میان، انرژی خورشیدی به‌عنوان راهکاری نوظهور در بخش‌های مسکونی، تجاری، کشاورزی و صنعتی جایگاه برجسته‌ای یافته است. در یک دسته‌بندی کلی، فناوری برداشت انرژی خورشیدی را می‌توان به سامانه‌های فتوولتائیک (PV) و سامانه‌های متمرکز خورشیدی (CSP) تقسیم کرد. طراحی و پیاده‌سازی این سامانه‌ها مستلزم رویکردی چندوجهی است که علوم مواد و مهندسی مختلف را به‌کار می‌گیرد تا عملکرد بهینه همراه با کاهش هزینه‌ها در بکارگیری این سامانه ها حاصل شود.

در هر دو سامانه PV و CSP، پرتو الکترومغناطیسی خورشید باید پیش از تبدیل به انرژی قابل استفاده، با سطحی واسط برهم‌کنش داشته باشد که این برهم‌کنش می‌تواند از طریق عبور (انتقال) یا بازتاب انجام گیرد.

در ماژول‌های PV این سطح می‌تواند شامل یک پوشش شیشه‌ای یا پلیمری ماژول باشد؛ در حالی‌که در سامانه‌های CSP، آینه‌های بازتابنده با بازتاب شدید، پرتوها را به یک نقطه کانونی مرکزی هدایت می‌کنند. امروزه تلاش‌های پژوهشی عمدتاً بر بهینه‌سازی طراحی و اقتصادی اجزای مختلف این سامانه‌ها متمرکز است.

ادغام تولید برق خورشیدی با راهبردهای مدیریت انرژی، برای دستیابی به آینده‌ای پاک‌تر و پایدارتر ضروری است. تولید برق خورشیدی منبعی پاک و تجدیدپذیر فراهم می‌آورد که می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌طور چشمگیری کاهش داده و تغییرات اقلیمی را تعدیل کند. همچنین، راهبردهای مدیریت انرژی با بهینه‌سازی مصرف و کاهش اتلاف، به صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی و ارتقای بازدهی کمک می‌کنند (Sarver, Al-Qaraghuli et al.۲۰۱۳).

۱/۱ پنل‌های فتوولتائیک (PV)

یک سامانه استاندارد انرژی خورشیدی معمولاً شامل پنل خورشیدی، کنترل‌کننده خورشیدی و بانک باتری است. در مواردی که توان خروجی ۲۲۰ یا ۱۱۰ ولت باشد، افزوده شدن یک مبدل (اینورتر) به پیکربندی سامانه ضروری است. وظیفه اصلی اینورتر، تبدیل جریان مستقیم (DC) به جریان متناوب (AC) است. پنل‌های خورشیدی که با عنوان ماژول‌های خورشیدی یا ماژول‌های فتوولتائیک نیز شناخته می‌شوند، با بهره‌گیری از اثر فتوولتائیک در مواد نیمه‌هادی موجود در پنل، تابش خورشید را به‌طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. این پنل‌ها متشکل از چندین سلول خورشیدی متصل به یکدیگر به‌صورت سری هستند که به‌عنوان واحدهای پایه سامانه عمل می‌کنند.

وظیفه اصلی بانک باتری ذخیره‌سازی انرژی تولیدی در زمان تابش خورشید است تا در صورت نیاز، تقاضا بار را تامین کند. در این میان، کنترل‌کننده خورشیدی نقشی حیاتی در تنظیم خودکار سامانه دارد و از شارژ بیش‌ازحد باتری جلوگیری می‌کند تا عملکرد بهینه تضمین شود (Heydari, Heydari et al .۲۰۲۳)

به‌طور کلی، سامانه‌های PV بیشتر به‌دلیل انتشار اندک کربن و گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شوند؛ این سامانه‌ها برای بهره‌برداری به سوخت‌های فسیلی نیاز ندارند، اگرچه فرایندهای تولید آن‌ها تا حدودی همچنان به سوخت‌های فسیلی وابسته‌اند که بر میزان سازگاری زیست‌محیطی آن‌ها اثر می‌گذارد. همچنین، دوره بازگشت سرمایه در سامانه‌های PV نسبت به سایر منابع انرژی متعارف و تجدیدپذیر کوتاه‌تر است. برخلاف تصور عمومی مبنی بر عدم نیاز به نگهداشت، این سامانه‌ها به‌ویژه در محیط‌های شن‌زار یا دارای گردوغبار نیازمند تمیزکاری دوره‌ای هستند، چرا که آلودگی سطحی اثر قابل توجهی بر عملکرد آن‌ها دارد.

پس از پایان فرایند ساخت و نصب کامل، سامانه‌های PV کاملاً ایمن برای محیط‌زیست هستند؛ نه آلودگی صوتی ایجاد می‌کنند و نه گازهای سمی یا گلخانه‌ای آزاد می‌سازند. با این حال، همانند هر محصول صنعتی، ساخت سلول‌ها و پنل‌های خورشیدی می‌تواند پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد (Wang, Tian et al .۲۰۲۲).

۱/۲ مواد مورد استفاده در سلول‌های PV

سامانه‌های PV بر اساس نوع فناوری سلول خورشیدی و مواد به‌کاررفته دسته‌بندی می‌شوند. سلول‌های خورشیدی به سه نسل اصلی تقسیم می‌شوند: نسل اول، نسل دوم و نسل سوم.

پایه ساختاری نسل اول سیلیکون بلورین (c-Si) است که می‌تواند به‌صورت تک‌بلور (sc-Si) یا چندبلور (mc-Si) باشد. نسل دوم شامل سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک است، نظیر سیلیکون آمورف (a-Si)، کادمیم تلوراید (CdTe) و سولفید کادمیم (CdS). نسل سوم از فناوری‌هایی تشکیل شده که الزاماً مبتنی بر سیلیکون نیستند، از جمله سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (PSC)، سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSSC)، پنل‌های فتوولتائیک متمرکز (CPV)، پنل‌های آلی، پنل‌های هیبریدی و سلول‌های کوانتومی نقطه‌ای (QD) (Bagher, Vahid et al .۲۰۱۵).

پنل‌های نسل اول عمدتاً از ماژول‌های متداول سیلیکون بلورین مبتنی بر ویفر تشکیل شده‌اند. این ماژول‌ها عموماً شامل یک لایه شیشه‌ای سخت (سوپراسترات)، لایه فعال ویفر سیلیکونی و یک لایه پلیمری هستند که توسط موادی همچون اتیلن وینیل استات (EVA) یا الاستومر پلی‌اولفین (POE) به هم متصل شده‌اند.

الکترودهای جلویی معمولاً با استفاده از نقره چاپ می‌شوند، هرچند روندهای نوین به‌سمت استفاده از مس یا آبکاری مس-نیکل برای کاهش هزینه در حرکت است؛ به‌گونه‌ای که میزان نقره در هر سلول از حدود ۴۰۰ میلی‌گرم در سال ۲۰۰۹ به کمتر از ۱۰۰ میلی‌گرم در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. با وجود این پیشرفت‌ها، ماژول‌های نسل اول همچنان ممکن است حاوی مقادیر اندکی از مواد خطرناک باشند؛ برای مثال، مقادیر ناچیز سرب (معمولاً کمتر از ۰/۱ درصد وزنی) ممکن است در اتصالات لحیم یا بخشی از خمیر شیشه‌ای مورد استفاده در خمیرهای متالیزاسیون وجود داشته باشد. گرچه ریسک کلی مواد در پنل‌های سیلیکونی بلوری نسبتاً پایین است، اما این مواد خطرناک در مرحله پایان عمر نیازمند مدیریت دقیق هستند تا از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری شود (Chen, Chen et al .۲۰۲۱).

پنل‌های نسل دوم عمدتاً به فناوری‌های لایه‌نازک مانند کادمیم تلوراید (CdTe)، مس-ایندیم-گالیوم-سلنید (CIGS) و تا حدی سیلیکون آمورف (a-Si) اشاره دارند. ماژول‌های CdTe با رسوب‌دهی یک لایه نازک تلوراید کادمیم روی بستر شیشه ساخته می‌شوند که معمولاً با یک لایه بافر سولفید کادمیم (CdS) همراه است (Wang, Feng et al.۲۰۲۴).
در اینجا کادمیم که یک فلز سنگین بسیار سمی می‌باشد، ماده‌ای کلیدی محسوب می‌شود، هرچند محتوای آن معمولاً کمتر از ۰/۱ درصد وزنی است. در مقابل، سلول‌های CIGS دارای لایه جاذبی متشکل از مس، ایندیم، گالیوم و سلنیم هستند و اغلب نیز لایه CdS در ساختار آن‌ها به‌کار می‌رود که بدین ترتیب کادمیم به‌صورت غیرمستقیم وارد ماژول می‌شود.
در حالی‌که ماژول‌های سیلیکون آمورف معمولاً حاوی مقادیر کمتری از مواد خطرناک نسبت به فناوری‌های CdTe و CIGS هستند، اما همچنان مواد رایج محصورسازی و نوارهای اتصال در آن‌ها ممکن است شامل آثار سرب یا نقره باشند. در تمامی فناوری‌های لایه‌نازک، حضور این مواد چالش‌های ویژه‌ای در بازیافت و مدیریت پسماند ایجاد می‌کند؛ به‌ویژه به‌دلیل سمیت کادمیم و پیامدهای زیست‌محیطی فلزات سنگین (Nkuissi, Konan et al .۲۰۲۰).

پنل‌های نسل سوم شامل فناوری‌های نوین و پیشرفته فتوولتائیک‌اند، از جمله سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگ (DSSC)، فتوولتائیک‌های آلی (OPV) و سامانه‌های مبتنی بر نقاط کوانتومی. در میان این‌ها، سلول‌های پروسکایتی به‌ویژه به‌دلیل ساختارهای هیبریدی آلی-معدنی شناخته می‌شوند که معمولاً سرب را به‌عنوان کاتیون مرکزی در ترکیباتی مانند متیل‌آمونیوم یدید سرب دربرمی‌گیرند. این محتوای سرب با وجود نقش اساسی در دستیابی به بازدهی‌های بالای تبدیل توان موجب نگرانی‌های جدی زیست‌محیطی و سلامت می‌شود؛ چراکه حتی مقادیر اندک آن در صورت آزاد شدن طی فرایند تخریب یا دفع ماژول می‌تواند خطرناک باشد.
پژوهش‌ها در حال بررسی جایگزین‌هایی مانند پروسکایت‌های مبتنی بر قلع یا بیسموت هستند، هرچند این گزینه‌ها اغلب با چالش‌هایی همچون بازدهی پایین‌تر یا پایداری محدود مواجه‌اند. سایر رویکردهای نسل سوم، از جمله DSSC و OPV، متکی بر نیمه‌هادی‌های آلی و معدنی نوین‌اند که ممکن است شامل مواد خام حیاتی باشند و استفاده از حلال‌های پیچیده در فرایند ساخت آن‌ها نیز چالش‌های بیشتری در زمینه بازیافت‌پذیری و سمیت ایجاد کند.در مجموع، اگرچه این فناوری‌های نوظهور می‌توانند نیاز به انرژی ساخت را کاهش داده و چرخه‌های مواد پایدارتر ایجاد کنند، اما همچنین به راهبردهای نوآورانه در بازیافت و اقدامات ایمنی سختگیرانه برای مدیریت مواد خطرناک نیاز دارند (Ren, Qian et al .۲۰۲۲).

۲. اثرات زیست‌محیطی

بخش عمده‌ای از مواد مورد استفاده در ساخت پنل‌های فتوولتاییک (PV)، بالقوه سمی، بسیار ارزشمند و در بسیاری موارد کمیاب هستند و احتمال آزادسازی آن‌ها به محیط‌زیست از طریق هوا و آب وجود دارد که می‌تواند منجر به بروز مشکلات جدی گردد. بنابراین، مدیریت این مواد باید در کل چرخه عمر سیستم، از فرآیندهای ساخت تا مرحله دفع در پایان عمر مفید آن، مدنظر قرار گیرد (Krebs-Moberg, Pitz et al .۲۰۲۱).
در این بخش، اثرات زیست‌محیطی مرتبط با هر نسل/ نوع از پنل‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲/۱ نسل اول _ ماژول‌های فتوولتاییک سیلیکون کریستالی

ماژول‌های سیلیکون کریستالی سهم غالب بازار نسل اول را در اختیار دارند و به دلیل طول عمر عملیاتی بالا و تولید انرژی پایدار شناخته می‌شوند. با این حال، فرآیند تولید این ماژول‌ها، به‌ویژه به‌علت نیاز به خالص‌سازی سیلیکون و تولید ویفرها به‌شدت انرژی‌بر است. از نظر زیست‌محیطی، در حالی که خود سیلیکون ذاتاً خنثی است، مواد جانبی مورد استفاده در مونتاژ ماژول _ همچون نقره برای متالیزاسیون و سرب در اتصالات لحیمی یا شیشه فریت _ می‌توانند مخاطراتی ایجاد کنند. مقادیر جزئی سرب (معمولاً کمتر از ۰/۱ درصد وزنی) ممکن است از ماژول‌های آسیب‌دیده به‌ویژه در شرایط اسیدی آزاد شوند و در نتیجه آلودگی خاک و آب را در پی داشته باشند (Seo, Kim et al .۲۰۲۱).
علاوه بر این، کاهش مداوم منابع فلزات گران‌بهایی همچون نقره، علی‌رغم کاهش مصرف در سال‌های اخیر، ضرورت توسعه فرآیندهای بازیافت کارآمد را برجسته می‌سازد؛ فرآیندهایی که نه‌تنها امکان بازیابی مواد ارزشمند را فراهم کنند، بلکه از طریق صرفه‌جویی در تولید سیلیکون جدید، ردپای زیست‌محیطی را نیز کاهش دهند (Fthenakis and Leccisi .۲۰۲۱).

۲/۲ نسل دوم _ ماژول‌های لایه‌نازک CdTe

ماژول‌های لایه‌نازک کادمیم تلوراید (CdTe) به دلیل زمان بازپرداخت انرژی کمتر نسبت به ماژول‌های سیلیکون کریستالی شناخته شده‌اند که ناشی از فرآیندهای ساخت ساده‌تر و نیاز کمتر به مواد اولیه است. با این حال، این ماژول‌ها حاوی مواد خطرناک هستند، به‌ویژه کادمیم _ عنصری با سمیت بسیار بالا _ و تلوریوم.
هرچند محتوای کادمیم در ماژول‌های CdTe معمولاً کمتر از ۰/۱ درصد وزنی است، هرگونه آسیب در یکپارچگی ماژول یا دفع غیراصولی می‌تواند منجر به نشت کادمیم شود که پیامدهای جدی سلامتی از جمله آسیب کلیوی و ریوی را به همراه دارد. چالش زیست‌محیطی اصلی در این فناوری، ایجاد توازن میان مزایای انرژی و هزینه با ضرورت تدوین پروتکل‌های سختگیرانه بازیافت و روش‌های دفع ایمن برای کاهش خطرات ناشی از آلودگی کادمیم است (Nekouaslazadeh ۲۰۲۱).

۲/۳ نسل دوم _ ماژول‌های لایه‌نازک CIGS

ماژول‌های مس-ایندیوم-گالیم-سلنید (CIGS) از یک لایه جاذب پیچیده شامل چندین فلز (مس، ایندیوم، گالیم و سلنیوم) بهره می‌برند تا راندمان بالاتری حاصل کنند. هرچند این فناوری عملکرد امیدوارکننده و انعطاف‌پذیری بالایی دارد، نگرانی‌های زیست‌محیطی خاص خود را نیز ایجاد می‌کند [۹].
استفاده از لایه بافر سولفید کادمیم (CdS) در برخی طراحی‌ها، موضوع سمیت کادمیم را مجدداً مطرح می‌سازد، هرچند در مقادیر ناچیز. علاوه بر آن، کمیابی ایندیوم و گالیم، مسائل پایداری بلندمدت را از منظر دسترسی به منابع ایجاد می‌کند. همچنین، سلنیوم هرچند در مقادیر اندک مورد استفاده قرار می‌گیرد، در صورت رهاسازی به محیط می‌تواند خطرناک باشد. این چالش‌ها نیازمند توسعه فناوری‌های پیشرفته بازیافت هستند که بازیابی و استفاده مجدد از این فلزات را تسهیل کرده و در نتیجه آلودگی زیست‌محیطی و فشار بر منابع حیاتی را کاهش دهند (Witto ۲۰۲۳).

۲/۴ نسل دوم _ ماژول‌های سیلیکون آمورف (a-Si)

ماژول‌های سیلیکون آمورف به‌عنوان نوعی از فناوری نسل دوم، از شکل غیرکریستالی سیلیکون که بر روی زیرلایه شیشه‌ای با لایه‌های پلیمری محصور و بک‌شیت رسوب داده می‌شود، ساخته می‌شوند. تولید آن‌ها عموماً نیازمند انرژی کمتری نسبت به ماژول‌های سیلیکون کریستالی است و معمولاً مواد خطرناک کمتری دارند، هرچند مقادیر جزئی سرب ممکن است همچنان در اتصالات لحیمی حضور داشته باشد. با این حال، راندمان پایین‌تر و طول عمر کوتاه‌تر این ماژول‌ها منجر به نیاز به تعویض‌های مکررتر می‌شود که در نهایت می‌تواند حجم زباله تولیدی را افزایش دهد.
هرچند اثرات زیست‌محیطی ناشی از نشت سمی در آن‌ها نسبتاً اندک است، اما گردش سریع‌تر این محصولات لزوم اجرای راهکارهای کارآمد بازیافت و مدیریت پسماند را تقویت می‌کند تا از انباشت حتی مقادیر اندک مواد خطرناک در محیط جلوگیری شود (Savvilotidou, Antoniou et al .۲۰۱۷)

۲/۵ نسل سوم _ سلول‌های خورشیدی پرووسکایتی

سلول‌های خورشیدی پرووسکایتی به‌عنوان یکی از امیدبخش‌ترین فناوری‌های نسل سوم شناخته می‌شوند، اما به دلیل ترکیبات مبتنی بر سرب، چالش‌های زیست‌محیطی قابل‌توجهی دارند. این سلول‌ها معمولاً از پرووسکایت‌های هالید سرب (مانند متیل‌آمونیوم یدید سرب) برای دستیابی به راندمان‌های بالای تبدیل توان استفاده می‌کنند. با این حال، محتوای سرب _ که می‌تواند منبع اصلی سمیت باشد _ در صورت تخریب یا دفع غیراصولی سلول‌ها، خطرات شدیدی ایجاد می‌کند. مواجهه با سرب شناخته شده است که منجر به آمفیزم ریوی، اختلالات کلیوی، آسیب‌های اسکلتی و اثرات عصبی همچون لرزش، تحریک‌پذیری و اختلال حافظه می‌شود. علاوه بر این، در شرایط اسیدی، نشت سرب از این ماژول‌ها می‌تواند به‌شدت افزایش یابد و بخش قابل‌توجهی از کل سرب موجود را به محیط آزاد کند.
بنابراین، تضمین یکپارچگی بلندمدت لایه‌های محصورکننده و توسعه راهبردهای بازیافت کارآمد برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی سلول‌های پرووسکایتی حیاتی است(Chen, Fei et al .۲۰۲۱).

۲/۶ نسل سوم _ سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی (QD)

سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی مزایای ویژه‌ای همچون باندگپ قابل تنظیم و امکان تولید چند برانگیختگی (MEG) را ارائه می‌دهند که می‌تواند راندمان را فراتر از محدودیت‌های متداول افزایش دهد. با این حال، بسیاری از سلول‌های نقاط کوانتومی با راندمان بالا همچنان متکی بر فلزات سنگین سمی مانند سرب یا کادمیم هستند که در نانوبلورها به‌کار می‌روند. این مواد هرچند در جذب نور و تولید بار مؤثر هستند، در صورت آزادسازی از طریق تخریب یا بازیافت نادرست، خطرات زیست‌محیطی قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند.
نشت این عناصر سمی، به‌ویژه در محیط‌های اسیدی، می‌تواند منجر به آلودگی خاک و آب شده و خطرات بلندمدت برای اکوسیستم و سلامت عمومی مشابه قرارگیری‌های متداول در معرض سرب ایجاد کند. چالش اصلی در سلول‌های QD، ایجاد توازن میان ویژگی‌های اپتوالکترونیکی پیشرفته و توسعه جایگزین‌های ایمن‌تر و یا فرآیندهای بازیافت کارآمد است که بتوانند اثر زیست‌محیطی خالص را به‌طور معناداری کاهش دهند (Gressler, Part et al .۲۰۲۲).

۲/۷ نسل سوم _ سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSC) و فناوری‌های نوظهور دیگر

سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSCs) و سایر فناوری‌های نوظهور نسل سوم، شامل سلول‌های غیرآلی خاصی همچون Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) و سلول‌های خورشیدی آلی، دارای پروفایل زیست‌محیطی متنوعی هستند (Tay, Kaneko .۲۰۱۸ et al).
DSCها از یک لایه نانوساختار نیمه‌رسانا _ معمولاً TiO_2 _ که با مولکول‌های رنگدانه جاذب نور پوشش داده می‌شود، بهره می‌گیرند. این رنگدانه‌ها می‌توانند شامل حساس‌کننده‌های سمی مانند کمپلکس‌های روتنیم باشند. این رنگ‌ها همراه با الکترولیت‌های ردوکس (اغلب مبتنی بر سیستم‌های یدید / تری-یدید)، در صورت نشت، می‌توانند خطرات شیمیایی ایجاد کنند که سیستم‌های عصبی، قلبی-عروقی و غدد درون‌ریز را تحت تأثیر قرار دهند. جایگزین‌های غیرآلی همچون CZTS، هرچند از فلزات فراوان و غیرسمی استفاده می‌کنند، در برخی موارد برای بهبود عملکرد ممکن است از کادمیم

به‌عنوان جایگزین استفاده شود (Amrillah ۲۰۲۳).
از سوی دیگر، سلول‌های خورشیدی آلی (OSCs) دارای پروفایل سمیت پایین هستند؛ هرچند طول عمر نسبتاً کوتاه آن‌ها می‌تواند منجر به نیاز به تعویض‌های مکرر گردد و در نتیجه حجم زباله و تقاضا برای بازیافت را افزایش دهد. بنابراین، هرچند این فناوری‌های نوظهور نوید کاهش تخلیه منابع و مصرف انرژی در فرآیند ساخت را می‌دهند، پایداری زیست‌محیطی بلندمدت آن‌ها به مدیریت خطرات ناشی از ترکیبات سمی و بهینه‌سازی شیوه‌های مدیریت پایان عمر وابسته است (Li, Monticelli et al ۲۰۲۲).

۲٫۸ مصرف آب

انرژی و آب به یکدیگر وابسته‌اند. سامانه‌های انرژی فتوولتائیک دارای نرخ مصرف آب پایینی هستند و معمولاً تنها حدود ۰٫۰۲ مترمکعب به ازای هر مگاوات‌ساعت (MWh) مصرف می‌کنند. مصرف آب عمدتاً به شست‌وشوی پنل‌ها و کنترل گرد و غبار اختصاص دارد، به‌ویژه در مناطقی که انباشت گرد و غبار مشکل‌ساز است. در حال حاضر، رایج‌ترین روش حذف گرد و غبار در نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ، شست‌وشوی پنل‌ها یا آینه‌ها است؛ مشابه آنچه در سامانه‌های متمرکزکننده توان خورشیدی (CSP) به کار می‌رود (Mani and Pillai ۲۰۱۰).
اگرچه فناوری‌های جایگزین پاک‌سازی مانند روش‌های الکترواستاتیکی نیز وجود دارند، اما به‌طور تجاری به‌صورت گسترده در دسترس نیستند و اثرات زیست‌محیطی روش‌های متداول (مانند شست‌وشو با اسپری‌های شیمیایی) به‌طور کامل شناخته نشده است (Lamont and El Chaar ۲۰۱۱).
در حالی‌که تولید توان توسط سامانه‌های PV به‌طور مستقیم به آب نیاز ندارد، مصرف آب در فرآیند تولید ماژول‌ها و همچنین در مرحله بهره‌برداری و نگهداشت برای شست‌وشوی آن‌ها وجود دارد.
معمولاً تولید مبتنی بر سیلیکون حدود ۲۰۰ لیتر آب به ازای هر MW h مصرف می‌کند و به‌طور متوسط ۱۵ لیتر دیگر نیز در طول نگهداشت و بهره‌برداری افزوده می‌شود. مطالعات موجود نشان می‌دهند که افزایش مصرف آب تأثیر مستقیمی بر کیفیت آب ندارد (Olowu, Sundararajan et al ۲۰۱۸).

۳. چرخه عمر ماژول‌های PV

چرخه عمر سامانه‌های فتوولتائیک (PV) نه تنها شامل تولید انرژی است، بلکه بارهای زیست‌محیطی قابل‌توجهی را طی تولید اجزاء و مدیریت پایان عمر (EoL) به همراه دارد. در فرآیند ساخت سلول‌های سیلیکونی با راندمان بالا و ماژول‌های لایه‌نازک، طیفی از آلاینده‌ها آزاد می‌شوند که شامل گازهای گلخانه‌ای (CO۲، CH۴، SF۶، N۲O)، گازهای اسیدی‌کننده (SO۲ ،NOx)، ذرات معلق، فلزات سنگین نظیر کادمیم و سرب، و حلال‌های آلی فرّار هستند. علاوه بر این، استفاده از پرفلوئوروکربن‌ها در تمیزکاری پلاسمایی و تری‌فلورید نیتروژن (NF۳) در سامانه‌های پوشش‌دهی به دلیل پتانسیل گرمایش جهانی بسیار بالا، خطرات بلندمدتی ایجاد می‌کنند.
در مرحله پایان عمر، پنل‌های PV که برای بازیافت یا دفع در نظر گرفته می‌شوند می‌توانند فلزات سنگین را به خاک و آب‌های زیرزمینی منتقل کنند، ذرات ته نشین شده اورگانوفلوئورین و گازهای گلخانه‌ای فلوئورین را در طی فرایندهای حرارتی آزاد نمایند و در طی پردازش مکانیکی، مواد پلیمری غیرقابل‌تجزیه زیستی را وارد جریان پسماند کنند که می‌تواند منجر به تولید پساب‌های اسیدی، ذرات معلق و ترکیبات آلی فرّار شود.
در این راستا، روش‌های نوظهور بازیافت حلقه‌بسته _ مانند بازیابی شیشه، جداسازی شیمیایی لایه‌های نیمه‌رسانا و جداسازی لایه‌ها با حلال _ در تلاش‌اند تا سیلیکون و فلزات ارزشمند را بازیابی کرده و در عین حال تولید ثانویه آلاینده‌ها را کاهش دهند. این امر ضرورت ارزیابی انتقادی هر مسیر بازیافت از منظر موازنه‌های زیست‌محیطی و اطمینان از آن را برجسته می‌سازد که «زندگی دوم» مواد PV منجر به آسیب‌های جدید زیست‌محیطی نشود (Bosnjakovic, Santa et al ۲۰۲۳).

چرخه کامل عمر یک ماژول خورشیدی فتوولتائیک را می‌توان به مراحل زیر تقسیم کرد:

الف. مرحله پردازش و تولید

در مقایسه پنل‌های پلی‌کریستالی با مونوکریستالی، فرایند تولید پنل‌های مونوکریستالی معمولاً پسماند بیشتری ایجاد می‌کند، زیرا در تولید شمش سیلیکونی و برش آن به ویفر، ضایعات و برش‌های اضافی به وجود می‌آید. با این حال، این ضایعات می‌توانند برای تولید ماژول‌های پلی‌کریستالی یا چندکریستالی مجدداً مورد استفاده قرار گیرند و در نتیجه پسماند کلی کاهش یابد.
در مقابل، پنل‌های سیلیکونی لایه‌نازک به دلیل رسوب لایه نازکی از سیلیکون روی سطح، به حجم مواد کمتری نیاز دارند و بنابراین کاهش بالقوه‌ای در اثرات زیست‌محیطی و تولید پسماند ایجاد می‌کنند.
شایان توجه است که پسماند تولید معمولاً راحت‌تر مدیریت می‌شود، زیرا تولیدکنندگان تخصص و زیرساخت‌های لازم برای مدیریت آن را در اختیار دارند. بنابراین، پسماند تولید یک چالش عمده مدیریت پسماند در سطح جامعه محسوب نمی‌شود. (Kontges, Kurtz et al ۲۰۱۴)

ب. مرحله حمل و نقل

انتقال صفحات خورشیدی از محل تولید به سایت‌های نصب می‌تواند منجر به آسیب دیدن پنل‌ها شود که عمدتاً ناشی از جابجایی نامناسب در بارگیری و تخلیه ماژول‌های PV است (Daniela-Abigail, Vega-De-Lille et al ۲۰۲۴).

ج. مرحله بهره‌برداری

پسماند خورشیدی می‌تواند در طول چرخه عمر اولیه و فعال پنل‌ها ایجاد شود که دلایل آن شامل خطاهای نصب و شرایط آب و هوایی شدیدا نامناسب مانند تگرگ، سیل، طوفان‌های استوایی و سایر عوامل محیطی است (Sharma, Mahajan et al ۲۰۲۴).

د. مرحله پایان عمر

ماژول‌های PV هنگامی به مرحله پایان عمر (EoL) می‌رسند که توان خروجی کلی آن‌ها به کمتر از ۸۰٪ مقدار اولیه ثبت‌شده در زمان تولید کاهش یابد [۵۴]. این مرحله معمولاً پس از ۲۵ تا ۳۰ سال از عمر مفید واقعی پنل‌های خورشیدی رخ می‌دهد و سهم قابل‌توجهی در تولید پسماند دارد. رشد نمایی ظرفیت نصب‌شده PV در سال‌های اخیر همچنین به معنای افزایش سریع تعداد پنل‌هایی است که به مرحله پایان عمر (EoL) خود می‌رسند (Dom□nguez and Geyer ۲۰۱۷). پیش‌بینی‌ها برای پسماند PV در اروپا نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه در دهه‌های آتی است [۵۷].برآوردها نشان می‌دهند که مقدار پسماند از بیش از ۳۳ هزار تن در سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۳۳ هزار تن در سال ۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. تا سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰، این مقادیر به‌ترتیب به حدود ۴ میلیون و ۹٫۵ میلیون تن خواهد رسید (Malandrino, Sica et al ۲۰۱۷).

۴. مدیریت پسماند و بازیافت در سامانه‌های PV

مدیریت پایان عمر (EoL)

مدیریت پسماند پایان‌عمر (EoL) برای پنل‌های فتوولتائیک شامل چندین سناریو است که هدف آن‌ها کاهش بارهای زیست‌محیطی در عین بازیابی مواد ارزشمند می‌باشد. در یک سناریوی دفع متداول، پنل‌ها سوزانده یا در محل دفن زباله رها می‌شوند؛ در این حالت بخش عمده اجزای خطرناک _مانند سرب و مس حاصل از لحیم‌کاری و اتصالات_ بازیابی نشده و مستقیماً وارد محیط‌زیست می‌گردند. این رویکرد منجر به پتانسیل بالای سمیت خاکی و گرمایش جهانی می‌شود، چرا که تولید مواد اولیه جدید انرژی‌بر بوده و خطر نشت فلزات سنگین نیز وجود دارد.
در مقابل، راهبردهای بازیافت شامل زنجیره‌ای از عملیات است که با یک فرایند حرارتی برای سوزاندن یا جداسازی لایه EVA و دیگر اجزای آلی آغاز شده و سپس با عملیات شیمیایی برای بازیابی سیلیکون، فلزات و شیشه ادامه می‌یابد. هرچند این فرایندهای بازیافتی نیازمند مصرف انرژی بالا هستند _به‌ویژه در مراحل تصفیه و انحلال شیمیایی_ اما در مقایسه با دفع مستقیم، بارهای زیست‌محیطی را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهند، زیرا نیاز به بکارگیری مواد اولیه کم‌یاب را کاهش داده و از رهاسازی مواد خطرناک در خاک و آب جلوگیری می‌کنند.(Jung, Park et al.۲۰۱۶)
همچنین، روش‌های جایگزین بازیافت مانند جداسازی مکانیکی مزایای زیست‌محیطی بیشتری به همراه دارند؛ در این روش مواد از طریق شکافت مکانیکی، بدون نیاز به پیرولیز در دماهای بالا، از یکدیگر جدا می‌شوند. این رویکرد موجب افزایش نرخ بازیابی فلزات حیاتی نظیر نقره و مس شده و در عین حال مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های سمی مرتبط با عملیات حرارتی و شیمیایی را به حداقل می‌رساند. با بازیابی و استفاده مجدد از اجزایی مانند ویفرهای سیلیکونی بازیافتی، شیشه با ارزش بالا و فلزات بازیابی شده، بازیافت نه تنها انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد، بلکه خطرات ناشی از مواجهه با پسماندهای خطرناک را نیز کاهش می‌دهد. در مقایسه با فرایندهای مخرب متداول، این تکنیک‌های پیشرفته بازیافت برتری آشکاری از منظر حفاظت منابع و کاهش سمیت اکولوژیکی دارند و بازیافت را به گزینه‌ای پایدارتر در مقایسه با دفع سنتی تبدیل می‌کنند (Muller, Wambach et al ۲۰۰۵).

۴٫۱ بازیافت

یکی از اهداف اصلی فناوری‌های بازیافت، بازیابی اجزاء حیاتی و ارزشمند از پنل‌های خورشیدی مستعمل است. به دلیل تنوع در ترکیب و ساختار ماژول‌ها، انواع مختلف ماژول‌های PV به فناوری‌های بازیافت متفاوتی نیاز دارند. فرایندهای موجود بازیافت شامل روش‌های فیزیکی، حرارتی، شیمیایی یا ترکیبی از این‌ها هستند.
در مجموع، فناوری‌های نسل اول و دوم PV توازن پیچیده‌ای را میان بهره‌وری انرژی و منابع و چالش‌های مدیریت مواد خطرناک نشان می‌دهند؛ بنابراین تدوین فرایندهای بازیافت کارآمد و راهبردهای پایان عمر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی آن‌ها ضروری است.(Rathore and Panwar ۲۰۲۲)
روش‌های موجود بازیافت پنل‌های خورشیدی می‌تواند شامل برخی یا همه مراحل زیر باشد.(Trivedi, Meshram et al.۲۰۲۳)

- جداسازی فریم و جعبه اتصال؛
- جداسازی لایه های پوششی؛
- جداسازی شیشه و ویفر سیلیکونی از طریق فرایندهای حرارتی، مکانیکی یا شیمیایی؛

• جداسازی و تصفیه سلول‌های سیلیکونی و فلزات خاص (مانند نقره، قلع، سرب، مس و آلومینیوم) با استفاده از روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی.

بیشتر تلاش‌ها در زمینه بازیافت پنل‌های خورشیدی بر ماژول‌های سیلیکونی متمرکز است و هدف آن‌ها بازیابی و استفاده مجدد از مهم‌ترین اجزاء می‌باشد .(Xu, Li et al. ۲۰۱۸)

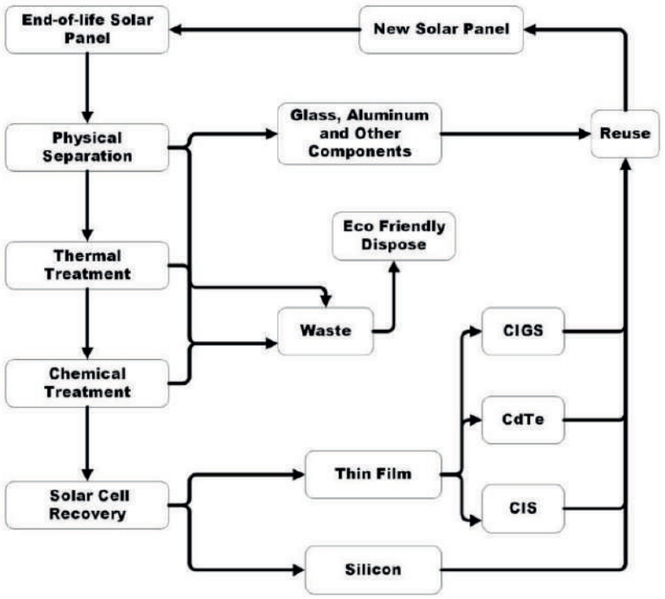
۴/۱/۱ فرآیند تصفیه فیزیکی

در فرآیند تصفیه فیزیکی، پنل‌های خورشیدی ابتدا بازشکسته می‌شوند تا اجزای اصلی آن‌ها با استفاده از ماشین‌آلات برقی از هم جدا گردند. مرحله نخست شامل جداسازی قاب آلومینیومی، جعبه‌های اتصال و کابل‌های تعبیه‌شده از ساندویچ PV که شامل سلول خورشیدی و لایه پشتی است، می‌باشد. قاب آلومینیومی که به‌عنوان مؤلفه اتصال‌دهنده عمل کرده و علاوه‌بر تأمین استحکام مکانیکی، لبه‌های ماژول را در برابر عوامل محیطی مانند نفوذ آب محافظت می‌کند، پس از جداسازی قابل بازیابی از طریق فرایندهای متالورژی ثانویه است.(Palitzsch, Schonherr et al. ۲۰۱۴)
در گام بعدی، ماژول‌های بازشکسته خرد و آسیاب می‌شوند تا اجزای منفرد شامل شیشه، کابل‌ها، جعبه‌های اتصال و حتی مواد سلولی تفکیک شوند و امکان ارزیابی سطح سمیت هر جزء برای دفع یا بازیافت صحیح فراهم آید. شیشه که تقریباً ۷۰٪ وزن پسماند ماژول‌های فتوولتاییک سیلیکونی کریستالی را تشکیل می‌دهد، یا به‌صورت شیشه خردشده و یا به‌صورت قطعات کامل با استفاده از تکنیک‌هایی مانند تیغه‌های گرم‌کننده یا فناوری‌های نوری/ اپتیکی تخصصی بازیابی می‌گردد؛ محتوای پایین آهن در این شیشه‌ها (۰٫۰۵٪ >) نه‌تنها شفافیت بالایی را تضمین می‌کند، بلکه ارزش بازیافتی آن‌ها را در مقایسه با شیشه معمولی افزایش می‌دهد (Chowdhury, Rahman et al. ۲۰۲۰)
قاب‌های آلومینیومی جداشده و سیم‌های مسی می‌توانند مستقیماً برای استفاده مجدد به‌کار روند یا برای بازیابی مواد خام، بیشتر پردازش شوند، در حالی‌که پلاستیک‌های موجود در کابل‌ها و جعبه‌های اتصال معمولاً تحت فرآیندهای حرارتی برای بازیابی انرژی قرار می‌گیرند یا به محل‌های دفن هدایت می‌شوند. علاوه‌بر این، برخی فرایندهای تعمیر و نگهداری متمرکز بر اصلاح خرابی‌های جعبه اتصال هستند که می‌تواند توان خروجی پنل‌های قدیمی را بازیابی یا افزایش دهد؛ البته این روش‌ها عمدتاً محدود به جعبه‌های اتصال خارجی بوده و شامل جداسازی عمیق‌تر یا عملیات برروی سلول‌ها نمی‌شوند.(Orac, Havlik et al. ۲۰۱۵)
پس از بازشکست کامل یک پنل فتوولتاییک سیلیکونی-کریستالی و بازیابی مواد آن، کسرهای جرمی تقریباً برابر با ۵۴/۷٪ شیشه، ۱۲/۷٪ آلومینیوم، ۱۰/۰٪ چسب/ آب‌بند، ۳/۱٪ سیلیکون و ۱۹/۵٪ سایر اجزا گزارش شده است. لازم به ذکر است که آلومینیوم در خمیرهای متالیزاسیون همراه با نقره نیز به‌کار می‌رود، اگرچه این کاربرد به‌صورت جداگانه در ارقام فوق تفکیک نشده است. در طراحی‌های دووجهی نیاز آلومینیوم در سمت پشتی تنها حدود ۲۵٪ نیاز آلومینیوم در سلول‌های یک‌طرفه است که ناشی از کاهش پوشش شبکه‌ای می‌باشد؛ برای نمونه، یک سلول یک‌طرفه استاندارد ۱۶۶×۱۶۶ میلی‌متر حدوداً ۷۵۰ میلی‌گرم آلومینیوم دارد (Gerold and Antrekowitsch. ۲۰۲۴ ۲۰۲۴)
بازیافت ماژول‌های فتوولتاییک مستلزم مصرف انرژی مکانیکی، حرارتی یا الکتریکی برای جداسازی اجزای سازنده است و همچنین استفاده از مواد شیمیایی و آب را به‌دنبال دارد که مجموعاً منجر به انتشار انواع گازها می‌شود. افزون بر این، سوزاندن اجزای غیرقابل‌بازیافت ممکن است انرژی را بازپس‌گیرد اما در عین حال گازهای زیان‌آور منتشر می‌سازد. چالش محوری در بازیافت ماژول‌های PV حذف مؤثر لایه پوششی اتیلن-وینیل استات (EVA) و بازیابی فلزات باارزش است، به‌گونه‌ای که تولید گازهای سمی و پساب‌های آلوده به حداقل برسد (Trivedi, Meshram et al. ۲۰۲۳)
در حال حاضر نرخ دقیق بازیافت ماژول‌های PV به‌دلیل فقدان یک استاندارد بین‌المللی یکپارچه و تنوع رویه‌ها و سیاست‌های منطقه‌ای نامشخص است؛ با این حال مطالعات موجود تخمین می‌زنند که متوسط جهانی بازیافت حدود ۱۴٪ در سال ۲۰۱۹ بوده است و در سناریوهای پرریسک بازیافت ممکن است این مقدار تا حدود ۳۵٪ در سال ۲۰۳۰ و نهایتاً تا ۷۰٪ در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد(Divya, Adish et al. ۲۰۲۳)
اینورتر که دومین جزء از نظر اهمیت در سامانه خورشیدی است، بازیافت مخصوص به خود را دارد که پیچیدگی‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی را به همراه دارد. یکی از مشکلات بارز در بازیافت اینورترها، نبود طراحی و برچسب‌گذاری استاندارد است که شناسایی و تفکیک اجزای مختلف و مواد آلیاژی را دشوار می‌سازد.
بازیافت اینورترها می‌تواند منجر به بازیابی مواد ارزشمندی همچون مس، آلومینیوم، فولاد و پلاستیک‌ها شود و بار زیست‌محیطی استخراج و تولید مواد جدید را کاهش دهد. فلزات تقریباً ۶۰٪ از وزن اینورتر را تشکیل می‌دهند که حدود ۹۰٪ آن قابلیت بازیافت دارد، در حالی که بردهای مدار چاپی حدود ۴۰٪ از وزن اینورتر را شامل می‌شوند که تقریباً ۶۵٪ از آن‌ها قابل بازیافت است (Bosnjakovic, Santa et al. ۲۰۲۳)

۴/۱/۲ تصفیه حرارتی و شیمیایی

فرآیندهای تصفیه حرارتی و شیمیایی بخش جدایی‌ناپذیر بازیافت ماژول‌های فتوولتاییک محسوب می‌شوند و با هدف بازیابی مواد باارزش و کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از اجزای خطرناک موجود در پنل‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. در این فرآیند، ماژول‌های PV در گام نخست از طریق جداسازی قاب آلومینیومی، جعبه‌های اتصال و کابل‌ها بازشکسته

می‌شوند و سپس با استفاده از ابزارهای دقیق مانند تیغه‌های الماسی به قطعات کوچک‌تر تقسیم می‌گردند(Abdo, El-Shazly et al. ۲۰۲۳).
در فرآیندهای بازیافت حرارتی، پنل‌های فتوولتاییک خردشده در کوره‌های با دمای بالا قرار داده شده و تحت چرخه‌های گرمایش کنترل‌شده قرار می‌گیرند. یکی از پروتکل‌های رایج، حرارت‌دهی مواد تا حدود ۵۰۰ °C با نرخ افزایش دما معادل ۴۵۰ °C در ساعت و نگه‌داشتن در این دما به‌مدت یک ساعت است.
رویکرد جایگزین، شامل افزایش آهسته‌تر دما با نرخ ۱۰ °C در دقیقه تا ۶۵۰ °C و سپس یک ساعت ماندگاری در این دما می‌باشد. این عملیات ها به‌طور مؤثر پوشش خارجی پلیمری را حذف کرده و امکان آزادسازی شیشه را فراهم می‌آورند، به‌طوری‌که نرخ بازیابی شیشه حدود ٪ ۹۱ گزارش‌شده است(Ndalloka, Nair et al. ۲۰۲۴)
روش‌های تصفیه شیمیایی مکمل فرآیندهای حرارتی هستند، به‌ویژه در لایه های پوششی نظیر EVA تکنیک‌های شیمیایی اضافی همچون اسیدلیچینگ و فرآیندهای تبادل یونی برای بازیابی فلزات از ماژول‌های لایه‌نازک مانند CdTe و CIGS استفاده می‌شوند؛ در این روش، شستشو با اسیدهایی مانند متان‌سولفونیک، کربنات سدیم یا سولفید سدیم به نرخ‌های بازیابی بالا برای کادمیم، تلوریوم و سایر فلزات حیاتی منجر می‌شوند (Pagnanelli, Moscardini et al. ۲۰۱۷)
در فرآیندهای بازیافت شیمیایی، حلال‌ها بر اساس نوع ماده‌ای که قرار است بازیابی شود انتخاب می‌شوند. برای مثال، خمیرهای اسیدی می‌توانند ویفرهای سیلیکونی را آزاد کنند، در حالی‌که غوطه‌وری طولانی‌مدت در حلال‌های کلردار مانند تری‌کلرواتیلن در دمای ۸۰ °C به‌مدت ده روز موجب حذف مؤثر کپسولانت EVA شده و امکان بازیابی سلول‌های سیلیکونی سالم را فراهم می‌آورد.
به‌طور جایگزین، حلال‌های آلی مانند بنزن، دی‌کلروبنزن و تولوئن فرآیند حل‌شدن EVA را تسهیل می‌کنند؛ به‌عنوان نمونه، تولوئن قادر است این پلیمر را در مدت حدود یک ساعت در دمای ۷۰ °C به‌طور کامل حل کند (Kim and Lee ۲۰۱۲)
این فرآیندهای ترکیبی حرارتی و شیمیایی پس از مرحله اولیه جداسازی فیزیکی ماژول‌ها انجام می‌شوند و اطمینان می‌دهند که هر جزء ماده در شرایط بهینه جداسازی و تصفیه شده و در نهایت بازیابی به حداکثر رسیده و انتشار مواد سمی به حداقل برسد.



شکل ۱. شماتیک مراحل بازیافت سلول‌های خورشیدی

۴/۲ تصفیه فاضلاب و دفن در محل دفن بهداشتی

آخرین مرحله از فرایند بازیافت ماژول‌های فتوولتائیک معمولاً شامل تصفیه فاضلاب، سوزاندن (احتراق) و دفن در محل دفن بهداشتی است.
هر دو روش هیدرومتالورژی و الکترولیز مقدار قابل‌توجهی فاضلاب و لجن حاوی فلزات مختلف تولید می‌کنند. در مواردی که از اسیدها یا بازهای قوی استفاده می‌شود، فرایندهای خنثی‌سازی ثانویه ضروری است (Ardente, Latunussa et al. ۲۰۱۹)
پلاستیک‌ها مانند کابل‌ها معمولاً تحت فرایند سوزاندن قرار می‌گیرند و شیرابه حاصل، پس از بازیابی فلزات گران‌بها، به یک فرایند مستقل تصفیه فاضلاب هدایت می‌شود. جامدات باقی‌مانده از این فرایند، شامل خاکستر سبک، خاکستر سنگین و لجن‌های فلزی، در برخی موارد به‌صورت سودمند مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای مثال در تولید کلینکر سیمان. در غیر این صورت، در انتها باید به شکل مناسب در محل دفن بهداشتی دفع شوند.(Corcelli, Ripa et al. ۲۰۱۸)

طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) ، بخش پلاستیکی معادل۰/۱۷۳ کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم پنل PV به کارخانه‌های احتراق ارسال می‌شود، در حالی که مقدار کمتری از پلیمرها، فویل‌ها و سلول‌های فتوولتائیک سیلیکون کریستالی (c-Si) در محل دفن بهداشتی دفع می‌گردند.(Stolz, Frischknecht et al .۲۰۱۷)

۵. نتیجه‌گیری

بازیافت ماژول‌های فتوولتائیک، به‌عنوان بخشی حیاتی از چرخه عمر فناوری‌های خورشیدی، نه تنها امکان کاهش بار زیست‌محیطی ناشی از اجزای خطرناک و پسماندهای انباشته‌شده را فراهم می‌کند، بلکه بازیابی منابع ارزشمندی همچون شیشه، فلزات و نیمه‌رساناها را نیز تسهیل می‌نماید. مرور رویکردهای ارائه‌شده در این مقاله نشان داد که هر یک از روش‌های فیزیکی، حرارتی و شیمیایی بسته به نوع ماده هدف و شرایط فرایندی، قابلیت‌های خاص خود را داشته و در صورت یکپارچه‌سازی می‌توانند به سطوح بازیابی بالا و کاهش مخاطرات محیطی منجر شوند.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که روش‌های مکانیکی ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین گزینه برای مراحل ابتدایی جداسازی محسوب می‌شوند، در حالی که رویکردهای حرارتی و شیمیایی نقش کلیدی در حذف لایه‌های پلیمری و استخراج فلزات کمیاب ایفا می‌کنند. با این حال، چالش‌هایی نظیر مصرف انرژی بالا در فرایندهای حرارتی، استفاده از حلال‌ها و اسیدهای خطرناک در فرایندهای شیمیایی و ضرورت مدیریت پساب و لجن فلزی در هر دو رویکرد، محدودیت‌های جدی به‌شمار می‌روند. از سوی دیگر، دفن پسماندهای نهایی که امکان بازیافت آن‌ها وجود ندارد، همچنان به‌عنوان یک ضرورت در انتهای زنجیره باقی می‌ماند و می‌تواند ملاحظات زیست‌محیطی بلندمدت را به همراه داشته باشد.

با توجه به رشد نمایی ظرفیت‌های نصب‌شده‌ی فتوولتائیک در جهان، توسعه‌ی روش‌های بازیافت پایدار و مقرون‌به‌صرفه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بهبود بهره‌وری فرایندهای حرارتی از طریق بهینه‌سازی شرایط دما و زمان، جایگزینی حلال‌های کم‌خطر در رویکردهای شیمیایی، و یکپارچه‌سازی سیستم‌های تصفیه پساب با فرایندهای بازیافت می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در آینده این حوزه ایفا کند. همچنین، طراحی ماژول‌های نسل جدید بر پایه‌ی اصول طراحی برای بازیافت می‌تواند مسیر دستیابی به چرخه‌ی بسته مواد و تحقق اهداف اقتصاد چرخشی را هموار سازد.

۶. منابع

- Abdo, D. M., et al. (۲۰۲۳). «Recovery of valuable materials from end-of-life photovoltaic solar panels.» Materials ۲۸۴۰ :(۷)۱۶.
- Amrillah, T. (۲۰۲۳). «Enhancing the value of environment-friendly CZTS compound for next generation photovoltaic device: a review.» Solar Energy ۱۱۱۹۸۲ :۲۶۳.
- Ardente, F., et al. (۲۰۱۹). «Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling.» Waste Management ۱۶۷-۱۵۶ :۹۱.
- Bagher, A. M., et al. (۲۰۱۵). «Types of solar cells and application.» American Journal of optics and Photonics ۱۱۳-۹۴ :(۵)۳.
- Bonjakovi, M., et al. (۲۰۲۳). «Environmental impact of PV power systems.» Sustainability ۱۱۸۸۸ :(۱۵)۱۵.
- Chen, B., et al. (۲۰۲۱). «Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules.» Nature communications ۵۸۵۹ :(۱)۱۲.
- Chen, W.-S., et al. (۲۰۲۱). «Recovery of valuable materials from the waste crystalline-silicon photovoltaic cell and ribbon.» Processes ۷۱۲ :(۴)۹.
- Chowdhury, M. S., et al. (۲۰۲۰). «An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.» Energy Strategy Reviews ۱۰۰۴۳۱ :۲۷.
- Corcelli, F., et al. (۲۰۱۸). «Sustainable urban electricity supply chainIndicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life.» Ecological indicators ۵۱-۳۷ :۹۴.
- Daniela-Abigail, H.-L., et al. (۲۰۲۴). «Life cycle assessment of photovoltaic panels including transportation and two end-of-life scenarios: Shaping a sustainable future for renewable energy.» Renewable Energy Focus ۱۰۰۶۴۹ :۵۱.
- Divya, A., et al. (۲۰۲۳). «Review on recycling of solar modules/panels.» Solar Energy Materials and Solar Cells ۱۱۲۱۵۱ :۲۵۳.
- Domnguez, A. and R. Geyer (۲۰۱۷). «Photovoltaic waste assessment in Mexico.» Resources, Conservation and Recycling ۴۱-۲۹ :۱۲۷.
- Fthenakis, V. and E. Leccisi (۲۰۲۱). «Updated sustainability status of crystalline siliconbased photovoltaic systems: Lifecycle energy and environmental impact reduction trends.» Progress in Photovoltaics: Research and Applications ۱۰۷۷-۱۰۶۸ :(۱۰)۲۹.
- Gerold, E. and H. Antrekowitsch (۲۰۲۴). «Advancements and challenges in photovoltaic cell recycling: A comprehensive review.» Sustainability ۲۵۴۲ :(۶)۱۶.
- Gressler, S., et al. (۲۰۲۲). «Advanced materials for emerging photovoltaic systemsEnvironmental hotspots in the production and end-of-life phase of organic, dye-sensitized, perovskite, and quantum dots solar cells.» Sustainable Materials and Technologies ۳۴: e۰۰۵۰۱.
- Heydari, M., et al. (۲۰۲۳). «Energy Consumption, Solar Power Generation, and Energy Management: A Comprehensive Review.» World Engineering and Applied Sciences Journal ۲۰۲-۱۹۶ :(۰۲)۱۱.
- Jung, B., et al. (۲۰۱۶). «Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: from noble-metal extraction to lead removal.» ACS Sustainable Chemistry & Engineering ۴۰۷۹۴۰۸۳ :(۸)۴.
- Kim, Y. and J. Lee (۲۰۱۲). «Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent.» Solar Energy Materials and Solar Cells ۳۱۷۳۲۲ :۹۸.
- Kntges, M., et al. (۲۰۱۴). «Review of failures of photovoltaic modules.»
- Krebs-Moberg, M., et al. (۲۰۲۱). «Third generation of photovoltaic panels: A life cycle assessment.» Renewable Energy ۵۶۵-۵۵۶ :۱۶۴.
- Lamont, L. A. and L. El Chaar (۲۰۱۱). «Enhancement of a stand-alone photovoltaic system's performance: Reduction of soft and hard shading.» Renewable Energy ۱۳۱۰-۱۳۰۶ :(۴)۳۶.
- Li, Q., et al. (۲۰۲۲). «Life cycle assessment of organic solar cells and perovskite solar cells with graphene transparent electrodes.» Renewable Energy ۹۱۷-۹۰۶ :۱۹۵.
- Malandrino, O., et al. (۲۰۱۷). «Policies and measures for sustainable management of solar panel end-of-life in Italy.» Sustainability ۴۸۱ :(۴)۹.
- Mani, M. and R. Pillai (۲۰۱۰). «Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations.» Renewable and sustainable energy Reviews ۳۱۳۱-۳۱۲۴ :(۹)۱۴.
- Mller, A., et al. (۲۰۰۵). «Life cycle analysis of solar module recycling process.» MRS Online Proceedings Library (OPL) -۰۸۹۵ :۸۹۵G۰۸۰۷-۰۸۰۳.
- Ndalloka, Z. N., et al. (۲۰۲۴). «Solar photovoltaic recycling strategies.» Solar Energy ۱۱۲۳۷۹ :۲۷۰.
- Nekouaslazadeh, A. (۲۰۲۱). Recycling Waste Solar Panels (c-Si & CdTe) in Sweden.
- Nkuissi, H. J. T., et al. (۲۰۲۰). Toxic materials used in thin film photovoltaics and their impacts on environment. Reliability and ecological aspects of photovoltaic modules, IntechOpen.
- Olowu, T. O., et al. (۲۰۱۸). «Future challenges and mitigation methods for high photovoltaic penetration: A survey.» Energies ۱۷۸۲ :(۷)۱۱.
- Orac, D., et al. (۲۰۱۵). «Acidic leaching of copper and tin from used consumer equipment.» Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy ۱۶۱-۱۵۳ :(۲)۵۱.
- Pagnanelli, F., et al. (۲۰۱۷). «Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies.» Waste Management ۴۳۱-۴۲۲ :۵۹.
- Palitzsch, W., et al. (۲۰۱۴). Integrated approach for economic PV waste recycling. ۲۰۱۴ IEEE ۴۰th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE.
- Rathore, N. and N. L. Panwar (۲۰۲۲). «Strategic overview of management of future solar photovoltaic panel waste generation in the Indian context.» Waste Management & Research ۵۱۸-۵۰۴ :(۵)۴۰.
- Ren, M., et al. (۲۰۲۲). «Potential lead toxicity and leakage issues on lead halide perovskite photovoltaics.» Journal of Hazardous Materials ۱۲۷۸۴۸ :۴۲۶.
- Sarver, T., et al. (۲۰۱۳). «A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches.» Renewable and sustainable energy Reviews ۷۳۳-۶۹۸ :۲۲.
- Savvilotidou, V., et al. (۲۰۱۷). «Toxicity assessment and feasible recycling process for amorphous silicon and CIS waste photovoltaic panels.» Waste Management ۴۰۲-۳۹۴ :۵۹.
- Seo, B., et al. (۲۰۲۱). «Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts.» Waste Management ۵۴-۴۵ :۱۲۸.
- Sharma, A., et al. (۲۰۲۴). «End-of-life solar photovoltaic panel waste management in India: forecasting and environmental impact assessment.» International Journal of Environmental Science and Technology :(۲)۲۱ ۱۹۸۰-۱۹۶۱.
- Stolz, P., et al. (۲۰۱۷). «Life cycle assessment of current photovoltaic module recycling.» IEA PVPS Task ۱۲, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T۲۰۱۸ :۱۳ ۱۲.

از نظریه شانون، اطلاعات معنایی و نظریه بازی تا هـوش مصنوعـی

فرشیـد پرستـار

چکیده

در یـک صبـح دل انگیـز اواخـر تابسـتان پـس از پایـان تعطیـلات بـه مقصـد شـهر و دیـار خـود، بـا شـور و هیجـان شـادی بخـشِ هیـچ کجـا خانـه خـود آدم نمـی شـود، از شـمال زیبـا، بـه مقصـد منـزل راهـی شـدم. هـوای نیمـه ابـری بـا خـارج شـدن از شـهر بـه نـاگاه تبدیـل شـد بـه بـارش هـای سـیل آسـایی کـه تصـورش را هـم نمـی کـردم. مـن کـه رانـنده ای چیـره دسـتم!! وحشـت زده! در حـال طـی طریـق بـودم.

بـارش بـه قـدری شـدید زمیـن و آسـمان را بـه هـم مـی دوخـت کـه بـرف پاککـن هـم حریـف آن نمـی شـد! در جـاده پـر پیـچ و خـم، نـه می‌شـد گوشـه ای پـارک کنـم تـا اوضـاع بهتـر شـود و نـه می‌توانسـتم درک کنـم چگونـه خودروهـای پشـت سـر بـا سـرعت از کنـارم مـی گذرنـد! در واقـع بـه نحـوی مانـع حرکـت سـریع آنهـا شـده بـودم! بعـد از کـم شـدن شـدت بـارش، وضعیـت بدتـر و مـه غلیظـی بـر جـاده حکـم فرمـا شـد، و تبحـر فـوق العـاده مـرا در رانندگـی بیشـتر بـه چالـش کشـید! اگـر مرحمـت هسـتی نبـود اکنـون نمی‌توانسـتم ایـن نوشـتار را تقدیـم حضورتـان کنـم! تصمیم‌گیـری مدیریتـی در دنیـای امـروز شـبیه رانندگـی در همیـن مـه غلیـظ اسـت! حجـم انبوهـی از اطلاعـات ناقـص، بازیگـران متعـدد بـا انگیزه‌هـای متفـاوت و شـرایطی کـه هـر لحظـه تغییـر می‌کنـد، بی‌شـباهت بـه رانندگـی مـن در آن مـه غلیـظ هـول انگیـز نیسـت، امـا ترکیـب چهـار ایـده کلیـدی می‌توانـد چراغ‌هـای ایـن خـودرو را روشـن کنـد: نظریـه اطلاعـات شـانون، تحلیـل معنایـی، نظریـه بازی‌هـا و هـوش مصنوعـی.

نظریه اطلاعات کلود شانون

نظریـه اطلاعـات کلـود شـانون، کـه در میانـه قـرن بیسـتم ارائـه شـد، انقلابـی در درک مـا از انتقـال و پـردازش اطلاعـات ایجـاد کـرد. ایـن نظریـه بـا تعریـف کمـیِ مفاهیمـی ماننـد اطلاعـات، آنتروپـی و ظرفیـت کانـال، نـه تنهـا پایـه هـای فنـی ارتباطـات دیجیتـال را بنـا نهـاد، بلکـه تأثیـری عمیـق بـر علـوم داده، رمزنـگاری و حتـی زیسـت شناسـی داشـت.این مقالـه بـه بررسـی اصـول کلیـدی نظریـه شـانون، تأثیـرات آن بـر فناوریهـای معاصـر، و محدودیت‌هـای آن می‌پـردازد.

۱ . مقدمه

از عدم قطعیت تا اطلاعات

کلـود شـانون در نظریـه خـود اطلاعـات را نـه بـه عنـوان یـک مفهـوم انتزاعـی، بلکـه بـه عنـوان معیـاری بـرای کاهـش عـدم قطعیـت تعریـف کـرد. بـه زبـان سـاده، هـر پیامـی کـه احتمـال وقـوع آن کمتـر باشـد، حـاوی اطلاعـات بیشـتری اسـت. بـرای مثـال، خبـر «بـرف در تابسـتان» بسـیار اطلاعاتـی تـر از «آفتـاب در تابسـتان» اسـت، چـون احتمـال کمتـری دارد. شـانون بـا معرفـی مفهـوم آنتروپـی، ابـزاری ریاضـی بـرای سـنجش ایـن عـدم قطعیـت ارائـه داد.

آنتروپـی بـالا بـه معنـای بـی نظمـی بیشـتر در سیسـتم اسـت، ماننـد سـکه ای کـه بـه طـور کامـلاً تصادفـی مـی افتـد (احتمـال شـیر یـا خـط برابـر). در مقابـل، آنتروپـی پاییـن نشـان دهنـده سیسـتم هـای قابـل پیـش بینـی تـر اسـت، ماننـد سـکه ای کـه همیشـه شـیر می‌آیـد.

۲. مفاهیم محوری نظریه شانون

۲.۱. آنتروپی:

سـنجش بی‌نظمـی اطلاعـات آنتروپـی قلـب نظریـه اطلاعـات اسـت. ایـن مفهـوم، کـه از ترمودینامیـک وام گرفتـه شـده، در نظریـه شـانون بـه عنـوان معیـاری بـرای میـزان عـدم قطعیـت در یـک منبـع اطلاعاتـی بـه کار مـی‌رود. بـرای مثـال:

- یـک سـکه عادلانـه (بـا احتمـال ۵۰-۵۰ بـرای شـیر یـا خـط) دارای آنتروپـی حداکثـری اسـت، زیـرا نتیجـه آن کامـلاً غیرقابـل پیـش بینـی اسـت.
- یـک سـکه biased کـه همیشـه شـیر میآیـد، آنتروپـی صفـر دارد، چـون نتیجـه از پیـش مشـخص اسـت. در کاربردهـای واقعـی، آنتروپـی بـه مـا کمـک می‌کنـد تـا حداقـل حجـم مـورد نیـاز بـرای ذخیـره یـا انتقـال اطلاعـات را محاسـبه کنیـم. بـرای مثـال، فشرده‌سـازی فایل‌هـای زیـپ (ZIP) از ایـن اصـل اسـتفاده می‌کنـد تـا داده‌هـای تکـراری یـا قابـل پیـش بینـی را حـذف کنـد.

۲.۲. ظرفیت کانال:

مرزهـای انتقـال اطلاعـات یکـی از دسـتاوردهای کلیـدی شـانون، محاسـبه حداکثـر سـرعت انتقـال اطلاعـات در یـک کانـال ارتباطـی نویـزدار بـود. او نشـان داد کـه حتـی در حضـور نویـز (مثـل پارازیـت در خطـوط تلفـن)، می‌تـوان بـا اسـتفاده از روش‌هـای هوشـمندانه کدگـذاری، اطلاعـات را بـدون خطـا منتقـل کـرد؛ البتـه تـا زمانـی کـه نـرخ انتقـال از حـد معینـی (ظرفیـت کانـال) فراتـر نـرود. ایـن ایـده پایـه فناوری‌هـای مـدرن ماننـد مودم‌هـای اینترنـت و شـبکه‌های 5G اسـت.

۲.۳. کدگذاری:

از فشرده سازی تا اصلاح خطا

- کدگـذاری منبـع: بـرای کاهـش حجـم داده‌هـا بـا حـذف افزونگی‌هـا اسـتفاده می‌شـود. مثـلاً در فشرده‌سـازی عکـس (JPEG)، بخش‌هایـی از داده کـه بـرای چشـم انسـان کـم اهمیـت ترنـد، حـذف می‌شـوند.
- کدگـذاری کانـال: برعکـس، بـا افـزودن داده‌هـای اضافـی ((ماننـد چکسـام) تکملـه در پایـان مقالـه)، امـکان تشـخیص و اصـلاح خطـا در انتقـال فراهـم می‌شـود. ایـن روش در دیسـک‌های بلـوری (Blu-ray) و ارتباطـات فضایـی کاربـرد دارد.

۳. تأثیرات نظریه شانون بر فناوری و علم

۳.۱. ارتباطات دیجیتال

تمـام سیسـتم‌های مخابراتـی مـدرن، از پیامک‌هـای موبایـل تـا اسـتریمینگ Netflix، بـر پایـه نظریـه شـانون عمـل می‌کننـد. مفهـوم ظرفیـت کانـال بـه مهندسـان کمـک کـرده تـا پهنـای بانـد را بهینه‌سـازی کننـد.

۳.۲. یادگیـری ماشـین و هـوش مصنوعـی معیارهایـی ماننـد آنتروپـی متقابـل (Cross-Entropy) (تکملـه در انتهـای مقالـه) در آمـوزش مدل‌هـای هـوش مصنوعـی اسـتفاده می‌شـوند تـا خطـای پیـش بینـی را اندازه‌گیـری کننـد. همچنیـن، درخت‌هـای تصمیـم از آنتروپـی بـرای انتخـاب بهتریـن ویژگی‌هـای تقسـیم داده بهـره می‌برنـد.

۳.۳. رمزنگاری و امنیت

شـانون نشـان داد کـه برخـی سیسـتم‌های رمزنـگاری ماننـد One-Time Pad در صـورت اسـتفاده صحیـح، غیرقابـل شکسـتن هسـتند. ایـن ایده‌هـا پایـه رمزنـگاری مـدرن مثـل AES شـده‌اند. (تکملـه در انتهـای مقالـه)

۴. محدودیت‌ها و انتقادات

- معنـای اطلاعـات: نظریـه شـانون تنهـا بـه کمیـت اطلاعـات می‌پـردازد، نـه معنـای آن. مثـلاً پیـام «سـلام» و «خداحافـظ» بـا آنتروپـی یکسـان، از نظـر معنایـی کامـلاً متفاوتنـد.
- پیچیدگـی محاسـباتی: محاسـبه آنتروپـی بـرای سیسـتم‌های بـزرگ (ماننـد زبـان انسـان) اغلـب نیـاز بـه تقریب‌هـای سـاده کننـده دارد.
- وابستگی به مدل آماری: دقت نظریه شانون به دقت تخمین توزیع احتمالاتی داده‌ها وابسته است.

۵. نتیجه‌گیری

نظریـه اطلاعـات شـانون بـا تبدیـل مفاهیـم کیفـی ارتباطـات بـه قوانیـن کمّـی، سـنگ بنـای عصـر دیجیتـال شـد. اگرچـه ایـن نظریـه محدودیت‌هایـی دارد، امـا هنـوز هـم چارچوبـی اساسـی بـرای حـل مشـکلات پیچیـده در مهندسـی، علـوم داده و فراتـر از آن ارائـه می‌دهـد. در آینـده، ترکیـب ایـن نظریـه بـا مفاهیمـی ماننـد اطلاعـات معنایـی (Semantic Information) ممکـن اسـت افق‌هـای جدیـدی بگشـاید.

تحلیل اطلاعات معنایی(Semantic Information)

از اطلاعات آماری تا اطلاعات معنایی

نظریه اطلاعات کلود شانون در سال ۱۹۴۸ انقلابی در درک ما از انتقال و پردازش داده‌ها ایجاد کرد. این نظریه با معرفی مفاهیمی مانند آنتروپی و ظرفیت کانال، پایه‌های علمی ارتباطات دیجیتال را بنا نهاد. اما شانون عمداً از پرداختن به «معنای» اطلاعات اجتناب کرد و صرفاً بر جنبه‌های کمّی آن تمرکز داشت. در مقابل، اطلاعات معنایی به درک محتوا، ارزش و ارتباط اطلاعات با دنیای واقعی می‌پردازد. در عصر حاضر، با ظهور فناوری‌هایی مانند پردازش زبان طبیعی (NLP) و مدل‌های بزرگ زبانی (LLMs)، تحلیل اطلاعات معنایی به یکی از چالش‌های اصلی هوش مصنوعی تبدیل شده است.

۱. اطلاعات معنایی چیست؟

اطلاعات معنایی به آن دسته از داده‌هایی اشاره دارد که نه تنها از نظر ساختاری قابل انتقال هستند، بلکه دارای ارزش مفهومی برای گیرنده می‌باشند. در حالی که نظریه شانون اطلاعات را صرفاً بر اساس احتمال وقوع و کاهش عدم قطعیت اندازه‌گیری می‌کند، اطلاعات معنایی به سؤالاتی از این دست پاسخ می‌دهد:

- آیا این اطلاعات برای کاربر قابل درک است؟
- آیا ارتباط منطقی با نیازهای گیرنده دارد؟
- آیا می‌توان از آن برای تصمیم‌گیری استفاده کرد؟

مثال: عبارت «دمای هوا ۲۵ درجه است» از نظر آماری ممکن است آنتروپی پایینی داشته باشد، اما معنای آن برای یک کشاورز (نیاز به آبیاری) با یک گردشگر (انتخاب لباس) کاملاً متفاوت است.

۲. چالش‌های تحلیل اطلاعات معنایی

الف) عدم وجود چارچوب نظری یکپارچه

برخلاف نظریه شانون که از فرمول‌های ریاضی دقیقی مانند آنتروپی بهره می‌برد، اطلاعات معنایی فاقد یک چارچوب کمّی جهان‌شمول است. این امر به دلایل زیر است:

- ذهنیت معنایی: درک یک عبارت می‌تواند بسته به فرهنگ، تجربیات فردی و زمینه کاربرد متفاوت باشد. به عنوان مثال، کلمه «آزادی» برای افراد مختلف معانی متفاوتی دارد.
- ابهام زبانی: بسیاری از کلمات و عبارات دارای چندمعنایی هستند. مثلاً کلمه «Mouse» می‌تواند به یک حیوان یا یک دستگاه کامپیوتری اشاره داشته باشد.
- پیچیدگی محاسباتی: مدل‌کردن معنا نیاز به پردازش لایه‌های عمیق‌تری نسبت به داده‌های ساختاریافته دارد.

ب) مسئله آنتروپی بالا در داده‌های غیرساختاریافته

داده‌های متنی، گفتاری و تصویری معمولاً از ساختار نامشخص و تنوع بالایی برخوردارند. این ویژگی باعث می‌شود که مدل‌های هوش مصنوعی در استخراج معنا با مشکل مواجه شوند. به عنوان مثال:

- تغییر معنا با تغییر زمینه: جمله «او یک شیر است» می‌تواند به شجاعت یک فرد یا یک حیوان اشاره داشته باشد.
- استعاره و طنز: درک عباراتی مانند «هوا آنقدر سرد بود که پنگوئن‌ها هم ژاکت پوشیدند!» برای ماشین‌ها دشوار است.

۳. راهکارهای هوش مصنوعی برای تحلیل اطلاعات معنایی

الف) مدل‌های زبانی بزرگ (LLMs)

مدل‌هایی مانند GPT-۴ و BERT با تحلیل میلیاردها صفحه متن، الگوهای معنایی را یاد می‌گیرند. این مدل‌ها از دو روش اصلی استفاده می‌کنند:

۱. یادگیری زمینه (Contextual Learning):

- این مدل‌ها معنا را بر اساس کلمات اطراف تشخیص می‌دهند. به عنوان مثال، در جمله «پولم را در بانک گذاشتم»، کلمه «بانک» به مؤسسه مالی اشاره دارد، اما در جمله «روی بانک نشستم»، به کنار رودخانه اشاره می‌کند.

۲. جاسازی کلمات (Word Embeddings):

- تکنیک‌هایی مانند Word۲Vec کلمات را به بردارهای عددی تبدیل می‌کنند که فاصله بین آن‌ها نشان‌دهنده نزدیکی معنایی است. برای مثال، بردارهای «پادشاه» − «مرد» + «زن» = «ملکه».

ب) مکانیزم توجه (Attention Mechanisms)

مدل‌های ترنسفورمر با استفاده از این فناوری می‌توانند وزن معنایی کلمات را در یک جمله تحلیل کنند. به عنوان مثال، در جمله «سگ گربه را دنبال کرد»، مدل تشخیص می‌دهد که «سگ» فاعل و «گربه» مفعول است.

ج) گراف‌های دانش (Knowledge Graphs)

سیستم‌هایی مانند Google ازهستی‌شناسی‌های ساختاریافته برای ارتباط مفاهیم استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، گراف دانش گوگل می‌داند که «آلبرت انیشتین» یک فیزیکدان بود و با «نظریه نسبیت» مرتبط است.

۴. آینده اطلاعات معنایی در هوش مصنوعی

الف) هوش مصنوعی چندوجهی (Multimodal AI)

ترکیب متن، تصویر و صوت می‌تواند به درک بهتر معنا کمک کند. به عنوان مثال، مدل‌هایی مانند ۴V-GPT نه تنها متن، بلکه تصاویر را نیز تحلیل می‌کنند تا معنای دقیق‌تری ارائه دهند.

ب) یادگیری تقویتی مبتنی بر معنا (Semantic RL)

آموزش مدل‌ها با بازخورد انسانی می‌تواند به بهبود درک معنایی منجر شود. برای مثال، ChatGPT با دریافت بازخورد از کاربران، پاسخ‌های خود را اصلاح می‌کند.

ج) توسعه نظریه اطلاعات تعمیم‌یافته

پژوهش‌های آینده ممکن است به ایجاد چارچوبی یکپارچه بینجامد که هم اطلاعات آماری و هم اطلاعات معنایی را پوشش دهد. چنین نظریه‌ای می‌تواند تحولی مشابه نظریه شانون ایجاد کند.

۵. نتیجه‌گیری: مسیر پیش‌رو

اگرچه هوش مصنوعی در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در تحلیل اطلاعات معنایی داشته است، اما هنوز با چالش‌های اساسی مانند ذهنیت معنایی و عدم وجود معیارهای کمّی مواجه است. ترکیب روش‌های آماری با دانش ساختاریافته و بازخورد انسانی می‌تواند راه‌حلی برای این مشکلات باشد. در آینده، ظهور نظریه اطلاعات معنایی می‌تواند تحولی بنیادین در درک ماشین‌ها از محتوای اطلاعات ایجاد کند.

تصمیم‌گیری هوشمند: وقتی اطلاعات، معنا و نظریه باری با هوش مصنوعی ترکیب می‌شوند

بخش اول: درک زبان دنیای اطلاعات

نظریه اطلاعات شانون مانند ترازویی است که میزان «غافلگیری» یک خبر را اندازه می‌گیرد. تصور کنید مدیر یک فروشگاه زنجیره‌ای هستید:

- خبر «فروش بستنی در تابستان افزایش می‌یابد» آنتروپی (میزان غافلگیری) کمی دارد چون قابل پیش‌بینی است.
- اما خبر «فروش بستنی در زمستان ۳۰۰٪ افزایش یافت» آنتروپی بالایی دارد چون غیرمنتظره است.

تحلیل معنایی اما به محتوای اطلاعات نگاه می‌کند. مثلاً وقتی کارمندی می‌گوید «پروژه رو زمین گذاشتم»، تحلیل معنایی تشخیص می‌دهد که این یا نشانه ناامیدی است یا شوخی!

مثال واقعی: شرکت نتفلیکس با تحلیل معنایی گفتگوهای کاربران در شبکه‌های اجتماعی متوجه شد اصطلاح «تماشای یک نفس» (Binge-watching) در حال گسترش است. این بینش منجر به استراتژی انتشار تمام قسمت‌های یک فصل همزمان شد.

بخش دوم: نقشه‌برداری از میدان رقابت

نظریه بازی‌ها به ما می‌گوید در تعاملات استراتژیک، بهترین تصمیم شما به تصمیم دیگران بستگی دارد. مثل بازی «سنگ-کاغذ-قیچی» اما در سطح شرکتی.

سناریوی عملی: دو شرکت تاکسی‌اینترنتی را در نظر بگیرید که باید بین دو استراتژی انتخاب کنند:

۱. کاهش قیمت‌ها

۲. بهبود کیفیت سرویس

نظریه بازی‌ها نشان می‌دهد اگر هر دو قیمت را کاهش دهند، به جنگ قیمتی می‌رسند که به ضرر هر دو است. اما اگر هماهنگ عمل کنند (حتی بدون گفتگوی مستقیم)، می‌توانند به تعادل بهتری برسند.

بخش سوم: هوش مصنوعی به عنوان مترجم و پیش‌بین

هوش مصنوعی امروزه می‌تواند:

- داده‌های پراکنده را مانند یک کارآگاه خبره کنار هم بچیند (ترکیب نظریه اطلاعات)
- منظور واقعی ایمیل‌ها و گزارش‌ها را بفهمد (تحلیل معنایی)

- نتایج احتمالی هر تصمیم را شبیه‌سازی کند (نظریه بازی‌ها)
مثال کاربردی: بانکی که می‌خواهد نرخ سود وام‌ها را تعیین کند:
۱. هوش مصنوعی ابتدا داده‌های اقتصادی را غربال می‌کند (کاهش آنتروپی) ۲. اخبار و تحلیل‌های اقتصادی را می‌فهمد (تحلیل معنایی) ۳. واکنش احتمالی رقبا و مشتریان را پیش‌بینی می‌کند (نظریه بازی‌ها) ۴. در نهایت چند سناریو با احتمال موفقیت هر کدام ارائه می‌دهد.

بخش چهارم: داستان‌های واقعی از ترکیب این ابزارها
۱. آمازون در جنگ قیمتی:
- از نظریه اطلاعات برای تشخیص الگوهای خرید استفاده کرد
- با تحلیل معنایی نظرات مشتریان را فهمید
- با مدل‌های بازی‌ها واکنش والمارت را پیش‌بینی کرد
- نتیجه: سیستم قیمت‌گذاری پویایی ساخت که بدون جنگ تمام‌عیار، سهم بازار را گرفت

۲. مدیریت همه‌گیری:
- آنتروپی داده‌های سلامت عمومی اندازه‌گیری شد
- تحلیل معنایی به درک شایعات کمک کرد
- نظریه بازی‌ها رفتار مردم در برابر محدودیت‌ها را پیش‌بینی کرد
- نتیجه: سیاست‌های بهداشتی هدفمندتر طراحی شد

چرا این ترکیب انقلابی ایجاد می‌کند؟
۱. تصمیم‌گیری بر اساس داده، نه حدس: مثل داشتن چراغ قوه در اتاق تاریک ۲. درک لایه‌های پنهان: کشف معانی پشت اعداد و ارقام ۳. پیش‌بینی حرکت رقبا: شبیه شطرنج بازی که چند حرکت بعد را می‌بینند ۴. سازگاری پویا: توانایی تغییر استراتژی با شرایط جدید.

هشدارهای مهم در مسیر استفاده:
۱. هوش مصنوعی هم خطا می‌کند: مثل دستیار باهوشی که گاهی سوءتفاهم دارد ۲. رقابت همیشه عقلانی نیست: انسان‌ها گاهی غیرمنطقی عمل می‌کنند ۳. اطلاعات بیش از حد هم خطرناک است: مانند نور شدید که به جای روشن کردن، کور می‌کند ۴. اخلاق و حریم خصوصی: مرز باریک بین تحلیل داده و نقض حریم شخصی

آینده این ترکیب جادویی
تصور کنید در آینده‌ای نزدیک:
- سیستم‌ها قبل از شما می‌فهمند چه تصمیمی باید بگیرید
- جلسات استراتژی با شبیه‌سازی دیجیتال رقبا برگزار می‌شود
- گزارش‌ها خودشان تحلیل و خلاصه می‌شوند و فقط گزینه‌ها ارائه می‌شوند

اما نکته کلیدی اینجاست: این فناوری‌ها جای مدیران را نمی‌گیرند، بلکه مثل عینک و سمعک پیشرفته، قوه تشخیص آن‌ها را تقویت می‌کنند. بهترین تصمیم‌گیرندگان آینده کسانی هستند که بدانند چگونه این ابزارها را به خدمت بگیرند، نه اینکه اسیر آن‌ها شوند.

تکمله‌ها

«داده‌های اضافی چکسام» یا Checksum Redundant Data مفهومی است که به فرآیند استفاده از چکسام (Checksum) برای تشخیص خطا در داده‌ها اشاره دارد، و در آن داده‌هایی اضافه بر اطلاعات اصلی (redundant data) برای بررسی صحت داده به کار می‌روند.
تعریف ساده:
چکسام یک کد عددی یا هگزادسیمال است که از یک قطعه داده (مثلاً فایل، بسته شبکه یا پیام) تولید می‌شود. این کد، خلاصه‌ای از داده است. در صورتی که داده در مسیر انتقال یا ذخیره‌سازی دچار تغییر شود، مقدار چکسام نیز تغییر خواهد کرد. داده‌های اضافی چکسام همان اطلاعاتی هستند که همراه داده اصلی ذخیره یا منتقل می‌شوند تا بعداً برای بررسی درستی داده استفاده شوند.

چکسام چگونه کار می‌کند؟
۱. یک تابع خاص مانند CRC۳۲، MD۵، SHA۱ یا توابع ساده‌تر روی داده اجرا می‌شود.
۲. نتیجه‌ی این تابع، چکسام نامیده می‌شود.

۳. هنگام خواندن یا دریافت داده، دوباره چکسام محاسبه می‌شود و با مقدار اصلی مقایسه می‌شود.
۴. اگر تفاوت وجود داشته باشد، یعنی داده دچار خطا یا تغییر شده است.

داده‌های اضافی چکسام در کجا استفاده می‌شوند؟
در پروتکل‌های شبکه مثل TCP/IP، UDP، FTP برای اطمینان از سالم رسیدن بسته‌ها
در سیستم‌های فایل و ذخیره‌سازی برای بررسی درستی داده‌های ذخیره‌شده مثل ZFS
در دانلود فایل‌ها برای بررسی صحت فایل پس از دریافت مثلاً وقتی فایل ISO یک سیستم‌عامل را از اینترنت می‌گیری و سایت مقدار SHA۲۵۶ یا MD۵ آن را قرار داده است.
مثال ساده:
فرض کنید فایلی به اندازه ۱ مگابایت دارید. سیستم برای آن یک چکسام تولید می‌کند، مثلاً:
Checksum = A۴B۷C۹۳۲
این مقدار در کنار فایل ذخیره یا ارسال می‌شود. بعداً اگر کسی این فایل را باز کند و دوباره چکسام آن را حساب کند، باید دقیقاً همان مقدار قبلی را به دست آورد. اگر نه، یعنی فایل تغییر کرده یا آسیب دیده است.
تفاوت چکسام با رمزنگاری یا هش امنیتی:
چکسام برای تشخیص خطا است، نه حفاظت امنیتی.
توابع چکسام ساده‌تر و سریع‌تر از الگوریتم‌های هش رمزنگاری هستند.
الگوریتم‌های هش رمزنگاری مانند SHA-۲۵۶ مقاوم در برابر حمله هستند، اما چکسام‌ها ممکن است در برابر حملات هدفمند آسیب‌پذیر باشند.

آنتروپی متقابل (Cross-Entropy) با زبان ساده:
فرض کنید یک معلم هست که به شاگردانش می‌گوید:
(احتمال داره فردا هوا آفتابی باشه؟ بارونی باشه؟ ابری باشه؟)
و شاگرد جواب می‌ده:
آفتابی: ۹۰٪
بارونی: ۵٪
ابری: ۵٪
اما واقعاً فردا هوا بارانی می‌شود.
حالا ما می‌خواهیم بفهمیم که پیش‌بینی شاگرد چقدر اشتباه بوده.
اینجاست که «آنتروپی متقابل» وارد می‌شه:
هر چقدر پیش‌بینی شاگرد با واقعیت فاصله بیشتری داشته باشه، آنتروپی متقابل بیشتر می‌شود.
اگه دقیق حدس زده باشد، آنتروپی متقابل خیلی کم می‌شود (نزدیک به صفر).
هدف: آموزش مدل (یا شاگرد!) بطوری که کم‌کم آنتروپی متقابلش به صفر نزدیک بشود = پیش‌بینی دقیق‌تر.

رمزنگاری AES با زبان ساده:
فرض کنید می‌خواهید پیامی مثل:
(سلام دوست من) را برای یک نفر بفرستید، ولی نمی‌خواهید کسی دیگه آن رو بخواند.
چه‌کار می‌کنید؟ رمزنگاری!
AES (Advanced Encryption Standard) یک روش خیلی معروف برای این کار است.
چطور کار می‌کند؟ خیلی ساده:
۱. شما و دوستتان یک کلید رمزنگاری مشترک دارید (مثل یک رمز عبور مخفی).
۲. شما با این کلید، پیام را تبدیل می‌کنید به یک سری حروف عجیب‌غریب مثلاً: xp۹kL@۱$gT...
۳. آن پیام رمزی را می‌فرستید.
۴. دوستتان با همان کلید، پیام را برمی‌گرداند به شکل اصلی: (سلام دوست من.)

چرا AES خوبه؟
سریع و امنه
در بانک‌ها، گوشی‌ها، اینترنت، وای‌فای و حتی رمز فایل‌ها استفاده می‌شود.
اگر کسی کلید را نداشته باشد، نمی‌تواند رمز را بشکند (مگر با ابرکامپیوترها و هزاران سال زمان!)
تفاوت با آنتروپی متقابل:
آنتروپی متقابل رمزنگاری AES
مربوط به یادگیری ماشین و اندازه‌گیری دقت پیش‌بینی‌هاست مربوط به حفاظت از اطلاعات و رمزگذاری پیام‌هاست خطای

پیش‌بینی را اندازه می‌گیرد داده‌ها را به شکلی رمزگذاری می‌کند که فقط افراد مجاز بتوانند بخوانند(استفاده در آموزش مدل‌ها استفاده در امنیت اطلاعات)

«One-Time Pad» (پد یک‌بار مصرف):
One-Time Pad (OTP) یعنی چه؟
(رمزنگاری با پد یک‌بار مصرف) امن‌ترین روش رمزنگاری در تئوری است.
ایده‌اش خیلی ساده است:
برای هر حرف از پیام اصلی، یه حرف کاملاً تصادفی درست به اندازه همان پیام ساخته می‌شود، و با آن ترکیب می‌شود تا پیام رمزی تولید بشود.
یه مثال ساده با الفبا:
فرض کنید پیام اصلی این باشد:
پیام: H E L L O
حالا یه کلید کاملاً تصادفی و به همان اندازه می‌سازیم:
کلید: X Q J B Z
حالا هر حرف پیام با کلید ترکیب می‌شود (مثلاً با روش XOR یا جمع‌کردن موقعیت حروف در جدول الفبا) و نتیجه می‌شود پیام رمزی.
رمزنگاری:
H + X _ حرف رمزی ۱
E + Q _ حرف رمزی ۲
L + J _ حرف رمزی ۳
نتیجه: یک متن رمزی کاملاً بی‌معنی مثل:
رمز: Z L U W N
حالا چطور رمز را باز می‌کنیم؟
کسی که پیام را می‌گیرد، اگر همان کلید دقیق و کامل را داشته باشد، می‌تواند با عملیات معکوس (مثلاً کم‌کردن حروف) پیام اصلی را بازیابی کند.
چرا خیلی امنه؟
One-Time Pad در تئوری غیرقابل شکست است، به ۳ شرط:

۱. کلید کاملاً تصادفی باشد
۲. به‌اندازه‌ی پیام باشد (نه کوتاه‌تر)
۳. فقط یک‌بار استفاده بشود (اگه دوباره استفاده شود، آسیب‌پذیره)

اگر این ۳ شرط رعایت بشود، هیچ کسی حتی با نامحدود قدرت پردازشی نمی‌تواند پیام را رمزگشایی کند مگر اینکه کلید را داشته باشد.
چرا در عمل زیاد استفاده نمی‌شود؟
چون :ساختن و نگهداری کلیدهای کاملاً تصادفی برای هر پیام خیلی سخت است.
باید کلید را به‌صورت امن به طرف مقابل برسانید (که خودش یک دردسر است!) و فقط برای پیام‌های کوتاه کاربردی‌تر ا ست .

خلاصه ساده:

نوع رمزنگاری بسیار امن (غیرقابل شکستن اگر درست استفاده بشود) کلید تصادفی، به اندازه پیام، یک‌بار مصرف استفاده در اطلاعات فوق‌محرمانه (مثلاً در جنگ جهانی دوم یا دیپلماسی) نقطه ضعف سختی در مدیریت کلیدها

منابع برای مطالعه عمیقتر:

۱. Gleick, J. (۲۰۱۱). *The Information: A History, a Theory, a Flood*.
۲. Stone, J. V. (۲۰۱۵). *Information Theory: A Tutorial Introduction

استراتژی‌ها، فرآیندها و ریسک‌های تامین

احسان مرتضوی

چکیده

تامین به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت زنجیره تامین، نقشی حیاتی در تضمین پایداری و رقابت‌پذیری سازمان‌ها ایفا می‌کند. استراتژی‌های تامین شامل تصمیماتی کلیدی در زمینه انتخاب تامین‌کنندگان، برون‌سپاری، تنوع‌بخشی و ایجاد روابط بلندمدت است که می‌تواند بر هزینه، کیفیت و انعطاف‌پذیری سازمان اثرگذار باشد.

فرآیندهای تامین نیز از شناسایی نیاز و انتخاب منابع مناسب تا ارزیابی عملکرد و مدیریت قراردادها را دربر می‌گیرند و کارایی آن‌ها ارتباط مستقیمی با موفقیت سازمان دارد. در کنار این موارد، ریسک‌های تأمین نظیر نوسانات بازار، وابستگی به تامین‌کننده، مشکلات لجستیکی و ریسک‌های ژئوپلیتیکی می‌توانند به شدت بر زنجیره تامین تأثیرگذار باشند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مدیریت کارآمد استراتژی‌ها و فرآیندهای تأمین، همراه با شناسایی و کاهش ریسک‌ها، عاملی کلیدی در ایجاد مزیت رقابتی پایدار و افزایش تاب‌آوری سازمان‌ها محسوب می‌شود.

مقدمه

مدیریت تامین یکی از مباحث بنیادین در حوزه مدیریت عملیات و زنجیره تامین است که بر تضمین دسترسی به منابع، مواد اولیه و خدمات موردنیاز سازمان تمرکز دارد. اهمیت این حوزه در سال‌های اخیر، با افزایش جهانی‌سازی، رقابت شدید و نوسانات اقتصادی بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است.

استراتژی‌های مناسب تامین می‌توانند به سازمان‌ها کمک کنند تا در شرایط عدم قطعیت بازار، انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشند. از سوی دیگر، فرآیندهای استاندارد و کارآمد تامین، ضامن تحقق اهداف کیفی و کمی سازمان هستند. اما ریسک‌های متنوعی همچون نوسان قیمت‌ها، تحریم‌ها و مشکلات حمل‌ونقل همواره تهدیدی جدی برای زنجیره تامین محسوب می‌شوند.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱. استراتژی‌های تامین

مدیریت استراتژی‌های تامین به عنوان یکی از ارکان‌های اصلی زنجیره تامین، نقش تعیین کننده‌ای در کاهش هزینه‌ها، افزایش کیفیت و ارتقای تاب آوری سازمان‌ها دارد. انتخاب استراتژی مناسب در فرآیند تامین می‌تواند بر رقابت‌پذیری و پایداری سازمان اثرگذار باشد.

یافته‌ها نشان می‌دهد که هر یک از رویکردها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود بوده و انتخاب آنها باید بر اساس ماهیت کالا یا خدمت، میزان اهمیت و استراتژیک بودن آن، ریسک‌های محیطی، و اهداف کلان سازمان صورت گیرد.

در نهایت، ترکیب هوشمندانه و پویا از استراتژی‌های تامین می‌تواند ضمن افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های، مزیت رقابتی پایدار و انعطاف‌پذیری بیشتری برای سازمان ایجاد کند.

تامین تک منبعی (Single Sourcing):

مزایا:

- روابط بلند مدت و استراتژیک با تامین کننده
- افزایش کیفیت و پشتیبانی فنی
- کاهش هزینه های تراکنش و لجستیک

معایب و ریسک ها:

- وابستگی بالا به یک منبع
- ریسک توقف تولید درصورت بروز مشکل در تامین کننده
- ریسک تاثیر پذیری تولید کالا در صورت بروز هرگونه اختلاف نظر با شرکت تولید کننده
- ریسک سوء استفاده تامین کننده از موقعیت استراتژیک خود

تامین چند منبعی (Multiple Sourcing):

مزایا:

- کاهش ریسک کمبود یا توقف تامین
- ایجاد رقابت و کاهش قیمت

معایب:

- پیچیدگی در مدیریت زنجیره تامین
- احتمال تفوت کیفیت بین منابع مختلف

تامین محلی (Local Sourcing):

مزایا:

- کاهش هزینه های حمل و نقل
- افزایش انعطاف پذیری در تحویل
- پشتیبانی از اقتصاد محلی
- بهرمندی از خدمات پس از فروش در کمترین زمان ممکن
- کاهش زمان و هزینه های مربوط به ترخیص کالا از گمرک

معایب:

- محدودیت در ظرفیت و فناوری
- احتمال قیمت بالاتر نسبت به تامبن کنندگان بین المللی

تامین جهانی (Global Sourcing):

مزایا:

- دسترسی به فناوری و کیفیت بالاتر
- کاهش هزینه مواد اولیه به دلیل تفاوت نرخ ها
- وسیع بودن تعداد منابع و موجب آن افزایش قدرت انتخاب

معایب:

- ریسک های سیاسی، گمرکی و ارزی
- افزایش زمان تحویل

تامین استراتژیک (Partnership Sourcing):

مزایا:

- بهبود نوآوری و توسعه مشترک محصول
- کاهش ریسک از طریق شفافیت و اعتماد متقابل

معایب:

- نیازمند سرمایه گذاری زمانی و مالی برای ایجاد اعتماد
- کاهش انعطاف در تغییر تامین کننده

تامین برون سپاری (Outsourcing):

مزایا:

- تمرکز بر شایستگی های اصلی سازمان
- کاهش هزینه های سرمایه گذاری داخلی

معایب:

- وابستگی به پیمانکاران بیرونی
- احتمال افت کیفیت درصورت عدم کنترل دقیق

تامین بر اساس تقاضا (Just in Time - JIT):

مزایا:

- کاهش هزینه انبارداری
- بهبود جریان نقدی

معایب:

- ریسک توقف تولید درصورت تاخیر جزئی
- نیازمند سیستم لجستیک دقیق و قابل اعتماد

تامین مبتنی بر ریسک (Risk-Based Sourcing):

مزایا:

- افزایش تاب آوری زنجیره تامین
- کاهش آسیب پذیری در شرایط بحرانی

معایب:

- زمان بر بودن فرآیند ارزیابی و مدیریت ریسک

با توجه به موارد عنوان شده فوق، انتخاب استراتژی تامین مناسب باید با توجه به موارد زیر صورت پذیرد. بکارگیری ترکیب هوشمندانه‌ای از این استراتژی‌ها می‌تواند مزیت رقابتی پایدار برای سازمان ایجاد کند.

- اهمیت کالا
- هزینه و ریسک
- زمان تحویل
- ظرفیت تامین کنندگان
- اهداف کلان سازمان

۲. فرآیندهای تامین

۱. تعریف و اهمیت فرآیندهای تامین

فرآیند تامین مجموعه‌ای از فعالیت‌های سیستماتیک است که از شناسایی نیاز تا تحویل و ارزیابی نهایی تامین کننده را شامل می‌شود. اهمیت آن در کاهش هزینه‌ها، افزایش کیفیت، کاهش ریسک و بهبود رقابت‌پذیری سازمان است.

۲. مراحل اصلی فرآیند تامین

- شناسایی نیاز: مشخص کردن کالا یا خدمت مورد نیاز، بررسی امکان تولید داخلی یاخرید
- برنامه‌ریزی و استراتژی: انتخاب روش خرید (مناقصه، مذاکره، قرارداد بلند مدت و ...)
- درخواست خرید (Requisition): مستندسازی مشخصات فنی و شرایط خرید
- شناسایی و ارزیابی تامین کنندگان: جمع آوری اطلاعات، پیش صلاحیت (Prequalification)
- درخواست پیشنهاد و مقایسه (RFQ/RFP): دریافت پیشنهادها و تحلیل فنی و مالی
- مذاکره و انتخاب نهایی: تعیین شرایط پرداخت، قیمت و زمان تحویل
- صدور سفارش یا قرارداد: ارسال Purchase Order یا قرارداد رسمی
- تحویل و بازرسی: کنترل کیفیت و تایید دریافت کالا یا خدمت
- پرداخت و تسویه حساب: انجام پرداخت‌ها طبق قرارداد
- ارزیابی عملکرد تامین کننده: سنجش کیفیت، تحویل به موقع، خدمات پس از فروش
- بهبود مستمر: تحلیل نتایج و اصلاح فرآیندها برای خریدهای آینده

۳. عوامل کلیدی موفقیت در فرآیند تامین

- شفافیت و مستندسازی دقیق در مراحل خرید
- انتخاب صحیح تامین کنندگان
- مدیریت ریسک (ریسک‌های سیاسی، مالی و لجستیک)
- فناوری و دیجیتال‌سازی (ERP, e-Procurement)
- همکاری استراتژیک با تامین کنندگان

۴. چالش‌های رایج فرآیند تامین

- طولانی بودن زمان تامین در پروژه‌های بزرگ
- نوسانات قیمت و نرخ ارز
- مشکلات لجستیکی و حمل و نقل
- تغییر نرخ و قوانین ترخیص کالا از گمرک
- ضعف در ارزیابی و انتخاب تامین کننده مناسب
- عدم هم سویی استراتژی تامین با اهداف کلان سازمان

۵. رویکردهای نوین در فرآیند تامین

- تامین الکترونیکی (e-Procurement): استفاده از پلتفرم های دیجیتال برای شفافیت و سرعت در فرآیند تامین
- تامین پایدار (Sustainable Procurement): توجه به مسائل زیست محیلی و اجتماعی در انتخاب تامین کنندگان
- مدیریت ریسک در تامین: به کارگیری روش‌های تحلیل ریسک برای افزایش تاب آوری زنجیره تامین
- هوش مصنوعی و داده کاوی: پیش بینی نیازها، تحلیل بازار و بهینه‌سازی تصمیم گیری

۳. ریسک‌های تامین

فرآیند تامین به عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت زنجیره تامین، نقشی حیاتی در موفقیت سازمان‌ها دارد. با این حال، این فرآیند همواره در معرض انواع ریسک‌ها قرار دارد که می‌توانند بر هزینه، کیفیت، زمان و حتی شهرت سازمان تأثیر منفی بگذارند. مدیریت ریسک‌های تامین به‌ویژه در محیط‌های جهانی و پویا اهمیت دوچندان دارد.

دسته بندی ریسک‌های تامین

ریسک‌های تامین را می‌توان به چند دسته اصلی تقسیم کرد:

۱. ریسک های تامین کننده (Supplier Risk)

- ریسک ورشکستگی و یا خروج وندور از بازار
- ریسک کیفیت پایین کالا یا خدمات
- ریسک تاخیرد درتحویل
- ریسک عدم رعایت استانداردهای قانونی یا زیست محیطی

۲. ریسک های فرآیندی (Process Risks)

- خطاهای داخلی در فرآیند خرید (به عنوان مثال انتخاب نادرست تامین کننده)
- ضعف در ارتباطات و هماهنگی بین بخش ها
- هزینه های پنهان ناشی از ناکارآمدی فرآیندها

۳. ریسک های لجستیکی (Logistics Risks)

- اختلال در حمل و نقل (بلایای طبیعی، اعتصابات، مشکلات مرزی و ...)
- افزایش هزینه های ناگهانی حمل و نقل
- عدم قابلیت ردیابی و شفافیت در زنجیره تامین

۴. ریسک های مالی (Financial Risks)

- نوسانات نرخ ارز در تامین بین المللی
- افزایش قیمت مواد اولیه یا کالا
- مشکلات پرداخت و نقدینگی تامین کنندگان

۵. ریسک ها محیطی و ژئوپلیتیکی (Environmental & Geopolitical Risks)

- تغییر قوانین و مقررات تجاری
- تحریم ها و محدودیت های بین المللی
- بلایای طبیعی و بحران های بهداشتی (مانند پاندمی کرونا)

مدیریت و کاهش ریسک‌های تامین

برای مقابله با ریسک‌های تامین عنوان شده، سازمان‌ها می‌توانند استراتژی‌های زیر را مدنظر قرار دهند:

- تنوع بخشی به تامین کنندگان (Supplier Diversification)
- ارزیابی و پایش مستمر تامین کنندگان (Supplier Auditing & Monitoring)
- انعقاد قراردادهای شفاف با بندهای مربوط به ریسک
- ایجاد همکاری‌های استراتژیک و روابط بلندمدت با تامین کنندگان
- استفاده از فناوری‌های دیجیتال برای ردیابی و شفافیت در زنجیره تامین
- ثبت تجارب، مشکلات و موانع بوجود آمده در پروژه‌ها
- استفاده از درس آموخته‌های خریدهای قبلی

آسیب‌های اقتصادی ناشی از نادیده گرفتن ریسک‌های تامین و انتخاب نامناسب وندورها

نوع آسیب‌های اقتصادی، شرح آسیب‌ها و تاثیر آسیب‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- افزایش هزینه‌های (مستقیم و غیر مستقیم): درصورتی‌که تامین کننده تعهدات قراردادی خود را رعایت ننماید، شرکت مجبور است هزینه‌های اضافی صرف بازسازی، اصلاح، حمل و نقل اضطراری و یا خرید جایگزین را بپذیرد که تاثیرات آن شامل کاهش سودآوری، افزایش ریسک‌ها و هزینه تمام شده محصول برای شرکت خواهد بود که مواردی به عنوان مثال در ذیل ذکر شده است.
  ۱. خرید با قیمت بالاتر به علت ضعف در مذاکره یا انحصار تامین کننده
  ۲. هزینه‌های دوباره کاری و ضایعات ناشی از کیفیت موارد اولیه یا خدمات
  ۳. هزینه‌های پنهان شامل بازرسی اضافی، آزمون و کنترل کیفیت
- کاهش درامد و فرصت‌های ازدست رفته: تاخیر در تحویل کالا یا خدمات باعث تاخیر در عرضه به بازار یا از دست رفتن فرصت‌های فروش خواهد شد که تاثیرات آن شامل کاهش سهم بازار و مراجعه مشتریان به رقبای دیگر می‌باشد.
- کاهش بهره‌وری و کارایی عملیاتی: اختلال در جریان موارد اولیه یا خدمات پشتیبانی باعث توقف خطوط تولید یا وقفه در پروژه می‌گردد که منجر به افزایش هزینه‌های سربار (مانند هزینه‌های نگهداری، نیروی بیکار) خواهد شد.
- هزینه‌های اصلاحی پس از فروش و گارانتی: محصولات معیوب یا با کیفیت پایین ممکن است باعث بازگشت کالا یا خدمات پس از فروش شوند که موجب تحمیل هزینه‌هایی بسیار گرانتر از پیشگیری خواهد شد.
- آسیب به شهرت و هزینه بازسازی اعتماد: درصورتی‌که مشتریان متوجه استفاده شرکت از برندهای فاقد کیفیت و نامناسب شوند این موضوع موجب کاهش اعتماد به برند شرکت خواهد شد و ممکن است نیاز به سرمایه گذاری در تبلیغات جبران، کاهش قیمت و یا تخفیفات ویژه با هدف جبران اعتماد از دست رفته باشد.
- افزایش ریسک‌های مالی و قراردادی: اگر تامین کننده با مقررات قانونی، فنی و یا زیست محیطی یا قرارداد شرکت مطابقت نداشته باشد، شرکت ممکن است در معرض دعاوی حقوقی یا جریمه قرار گیرد که ممکن است موجب پرداخت جریمه، هزینه وکالت و یا جبران خسارات گردد که برخی موارد به عنوان مثال به شرح ذیل مطرح شده است.
  ۱. جرائم ناشی از تاخیر در تحویل پروژه های یا محصولات به مشتریان
  ۲. هزینه‌های حقوقی و شکایت به دلیل نقض قرارداد با وندور
  ۳. از دست رفتن سرمایه گذاری‌های انجام شده در پروژه‌های وابسته به تامین کننده
- افزایش وابستگی و کاهش قدرت چانه زنی: اگر تامین کننده نتواند در بحران‌ها یا تغییرات بازار پاسخگوی تعهدات قراردادی باشد، شرکت مجبور است منابع مالی بیشتری برای ذخیره‌سازی، تنوع تامین یا سرمایه در گردش در نظر بگیرد.
  ۱. وابستگی به یک وندور خاص و در نتیجه تحمل افزایش قیمت
  ۲. عدم امکان تنوع بخشی به منابع تامین در شرایط بحرانی
  ۳. کاهش انعطاف‌پذیری در مدیریت زنجیره تامین
- افزایش ریسک مالی و اعتباری: تمرکز تامین روی تعداد کم تامین کننده یا تامین کننده‌ای با وضعیت مالی ضعیف می‌تواند شرکت را در برابر ورشکستگی تامین کننده آسیب پذیر نماید که ممکن است موجب آسیب به اعتبار شرکت و افزایش هزینه‌ها گردد.
- پیامدهای بلند مدت اقتصادی:
  ۱. کاهش سهم بازار در بلند مدت
  ۲. کاهش سودآوری و بازده سرمایه
  ۳. افزایش هزینه سرمایه گذاری جایگزین (تغییر وندور یا اصلاح زنجیره تامین در آینده)

اطلاعات عددی و آماری درخصوص میزان آسیب های وارده به شرکت ها که ناشی از نادیده گرفتن ریسک های تامین بوده است به شرح ذیل می باشد.

بر اساس بررسی گزارش‌های آماری موجود در سایت Economist Impact، اختلالات زنجیره تامین به طور متوسط معادل ۶٪ تا ۱۰٪ درآمد سالانه برای شرکت‌ها هزینه دارد. این در حالی است که طبق گزارش مندرج در سایت Anvyl تقریبا ۶۰٪ شرکت‌های کوچک و متوسط گزارش کرده‌اند که تاخیر در زنجیره تامین به از دست رفتن تا ۱۵٪ یا بیشتر از درآمد آنها منجر شده است.

- شرکت‌های بزرگ برآورد کرده‌اند که ۰/۵ تا ۱ میلیارد دلار به ازاء هر حادثه در زنجیره تامین از دست داده‌اند (منبع Deloitte Italia).
- شرکت‌های کوچک و متوسط (SMB) گزارش داده‌اند که تا ۱۵٪ از درآمد خود را به دلیل تاخیرات زنجیره تامین در مواردی از دست داده‌اند. این عدد نشان دهنده میزان ضربه مستقیم به فروش می‌باشد (منبع Supply & Demand Chain Executive).
- نزدیک به ۸۰٪ از سازمان‌ها طی یک افق زمانی یک ساله حداقل یک اختلال قابل توجه در زنجیره تامین را تجربه کرده‌اند که نشان دهنده فراگیر بودن این ریسک می‌باشد (منبع The Business Continuity Institute).
- گزارش‌های مشاوره‌ای و PwC نشان می‌دهد که «تحول زنجیره تامین» و هزینه‌های انطباق پیچیده می‌تواند سهم زیادی از هزینه‌های عملیاتی را گرفته و ۷۰-۸۰٪ سازمان‌ها برنامه‌هایی برای تغییر یا مقاوم‌سازی در دستور کار دارند (منبع PwC).

شاخص‌ها و فرمول های پایه برای تحلیل اثرات قیمتی

- سود سالانه

$$M \times R = \text{Profit}$$

- زیان مورد انتظار سالانه از یک ریسک خاص (Expected Annual Loss, EAL)

$$L \times r^P = EAL$$

و اگر L را به صورت درصدی از درآمد یا سود تعریف کنیم.

$$R \times a = L$$

- زیان مورد انتظار کل (چند ریسک)

$$\sum_i L \times {}_{r,i}P = {}_{total}\text{EAL}$$

- اثر بر قیمت یا حاشیه

اگر زیاد مورد انتضار به صورت افزایش هزینه های تولید (مثلا به دلیل تغییر وندور، حمل اضافی، جریمه ها) باشد، می توان افزایش درصدی قیمت تمام شده را به روش زیر محاسبه کرد. $\frac{{}_{total}\text{EAL}}{R} = \%\ \Delta\text{CoGS}$

سپس می توانید تاثیر بر حاشیه را بازنویسی کنید. $\%\ \Delta\text{CoGS} - M = {}_{new}M$

شرح نماد ها: R = درآمد سالانه، M = حاشیه سود (نسبت)، r^P = احتمال وقوع آن ریسک در یک سال، L = تاثیر مالی (زیان) درصورتی‌که ریسک رخ دهد.

توصیه‌های عملی

- جمع آوری داده‌های داخلی: تاریخچه تاخیرها، درصد مرجوعی، هزینه‌های تعویض وندور، جریمه‌ها، افزایش قیمت مواد.
- پیاده‌سازی ماتریس ریسک با ستون‌های: احتمال، تاثیر (در قیمت)، ESL، اقدام کاهش
- اجرای یک شبیه‌سازی مونت کارلو ساده برای برآورد توزیع زیان سالانه
- بررسی پوشش بیمه‌ای و هزینه‌های آن در مقابل EAL

۴. مرور پژوهش‌ها

تحقیقات نشان داده است سازمان‌هایی که به جای رویکرد سنتی خرید، استراتژی‌های پیشرفته تأمین و مدیریت ریسک را به کار می‌گیرند، از پایداری و انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار می‌شوند. (Christopher ,۲۰۲۱؛ Chopra & Meindl ,۲۰۱۶).

بحث

تحلیل مبانی نظری و تجربی نشان می‌دهد که موفقیت سازمان‌ها در حوزه تامین به ترکیب مناسب سه مؤلفه بستگی دارد: انتخاب استراتژی‌های صحیح، طراحی فرآیندهای کارآمد و مدیریت ریسک‌ها. استراتژی بدون فرآیند اجرایی مناسب به نتایج ملموس نمی‌انجامد و فرآیند بدون مدیریت ریسک ممکن است در شرایط بحرانی ناکام بماند. برای مثال، تنوع‌بخشی به تامین‌کنندگان می‌تواند از بروز ریسک‌های وابستگی جلوگیری کند، اما اگر فرآیند ارزیابی کیفیت و عملکرد به‌درستی اجرا نشود، نتایج مطلوب حاصل نخواهد شد. از این رو، سازمان‌ها باید یک رویکرد یکپارچه و سیستماتیک در مدیریت تأمین اتخاذ کنند.

نتیجه‌گیری

مدیریت استراتژی‌ها، فرآیندها و ریسک‌های تامین یکی از کلیدی‌ترین عوامل موفقیت سازمان‌ها در محیط رقابتی امروز است. استراتژی‌های تامین به سازمان‌ها جهت‌گیری بلندمدت می‌دهند، فرآیندها ضامن اجرای کارآمد فعالیت‌ها هستند و مدیریت ریسک تضمین‌کننده تاب‌آوری و پایداری زنجیره تامین است.

در نتیجه، سازمان‌هایی که توانسته‌اند این سه مؤلفه را به‌صورت هماهنگ و یکپارچه مدیریت کنند، از مزیت رقابتی پایدار و عملکرد بهینه برخوردار شده‌اند.

بر اساس نکات عنوان شده در این مقاله و با توجه به اهمیت و تاثیرگذار بودن موضوع تامین در پایداری و روند پیشرفت شرکت‌ها لازم است سازمان‌ها به صورت مستمر نسبت به بروز رسانی اطلاعات و وضعیت بازار و روش‌های تامین بر اساس متدهای جدید، استفاده از ابزارها و تکنولوژی‌های نوین، استفاده از روش‌های بررسی ریسک‌های دقیقتر و بهینه‌سازی فرآیندهای تامین با استفاده از تجارب پروژه‌ها و خریدهای قبلی و البته دانش روز اقدام نمایند.

منابع

۱. Christopher, M. (۲۰۱۶). Logistics & Supply Chain Management. Pearson Education.
۲. Chopra, S., & Meindl, P. (۲۰۲۱). Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. Pearson.
۳. Tang, C. S. (۲۰۰۶). Perspectives in Supply Chain Risk Management. International Journal of Production Economics, ۴۸۸-۴۵۱ ,(۲)۱۰۳.
٤. Wagner, S. M., & Bode, C. (۲۰۰۸). An Empirical Examination of Supply Chain Performance along Several Dimensions of Risk. Journal of Business Logistics, ۳۲۵-۳۰۷ ,(۱)۲۹.
۵. Heinis, S.; Services Procurement: A Systematic Literature Review of Practices and Challenges. (۲۰۲۲)
٦. Sanderson, J Theories about Procurement and Supply Chain Management. (NCBI Bookshelf)
۷. Science Direct “Procurement Process
۸. Jama, L. A.; The Impact of Procurement Practices on Organizational Performance
۹. Tang, C. S. (۲۰۰۶). Perspectives in supply chain risk management. International Journal of Production Economics, ۴۸۸-۴۵۱ ,(۲)۱۰۳.
۱۰. Harland, C., Brenchley, R., & Walker, H. (۲۰۰۳). Risk in supply networks. Journal of Purchasing and Supply Management, ۶۲-۵۱ ,(۲)۹.
۱۱. Zsidisin, G. A. (۲۰۰۳). Managerial perceptions of supply risk. Journal of Supply Chain Management, ,(۴)۳۹ ۲۵-۱۴.
۱۲. Christopher, M., & Peck, H. (۲۰۰۴). Building the resilient supply chain. International Journal of Logistics Management, ۱۴-۱ ,(۲)۱۵.
۱۳. Hoffmann, P., Schiele, H., & Krabbendam, K. (۲۰۱۳). Uncertainty, supply risk management and their impact on performance. Journal of Purchasing and Supply Management, ۲۱۱-۱۹۹ ,(۳)۱۹.
۱٤. Ivanov, D., & Dolgui, A. (۲۰۲۰). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. International Journal of Production Research, ۲۹۱۵-۲۹۰۴ ,(۱۰)۵۸.
۱۵. Kraljic, P. (۱۹۸۳). Purchasing must become supply management. Harvard Business Review, ۱۱۷-۱۰۹ ,(۵)۶۱.

آینده انرژی و فناوری‌های پایداری

محدثه طاهری، عمار میرزائی

چکیده

توافق سبز اهداف بلندپروازانه‌ای را تا سال ۲۰۵۰ برای اقلیم کربن خنثی اتحادیه اروپا تعیین می‌کند که نتایجی چون افزایش قیمت انرژی، گذار به یک سیستم انرژی مقرون به صرفه‌تر، امن‌تر و پاک‌تر در پی خواهد داشت. از همین روی، اقدامات متعددی را برای اجرای اصلاحات، از جمله ارتقای فناوری‌های صنعت انرژی و توسعه فناوری‌های جدید را الزام می‌کند.

در دوران گذار انرژی نه تنها کربن‌زدایی مسئله اصلیست، بلکه اطمینان از اینکه سیستم‌های جدید مقرون به صرفه، قابل اعتماد و رقابتی هستند جزو اهدافی هستند که در اولویت‌های بالای سیاست‌گذاری و استراتژی صنعتی قرار دارند.

طیف گسترده‌ای از نوآوری‌ها در حوزه‌های فناورانه انرژی و پایداری، با هدف تغییر چشم‌انداز انرژی جهانی به سمت پایدارتر و تاب‌آورتر کردن حوزه انرژی در حال پیشرفت است. عدم قطعیت‌های کلیدی نیز مسیر گذار انرژی را شکل می‌دهند. همچنین، جغرافیای هر کشور بر مسیر گذار انرژی در آن کشور تاثیر خواهد داشت.

اما نرخ پذیرش فناوری‌های انرژی و پایداری به طور قابل توجهی با یکدیگر متفاوت است که نشان دهنده تفاوت در بلوغ فناوری، قابلیت اقتصادی و زیرساخت‌های توانمندساز است. برخی، مانند انرژی خورشیدی- فتوولتائیک (PV) و انرژی بادی، در بیشتر مناطق جهان به سرعت در حال گسترش هستند.

در حال حاضر، چین در ظرفیت تولید پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک در سطح جهان پیشرو است، این در حالیست که هند در حال افزایش ظرفیت تولید خود بوده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۶ به دومین تولیدکننده بزرگ پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک تبدیل شود.

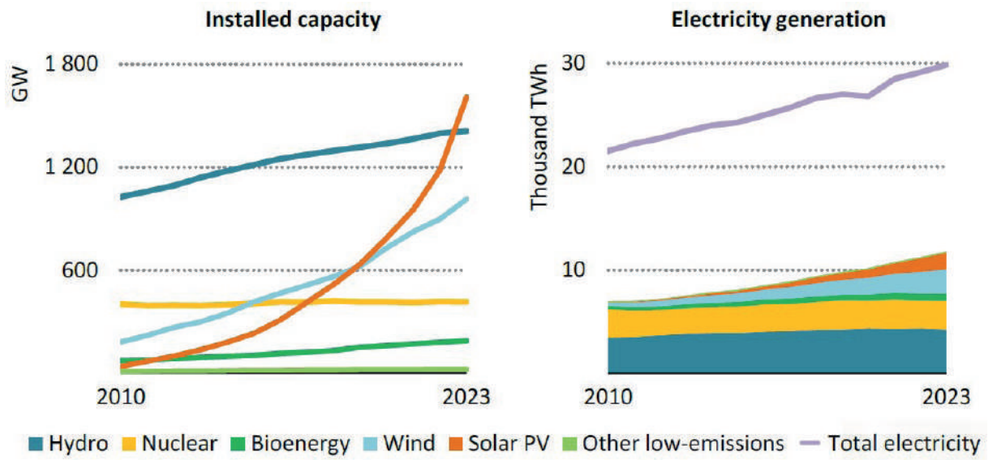
فناوری‌های دیگر، از جمله هیدروژن سبز و سیستم‌های ضبط کربن و سوخت‌های الکتریکی در مراحل نخست توسعه هستند. پذیرش برخی از این فناوری‌ها در مقیاس تجاری پیچیدگی دارد، چرا که فناوری‌های با آلایندگی کم نمی‌توانند عملکرد مشابهی نسبت به گزینه‌های با آلایندگی بالا ارائه دهند. چالش‌های فراتر از نکات فناورانه، مشتمل بر آمادگی زنجیره تأمین، در دسترس بودن نیروی کار و پیچیدگی‌های ساخت می‌شود. بدون پرداختن جامع به این چالش‌های به هم پیوسته، دستیابی به پذیرش گسترده و به حداکثر رساندن پتانسیل فناوری‌های مختلف انرژی همچنان دشوار خواهد بود [۱].

با در نظر گرفتن این موارد، در این مطالعه مروری بر وضعیت فناوری‌های مختلف شده و آخرین پیشرفت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

الف) روند افزایشی تقاضای برق و رشد تجدیدپذیرها

چنانچه در سمت راست شکل ۱ نشان داده شده، تقاضای الکتریسیته به جز سال‌های آغاز پاندمی کرونا، دائما در حال افزایش بوده است و شیب نمودار، نشان از تغییر جدی در آینده نزدیک نمی‌دهد [۲]. پس از پیشی گرفتن انرژی‌های پاک از انرژی‌های فسیلی در سال ۲۰۱۶ در جذب سرمایه، هر ساله بیشترین سرمایه‌گذاری در جهان در انرژی و سوخت‌های پاک صورت گرفته است. به طوری که سرمایه‌گذاری در انرژی و سوخت فسیلی از میزان ۱۱۴۵ میلیارد دلار سال ۲۰۱۶ به ۱۱۱۶ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۴ رسیده، این در حالیست که سرمایه‌گذاری در انرژی و سوخت‌های پاک از میزان ۱۲۰۸ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۶ به ۲۰۰۳ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۴ رسیده است [۳]. در راستای مسیر کربن زدایی از صنعت برق چالش‌های مهمی وجود دارد که به مهمترین آنها اشاره کرد:

- انعطاف‌پذیری در تولید و تقاضا برای ایجاد تعادل در الزامات بار پایه
- مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر، خصوصا خورشیدی و بادی، به دلیل ماهیت تناوبی آنها
- مقابله با موانع اقتصادی مانند کاهش قیمت‌های منابع تجدیدپذیر با توجه به روند دائمی کاهشی قیمت



شکل ۱. روند رو به رشد تقاضای الکتریسیته و تغییرات ظرفیت نصب شده انواع انرژی‌های پاک از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ [۲]

از نمونه‌های تجاری پیشرو، می‌توان به شرکت انگلیسی Oxford PV اشاره کرد که اخیرا نمونه تجاری فناوری خورشیدی پروسکایت را به مشتری آمریکایی خود تحویل داد [۱]. این پنل‌ها تا ۲۰ درصد انرژی بیشتری نسبت به پنل‌های سیلیکونی استاندارد تولید می‌کنند و راندمان ماژول آنها ۲۴/۵ درصد است که پیشرفت قابل توجهی در فناوری خورشیدی محسوب می‌شود.

در نمونه‌های نخستین که اخیرا توسط محققان موسسه فرانهوفر توسعه داده شده، راندمان ۳۶ درصد و حدود ۵۰ درصد بیشتر از نمونه‌های تجاری موجود گزارش شده است [۴]. در این تحقیق و با الهام از ذره بین، نور خورشید بر روی صفحات سلول خورشیدی متمرکز می‌شود و تیم توسعه دهنده آن با تأسیس یک استارتاپ به نام Clearsun Energy، در حال آماده‌سازی این فناوری برای ورود به بازار است. این پیشرفت می‌تواند گامی بزرگ برای ارزان‌تر و کارآمدتر کردن انرژی خورشیدی باشد و آن را به جایگزینی جذاب‌تر برای سایر منابع انرژی تبدیل کند [۵].

شرکت استارتاپی Boston Metal با استفاده از فناوری الکترولیز اکسید مذاب، انقلابی در تولید فولاد و استخراج فلزات با ارزش بالا ایجاد می‌کند. در فرآیند آن به جای سوخت‌های فسیلی از برق استفاده می‌شود و این پتانسیل را دارد که تا ۱۰ درصد از انتشار کربن جهانی را نسبت به روش سنتی فولادسازی کاهش دهد. در سال ۲۰۲۵، این شرکت با موفقیت بزرگترین راکتور خود را تا به امروز راه‌اندازی کرد که در یک دور راه‌اندازی بیش از یک تن فولاد تولید کرد [۱].

ب) هیدروژن

توجهات به سوی هیدروژن به عنوان گزینه مهم کربن زدایی و منبع و حامل تامین انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی به صورت روزافزون در حال افزایش است و پیشرفت‌های مداوم فناورانه و حمایت‌های سیاستی، زمینه رشد این توجهات را فراهم می‌کند. آنچه هیدروژن سبز را متمایز می کند، امکان تولید آن با انرژی‌های متناوب تجدیدپذیر و استفاده از آن به ذخیره‌ساز انرژی است. اگرچه هزینه‌های بالای تولید و پیشرفت کند، همچنان چالش‌هایی را ایجاد می‌کند، نوآوری‌ها در فناوری الکترولیز و ادغام با انرژی‌های تجدیدپذیر کم‌هزینه به تدریج چشم‌انداز توسعه سوخت هیدروژن را بهبود می‌بخشد.

چنانچه در شماره‌های ۱۵۹ و ۱۶۳ نشریه خبر مپنا اشاره شد اتحادیه اروپا با تصویب بودجه ۱۹ میلیارد یورویی در حال احداث خط لوله انتقال هیدروژن می‌باشد که بخش قابل توجهی آن در آلمان قرار دارد و مراکز بزرگ صنعتی را متصل می‌کند[۷,۶].

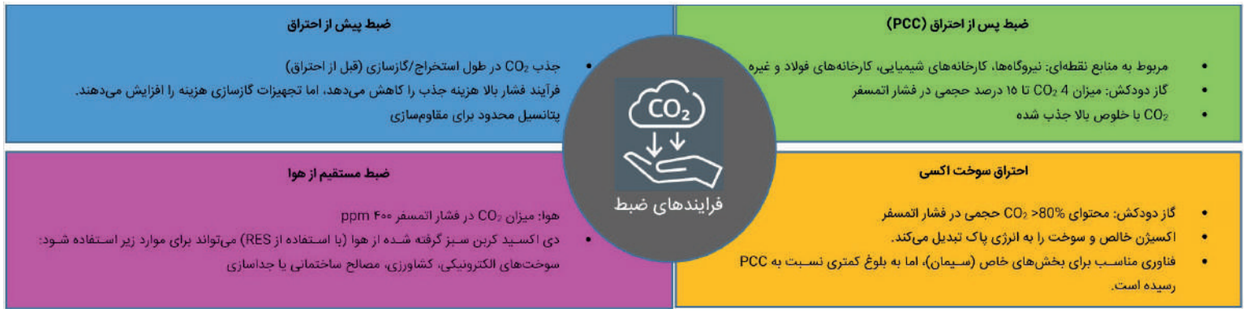
چین به سرعت در حال گسترش ظرفیت تولید الکترولیزر خود است و این نشان دهنده روند رو به رشدی است. همه این تغییرات، نشانه‌هایی از آغاز روندی در حوزه کربن‌زدایی می‌باشد.
از نمونه‌های پیشرفت تجاری فناوری، گسترش سریع ظرفیت ساخت الکترولیزر در چین است که اکنون به حدود ۶۰ درصد از تولید جهانی را رسیده است. هزینه‌های تجهیزات در چین کاهش یافته و این کشور را به عنوان تأمین‌کننده اصلی اقتصاد نوظهور هیدروژنی جهان قرار داده است، به طوری که انتظار می‌رود پروژه‌های این حوزه تا پایان سال ۲۰۲۴ از اهداف ملی فراتر روند. این افزایش، تولید مقرون‌به‌صرفه‌تر هیدروژن سبز را در سطح جهانی امکان‌پذیر کرده و توسعه‌دهندگان بین‌المللی پروژه را جذب می‌کند. حتی با وجود اینکه این بخش همچنان با چالش‌هایی در زمینه تأمین مالی پروژه، توسعه زیرساخت‌ها و هم تراز کردن عرضه انرژی تجدیدپذیر با تقاضای هیدروژن مواجه است.

ج) سوخت‌های زیستی و سوخت‌های الکتریکی

سوخت‌های الکتریکی سوخت‌هایی هستند که به کمک برق تجدیدپذیر و هیدروژن سبز تولید می‌شوند. سوخت‌های زیستی نیز سوخت‌های مایع یا گازی هستند که از منابع زیست‌توده تجدیدپذیر مانند گیاهان، جلبک‌ها یا زباله‌ها تولید می‌شوند. عدم قطعیت‌هایی در مورد تولید در مقیاس بزرگ و کاهش شکاف بین هزینه‌های سوخت‌های زیستی و سوخت‌های فسیلی متعارف باقی مانده، که رفع این چالش‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری مداوم و سیاست‌های حمایتی برای تسریع پذیرش فناوری‌های می‌باشد.
سوخت‌های سنتزی که از فناوری‌های ضبط کربن استفاده می‌نمایند، به عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای کربن‌زدایی از بخش‌هایی مانند هوانوردی، کشتیرانی و حمل و نقل جاده‌ای سنگین در حال ظهور هستند. شرکت سوئیسی Synhelion و دیگران در حال توسعه فرآیندهای تولید سوخت الکترونیکی هستند که مراحل سنتی را حذف می‌کنند و به طور بالقوه هزینه‌ها را کاهش می‌دهند.
در سال ۲۰۲۴، این شرکت اولین کارخانه در مقیاس صنعتی جهان که با استفاده از گرمای خورشیدی سوخت‌های مصنوعی تولید می‌کند را در یولیش آلمان افتتاح کرد. فرآیند این شرکت از انرژی خورشیدی متمرکز برای رسیدن به دمایی تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک راکتور ترموشیمیایی استفاده می‌کند که گاز مصنوعی را مستقیماً از CO۲ و آب تولید می‌کند. این امر می‌تواند هزینه‌های تولید را کاهش داده و راندمان کلی را بهبود بخشد [۱].

د) سیستم‌های ضبط کربن

استفاده از سیستم‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCUS) نقش حیاتی در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و قرار دادن جهان در مسیر رسیدن به انتشار صفر خالص دارد. آژانس بین‌المللی انرژی پیش‌بینی می‌کند که برای حفظ مسیر دستیابی به انتشار خالص صفر (NZE) تا سال ۲۰۵۰، در سال ۲۰۳۰ به ظرفیت حدود ۱ گیگاتن ضبط و ذخیره دی‌اکسید کربن در سال نیاز خواهد بود [۸]. در مورد صنایعی نظیر صنعت سیمان که در آنها به سختی می‌توان از شر کربن خلاص شد، فناوری‌های CCUS ضروری هستند.
روش‌های مختلف جذب CO۲ هر کدام از نظر مناسب بودن و هزینه برای یک کاربرد خاص، مزایای خاص خود را دارند. فناوری‌های اصلی به چهار دسته تقسیم می‌شوند (شکل ۲ را ببینید): ضبط پس از احتراق (PCC)؛ ضبط پیش از احتراق مثلاً در طول پیرولیز متان یا گازی‌سازی زغال سنگ؛ ضبط مستقیم از هوا (DAC)؛ و احتراق با سوخت اکسی. از فناوری‌هایی در حال ظهور در زمینه ضبط کربن PCC می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
فناوری کنتاکتور غشایی: در این فناوری هیبریدی، غشاهایی که به خودی خود محدود به کاربردهای گاز دودکش با CO۲ بالا هستند، با یک حلال آمین ترکیب می‌شود. سطح بزرگ تماس گاز/حلال، اندازه و وزن کنتاکتور را کاهش می‌دهد و بارگذاری زیاد حلال، گستره قابل تصفیه غلظت CO۲ در گاز دودکش را گسترش می‌دهد [۸].
جاذب‌ها: اگرچه ژئولیت‌ها، مواد پایه کربنی و مواد شیمیایی آغشته به آمین معمولاً به عنوان جاذب استفاده می‌شوند، ولی علاقمندی برای استفاده از ساختارهای فلزی-آلی (MOF) برای جذب CO۲ رو به افزایش است [۸]. جذب سطحی در فشارها و دماهای پایین‌تر گاز دودکش (۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد) بهترین عملکرد را دارد. بازیابی جاذب معمولاً به انرژی و دمای بخار کمتری نسبت به حلال‌های آمینی نیاز دارد.
فناوری‌های الکتروشیمیایی: در این فناوری، برای جداسازی CO۲ به میدان‌های الکتریکی متناوب، و نه گرما، متکی هستند که امکان افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی را فراهم می‌کند.
پیل‌های سوختی کربنات مذاب: این سیستم‌ها با عملکرد در دمای نسبتاً بالا (تا حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد) مشخص می‌شوند که نیاز به خنک‌سازی گاز دودکش و تأمین بخار برای دفع CO۲ را از بین می‌برد. برای افزایش خلوص CO۲ جذب شده در آند پیل سوختی، توسعه فناوری بیشتری مورد نیاز است.



شکل ۲ : ویژگی‌های فرآیندهای مختلف ضبط CO۲

انتظار می‌رود فناوری‌های ضبط مستقیم از هوا (DAC) که موجب انتشار منفی کربن می‌شود، در زنجیره ارزش آینده تبدیل انرژی به انرژی (power-to-X) نقش مهمی ایفا کند. استفاده از CO۲ حاصل از DAC و هیدروژن حاصل از الکترولیز، برای تولید مواد اولیه شیمیایی کربن خنثی و سوخت‌های مصنوعی (مانند متانول) می‌تواند به کربن‌زدایی بسیاری از صنایع کمک کند.
ترکیب سیستم DAC با سیستم‌های جداسازی کربن به سیستم‌های DACCS معروف هستند. اگرچه این سیستم‌ها در مراحل نخست توسعه فناوری می‌باشد و قیمت دقیقی نداشته و هزینه‌های تخمینی متنوعی برای آن ذکر شده است، اما به عنوان یک روش با کیفیت بالا و طولانی مدت میان فناوری‌های حذف دی اکسید کربن (CDR) شناخته می‌شود [۸].

ه) انرژی هسته‌ای

چندین کشور برنامه‌های شکافت هسته‌ای خود را آغاز یا گسترش داده‌اند و ۳۱ کشور متعهد شده‌اند که ظرفیت انرژی هسته‌ای جهانی را تا سال ۲۰۵۰ سه برابر کنند. این کشور با چالش‌های مداومی از جمله هزینه‌های بالای سرمایه، جدول زمانی طولانی ساخت و ساز و نگرانی‌های عمومی مداوم در مورد ایمنی و زباله‌های هسته‌ای روبرو است. پیشرفت در راکتورهای مدولار کوچک و بهبود شرایط اقتصادی برای این مقیاس از راکتورها می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و تسریع استقرار کمک کند، اما نقش آینده انرژی هسته‌ای همچنان بسیار نامشخص است.
بسته به مسیرهای کربن‌زدایی، حمایت سیاستی و سرعت پیشرفت فناوری، انرژی هسته‌ای می‌تواند تا سال ۲۰۴۰ بین ۸ تا ۴۳ درصد از برق جهانی را تأمین کند، گستره تغییرات در بازار آنقدر متغیر است که حجم بازار می‌تواند در خوش‌بینانه‌ترین سناریوها، تا ۴۰۰ میلیارد دلار برسد. علاوه بر فناوری‌های شکافت هسته‌ای اثبات‌شده، همجوشی هسته‌ای برای تولید برق در حال تبدیل شدن به گزینه جذاب برای سرمایه‌گذاری می‌شود، اما برای تحقق این فناوری باید بر چالش‌های فنی قابل توجهی غلبه کرد.
راکتورهای مدولار کوچک (SMR) نویدبخش کاهش هزینه و تسریع استقرار نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای هستند و در این زمینه تلاش‌های جدی در آمریکا و اروپا در حال انجام است. شرکت‌های TerraPower، X-energy، Oklo و Kairos Power برای توسعه SMRهای تجاری و ایمن‌سازی زنجیره‌های تأمین سوخت داخلی در حال رقابت هستند. مایکروسافت، گوگل و آمازون از توافق‌نامه‌هایی با اپراتورها و توسعه‌دهندگان نیروگاه‌های هسته‌ای برای کمک به تأمین تقاضای روبه رشد برق برای دیتاسنترهای خود خبر داده‌اند [۱].

منابع

[۱] McKinsey Technology Trends Outlook, ۲۰۲۵.
[۲] IEA, World Energy Outlook ۲۰۲۴.
[۳] https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-investment-in-clean-energy-and-fossil-fuels-۲۰۱۵-۲۰۲۴
[۴] https://ieeexplore.ieee.org/document/۱۰۹۳۸۹۵۱
[۵] https://www.shahrsakhtafzar.com/fa/news/technology/۵۷۲۱۱
[۶] خط لوله انتقال هیدروژن در آلمان، خبر مپنا، شماره ۱۵۹، صفحه ۶۷، مهر ۱۴۰۳.
[۷] استفاده از خط لوله گاز موجود شهر هامبورگ در شبکه هسته هیدروژن، خبر مپنا، شماره ۱۶۳، صفحه ۶۷، اردیبهشت ۱۴۰۴.
[۸] CCUS technology landscape and infrastructure, Siemens Energy, White paper, ۲۰۲۵.

کیفیت: متفاوت بیندیشید (شعار جهانی سال ۲۰۲۵)

فرید میرسلیمانی، میثم مظلومی، طاهر نظری

چکیده

روش‌ها و الگوهای رایج مدیریت کیفیت، با وجود موفقیت‌های گذشته‌شان در ایجاد نظم و استاندارد، در دنیای پویای امروز می‌توانند منجر به مقاومت ذهنی در برابر تغییر، متناسب با رشد دنیای امروز و دور ماندن سازمان از روندهای جدید شوند. در چنین شرایطی، شعار جهانی کیفیت «کیفیت: متفاوت بیندیشید» (Quality: Think Differently)، یک دعوت به تغییر بنیادین در نگرش است.

این مقاله استدلال می‌کند که پیشرفت آینده در کیفیت، نه صرفاً با بهینه‌سازی روش‌های فعلی، بلکه نیازمند به چالش کشیدن اصول پایه و فرضیات قدیمی است. هدف این پژوهش، نشان دادن این است که چگونه می‌توان با اصلاح نگرش به کیفیت، آن را از یک ابزار صرفاً کنترلی، به یک عامل کلیدی برای نوآوری و کسب مزیت رقابتی پایدار تغییر داد.

در پاسخ به این نیاز، این مقاله مدلی برای «بازنگری در مفهوم کیفیت» ارائه می‌دهد که بر یکپارچه‌سازی واحدهای مرتبط با حوزه کیفیت با فرآیندهای خلاق سازمان تأکید دارد. این مدل، تغییر از شاخص‌های کیفیت گذشته‌نگر (Lagging Indicators) که به بررسی عملکرد پیشین می‌پردازند، به شاخص‌های آینده‌نگر (Leading Indicators) که توانایی سازمان برای نوآوری را می‌سنجند، پیشنهاد می‌کند.

علاوه بر این، مقاله بر اهمیت ایجاد فضای امن روانشناختی (Psychological Safety) تأکید دارد؛ فضایی که در آن، کارکنان برای به چالش کشیدن روش‌های مرسوم و ارائه ایده‌های نو با نگرشی جدید، تشویق شوند. در نهایت، این پژوهش الگویی برای مدیران فراهم می‌کند تا نقش واحد کیفیت را از یک بخش صرفاً نظارتی به یک شریک استراتژیک در فرآیند نوآوری ارتقا دهند و از این طریق، ظرفیت سازمان را برای پیشرو بودن در آینده تضمین کنند.

کلیدواژه‌ها: باز اندیشی کیفیت، مدیریت استراتژیک کیفیت، جمود شناختی، نوآوری استراتژیک، فرهنگ نوآوری

مقدمه

مدیریت کیفیت همواره به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی موفقیت سازمان‌ها در بهبود عملکرد، افزایش رضایت مشتریان و تضمین پایداری فرآیندها شناخته شده است. طی دهه‌های گذشته، استانداردها و مدل‌های کلاسیک کیفیت توانسته‌اند نظم، کارایی و شفافیت را در سازمان‌ها نهادینه کنند. با این حال، تحولات سریع فناوری، پیچیدگی فزاینده محیط رقابتی و تغییرات مداوم نیازهای مشتریان سبب شده است که رویکردهای سنتی کیفیت دیگر کفایت نکنند و حتی در برخی موارد، با ایجاد جمود شناختی (جماد فکری و مقاومت به تغییر) مانع سازگاری سازمان با تغییر شوند.

در چنین بستری، انجمن جهانی کیفیت در سال ۲۰۲۵ شعاری تحول‌آفرین را معرفی کرده است: «کیفیت: متفاوت بیندیشید». این شعار در حقیقت پاسخی است به نیاز روزافزون سازمان‌ها برای عبور از چارچوب‌های تثبیت‌شده و بازاندیشی در مفهوم کیفیت. کیفیت در این چشم‌انداز جدید نه تنها یک ابزار کنترلی و پسینی، بلکه یک رویکرد استراتژیک برای نوآوری، خلاقیت و کسب مزیت رقابتی پایدار تلقی می‌شود.

از این منظر، حرکت به سوی کیفیت آینده‌محور مستلزم تغییر از شاخص‌های گذشته‌نگر به شاخص‌های آینده‌نگر، یکپارچه‌سازی فعالیت‌های کیفیت با فرآیندهای نوآورانه و ایجاد امنیت روان‌شناختی برای کارکنان است؛ فضایی که در آن افراد جسارت به چالش کشیدن وضع موجود و ارائه راهکارهای نو را داشته باشند.

هدف مقاله حاضر، پاسخ به این فراخوان جهانی و ارائه مدلی مفهومی برای بازنگری در نقش کیفیت در سازمان‌ها است؛ مدلی که نشان می‌دهد چگونه واحدهای کیفیت می‌توانند از جایگاه سنتی نظارتی خود فاصله گرفته و به شریک استراتژیک نوآوری و آینده‌سازی سازمان تبدیل شوند.

مروری بر منابع

مدیریت کیفیت به‌عنوان یکی از پایه‌های اصلی علم مدیریت، از نیمه دوم قرن بیستم تاکنون مسیر تکاملی مهمی را پیموده است. نخستین رویکردها با تأکید بر استانداردسازی، کاهش خطا و بهبود مستمر شکل گرفتند. دمینگ با معرفی چرخه معروف PDCA [۱] و جوران با طرح برنامه‌ریزی کیفیت [۲] تلاش کردند تا سازمان‌ها از طریق کنترل فرآیندها و نظام‌مندی عملیات، به سطحی بالاتر از کارایی و بهره‌وری برسند. نتایج مطالعات آنان نشان داد که رویکردهای کلاسیک کیفیت توانستند در صنایع تولیدی و خدماتی موجب کاهش ضایعات، ارتقای قابلیت اطمینان محصولات و رضایت مشتریان شوند. با این حال، محدودیت اصلی این رویکردها، تمرکز شدید بر کنترل گذشته‌نگر و غفلت از نوآوری آینده‌محور بود [۳].

از اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰، پژوهش‌ها به موضوعی کلیدی اشاره کردند؛ سازمان‌ها به دلیل وابستگی بیش از حد به الگوها و استانداردهای تثبیت‌شده، در معرض خطر جمود شناختی قرار می‌گیرند. لئونارد بارتون نشان داد که قابلیت‌های اصلی یک سازمان اگر بیش از حد تکرار شوند، به قابلیت‌های سخت‌شده تبدیل می‌شوند و توان سازگاری با تغییرات فناورانه را کاهش می‌دهند [۴].

این یافته توسط تریپساس و گاوتی نیز تأیید شد؛ آنان با بررسی صنعت عکاسی دیجیتال نشان دادند شرکت‌هایی که بیش از حد به رویه‌های سنتی متکی بودند، فرصت تغییر و نوآوری را از دست دادند [۵]. این نتایج هشدار داد که کیفیت، اگر تنها به استانداردسازی محدود شود، می‌تواند مانع نوآوری گردد.

شکل ۱. مدل مفهومی Leonard-Barton که دوگانگی قابلیت‌های اصلی به‌عنوان منبع مزیت رقابتی و در عین حال منشأ سختی‌های سازمانی را نشان می‌دهد. [۴]

در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای جدیدتر تلاش کردند کیفیت را از قالب صرفاً کنترلی فراتر ببرند. گارویین کیفیت را نه فقط انطباق با استاندارد، بلکه منبعی برای مزیت رقابتی پایدار معرفی کرد [۶]. او استدلال کرد که سازمان‌هایی موفق‌ترند که کیفیت را در کنار نوآوری و ارزش‌آفرینی بازتعریف کنند. همسو با این دیدگاه، نیلی و همکاران بر ضرورت گذار از شاخص‌های گذشته‌نگر به شاخص‌های آینده‌نگر تأکید کردند [۷]. در مطالعات بعدی، بورن و همکاران نشان دادند که این تغییر باعث می‌شود سازمان‌ها نه‌تنها عملکرد گذشته را بسنجند، بلکه توانایی خلق ارزش در آینده و ظرفیت نوآوری خود را نیز پایش کنند [۸].

از زاویه‌ای دیگر، ادبیات روان‌شناسی سازمانی نشان داده است که نوآوری تنها در محیطی شکل می‌گیرد که کارکنان احساس امنیت روان‌شناختی داشته باشند. ادموندسون در پژوهش کلاسیک خود نشان داد تیم‌هایی که اعضایشان در بیان ایده‌ها، نقد وضعیت موجود و حتی پذیرش خطاها احساس امنیت دارند، عملکرد یادگیری بالاتری دارند [۹].

مرور نظام‌مند فریزر و همکاران نیز تأیید کرد که امنیت روان‌شناختی نه‌تنها بر خلاقیت فردی اثر دارد، بلکه به‌طور مستقیم نوآوری سازمانی را تقویت می‌کند [۱۰]. این یافته‌ها به حوزه کیفیت مرتبط می‌شود؛ زیرا اگر کیفیت صرفاً به‌عنوان کنترل دیده شود، کارکنان تمایل کمتری به بیان ایده‌های متفاوت خواهند داشت، اما اگر کیفیت با امنیت روان‌شناختی ترکیب شود، به بستری برای جرئت اندیشیدن متفاوت تبدیل می‌گردد.

در حوزه مدیریت استراتژیک کیفیت، پژوهشگران جدید بر ضرورت ارتقای جایگاه کیفیت تأکید دارند. پسوماس و آنتونی در مطالعه خود بر دانشگاه‌های یونان نشان دادند که عناصر مدیریت کیفیت جامع می‌تواند از سطح عملیات کنترلی فراتر رود و به ابزاری استراتژیک برای بهبود عملکرد و نوآوری سازمانی تبدیل شود [۱۱]. این یافته قابل تعمیم به صنایع دیگر است و نشان می‌دهد کیفیت باید با تصمیمات استراتژیک یکپارچه گردد.

افـزون بـر ایـن، بنـر و تاشـمن مفهـوم «معضـل بهـره‌وری» را مطـرح کردنـد. آنـان توضیـح دادنـد کـه سـازمان‌ها معمـولاً میـان بهره‌بـرداری یعنـی اسـتفاده و بهبـود فرآیندهـای موجـود، و اکتشـاف یعنـی جسـت‌وجوی نـوآوری و آزمایش‌هـای جدیـد گرفتـار می‌شـوند. نتایـج پژوهـش آنـان نشـان داد تمرکـز بیـش از حـد بـر بهـره‌وری، نـوآوری را سـرکوب می‌کنـد و برعکـس، تمرکـز افراطـی بـر نـوآوری موجـب بی‌ثباتـی و کاهـش کارایـی می‌شـود [۱۲].

راه‌حـل پیشـنهادی آن‌هـا، طراحـی سـازمان‌های دوسـوتوان اسـت کـه توانایـی مدیریـت همزمـان بهـره‌وری و نـوآوری را دارنـد. ایـن رویکـرد مسـتقیماً بـه بحـث بازاندیشـی کیفیـت مربـوط می‌شـود؛ زیـرا کیفیـت بایـد نـه تنهـا ابـزار بهـره‌وری، بلکـه تسـهیل‌گر نـوآوری نیـز باشـد.

بنابرایـن، مسـیر آینـده کیفیـت در گـرو بازاندیشـی بنیادیـن اسـت؛ حرکـت از تمرکـز صـرف بـر کنتـرل اسـتانداردی بـه سـمت نـوآوری، از شـاخص‌های گذشـته‌نگر بـه آینده‌نگـر، از فرهنـگ تـرس و انطبـاق بـه فرهنـگ امنیـت روان‌شـناختی و جسـارت اسـت. در چنیـن زمینـه‌ای، شـعار جهانـی کیفیـت ۲۰۲۵ بـا عنـوان «کیفیـت: متفـاوت بیندیشـید» نـه یـک توصیـه شـعاری، بلکـه حاصـل دهه‌هـا تحـول نظـری و تجربـی در مدیریـت کیفیـت اسـت [۶-۱۲].

شکل ۲. سیر تکاملی رویکردهای کیفیت از دیدگاه کلاسیک تا چشم‌اندازهای آینده؛ مروری بر تغییر نقش کیفیت از استانداردسازی و کاهش خطا تا ابعاد روان‌شناختی و نوآوری سازمانی [۱-۱۲].

بحث و تحلیل

بررسـی انجام‌شـده نشـان می‌دهـد کـه مدیریـت کیفیـت در شـرایط کنونـی بیـش از هـر زمـان دیگـری نیازمنـد بازاندیشـی و تحـول بنیادیـن اسـت. در دهه‌هـای گذشـته، رویکردهـای سـنتی کیفیـت توانسـته‌اند نقـش مهمـی در ارتقـای بهـره‌وری، کاهـش ضایعـات و تضمیـن انطبـاق بـا اسـتانداردها ایفـا کننـد. بـا ایـن حـال، ایـن دسـتاوردها به‌تنهایـی بـرای مواجهـه بـا چالش‌هـای محیطـی و پیچیدگی‌هـای روزافـزون کافـی نیسـتند. محیـط رقابتـی امـروز بـه سـرعت در حـال تغییـر اسـت و سـازمان‌هایی کـه همچنـان بـه الگوهـای گذشـته متکـی باشـند، در معـرض خطـر جمـود شـناختی و از دسـت دادن تـوان نـوآوری قـرار دارنـد.

یکـی از یافته‌هـای کلیـدی مقالـه حاضـر، ضـرورت گـذار از شـاخص‌های گذشـته‌نگر بـه شـاخص‌های آینده‌نگـر اسـت. شـاخص‌های گذشـته‌نگر تنهـا تصویـری از عملکـرد پیشـین ارائـه می‌دهنـد و امـکان اقـدام پیش‌دسـتانه را فراهـم نمی‌سـازند. در مقابـل، شـاخص‌های آینده‌نگـر سـازمان را قـادر می‌سـازند تـا ظرفیـت خـود را بـرای خلـق ارزش، نـوآوری و پیش‌بینـی تغییـرات محیطـی ارزیابـی کنـد. ایـن تغییـر نگـرش، مدیریـت کیفیـت را از یـک ابـزار کنترلـی بـه یـک ابـزار راهبـردی ارتقـا می‌دهـد؛ ابـزاری کـه نه‌تنهـا بـه حفـظ وضعیـت موجـود کمـک می‌کنـد، بلکـه محـرک اصلـی بـرای خلـق مزیـت رقابتـی پایـدار خواهـد بـود.

از منظـر فرهنگـی و انسـانی، نتایـج نشـان می‌دهـد کـه «امنیـت روان‌شـناختی» یکـی از پیش‌شـرط‌های اساسـی بـرای تحقـق کیفیـت آینده‌محـور اسـت. در بسـیاری از سـازمان‌ها، فرهنـگ کیفیـت صرفـاً معطـوف بـه انطبـاق بـا دسـتورالعمل‌ها و اسـتانداردها اسـت؛ در چنیـن محیطـی کارکنـان تمایـل اندکـی بـه بیـان ایده‌هـای نـو یـا نقـد وضعیـت موجـود دارنـد، زیـرا نگـران پیامدهـای احتمالـی آن هسـتند. در حالی‌کـه پژوهش‌هـای سـازمانی اثبـات کرده‌انـد زمانی‌کـه کارکنـان احسـاس امنیـت روانـی و حمایتـی داشـته باشـند، نـوآوری و یادگیـری جمعـی افزایـش می‌یابـد.

ایـن موضـوع در پیونـد بـا کیفیـت بـه معنـای آن اسـت کـه کیفیـت، اگـر بـا فرهنـگ اعتمـاد و جرئـت اندیشـیدن متفـاوت همـراه شـود، می‌توانـد بـه بسـتری بـرای تحـول و خلاقیـت تبدیـل گـردد.

از سـوی دیگـر، چالـش بنیادیـن دیگـری کـه در مقالـه بـه آن اشـاره شـده، «معضـل بهـره‌وری» اسـت. سـازمان‌ها غالبـاً در تـوازن میـان بهره‌بـرداری از فرآیندهـای موجـود و اکتشـاف مسـیرهای نـو دچـار مشـکل می‌شـوند. تأکیـد بیش‌ازحـد بـر بهـره‌وری می‌توانـد نـوآوری را سـرکوب کنـد، در حالی‌کـه تمرکـز افراطـی بـر نـوآوری نیـز بـه بی‌ثباتـی و کاهـش کارایـی می‌انجامـد. راه‌حـل ایـن معضـل، همان‌گونـه کـه پژوهش‌هـای اخیـر نشـان داده‌انـد، طراحـی سـازمان‌های دوسـوتوان اسـت؛ سـازمان‌هایی کـه توانایـی مدیریـت هم‌زمـان بهـره‌وری و نـوآوری را دارنـد. پیونـد کیفیـت بـا چنیـن نگرشـی بـه معنـای آن اسـت کـه مدیریـت کیفیـت بایـد همزمـان ضامـن ثبـات فرآیندهـا و محـرک نـوآوری باشـد.

عـلاوه بـر ایـن، نتایـج ایـن مقالـه اهمیـت ادغـام کیفیـت بـا سـایر فرآیندهـای کلیـدی سـازمان، به‌ویـژه نـوآوری و اسـتراتژی را برجسـته می‌کنـد. تجربـه سـازمان‌های پیشـرو نشـان داده اسـت کـه کیفیـت زمانـی می‌توانـد بـه مزیـت رقابتـی پایـدار تبدیـل شـود کـه نه‌تنهـا در سـطح عملیاتـی بلکـه در سـطوح راهبـردی تصمیم‌گیـری حضـور داشـته باشـد. ایـن امـر مسـتلزم آن اسـت کـه واحدهـای کیفیـت از نقـش صرفـاً نظارتـی فراتـر رفتـه و در جایـگاه شـریک اسـتراتژیک مدیریـت سـازمان قـرار گیرنـد.

بحـث دیگـر مربـوط بـه نقـش فنـاوری و دیجیتال‌سـازی در بازاندیشـی کیفیـت اسـت. ابزارهـای دیجیتـال، سیسـتم‌های داده‌محـور و هـوش مصنوعـی فرصت‌هـای تـازه‌ای بـرای ارتقـای پایـش و بهبـود کیفیـت فراهـم کرده‌انـد. ایـن فناوری‌هـا بـا فراهـم آوردن تحلیل‌هـای پیش‌نگـر و هوشـمند، می‌تواننـد زمینـه را بـرای تحقـق همـان شـاخص‌های آینده‌نگـر فراهـم سـازند کـه در ایـن مقالـه بـر آن‌هـا تأکیـد شـده اسـت. در واقـع، بـدون بهره‌گیـری از فناوری‌هـای نویـن، حرکـت بـه سـمت کیفیـت آینده‌محـور بسـیار دشـوار خواهـد بـود.

در مجمـوع، می‌تـوان چنیـن نتیجـه گرفـت کـه کیفیـت در چشـم‌انداز آینـده بایـد نه‌تنهـا پاسـدار اسـتانداردها و نظـم موجـود باشـد، بلکـه نقشـی فعـال در خلـق ارزش، هدایـت نـوآوری و تضمیـن پایـداری سـازمان ایفـا کنـد. ایـن امـر تنهـا از طریـق تغییـر نگـرش مدیـران، تقویـت فرهنـگ سـازمانی مبتنـی بـر اعتمـاد، و ادغـام کیفیـت بـا اسـتراتژی‌های کلان سـازمانی امکان‌پذیـر اسـت. از ایـن منظـر، شـعار جهانـی کیفیـت ۲۰۲۵ بـا عنـوان «کیفیـت: متفـاوت بیندیشـید» یـک پیـام نمادیـن صـرف نیسـت، بلکـه بازتابـی از تحـولات نظـری و عملـی گسـترده در حـوزه مدیریـت کیفیـت اسـت.

بنابرایـن، سـازمان‌هایی کـه بتواننـد کیفیـت را از جایـگاه سـنتی بـه سـطحی اسـتراتژیک و نوآورانـه ارتقـا دهنـد، نه‌تنهـا در رقابت‌هـای کنونـی پیشـرو خواهنـد بـود، بلکـه توانایـی پیش‌بینـی و شـکل‌دهی آینـده را نیـز به‌دسـت خواهنـد آورد. چنیـن رویکـردی می‌توانـد کیفیـت را از «ابـزار کنتـرل» بـه «ابـزار خلـق آینـده» تبدیـل کنـد.

نتایج و اقدامات قابل انجام در مپنا بویلر در راستای شعار جهانی کیفیت ۲۰۲۵

این اقدامات در چند محور کلیدی قابل دسته‌بندی است:

۱. بازاندیشـی در مدیریـت کیفیـت: بازنگـری فرآیندهـا و مدل‌هـای مدیریتـی بـرای تطبیـق بـا اسـتانداردهای نویـن و افزایـش چابکـی سـازمان.

۲. یکپارچگـی کیفیـت بـا نـوآوری فنـی: پیونـد دادن الزامـات کیفیـت بـا طراحـی، مهندسـی و نوآوری‌هـای محصـول به‌منظـور خلـق ارزش افـزوده.

۳. توسـعه فرهنـگ سـازمانی و منابـع انسـانی: تقویـت مشـارکت کارکنـان، آمـوزش مـداوم و نهادینه‌سـازی فرهنـگ کیفیـت در همـه سـطوح.

۴. رویکرد استراتژیک به کیفیت: تبدیل کیفیت به یک مزیت رقابتی پایدار و گنجاندن آن در برنامه‌های کلان شرکت.

۵. فناوری و دیجیتال‌سازی: بهره‌گیری از ابزارهای دیجیتال، داده‌محوری و اتوماسیون برای ارتقای پایش و بهبود کیفیت.

۶. جایگاه رقابتی و بازار: ارتقای استانداردهای محصول و خدمات برای تثبیت برند در بازار داخلی و بین‌المللی.

نتیجه‌گیری

مـرور منابـع و تحلیل‌هـای انجام‌شـده نشـان می‌دهـد کـه مدیریـت کیفیـت، علی‌رغـم نقـش تاریخـی و مؤثـر خـود در استانداردسـازی و بهبـود بهـره‌وری، بـرای پاسـخگویی بـه تحـولات سـریع محیطـی و نیازهـای آینـده کافـی نیسـت. مسـیر آینـده کیفیـت در گـرو بازاندیشـی بنیادیـن و حرکـت از رویکردهـای صرفـاً کنترلـی بـه سـمت رویکـردی اسـتراتژیک و نوآورانـه اسـت؛ رویکـردی کـه بـر شـاخص‌های آینده‌نگـر، فرهنـگ امنیـت روان‌شـناختی و ادغـام کیفیـت بـا فرآیندهـای نـوآوری تأکیـد دارد.

در ایـن چارچـوب، شـعار جهانـی کیفیـت ۲۰۲۵ بـا عنـوان «کیفیـت: متفـاوت بیندیشـید» نـه تنهـا یـک فراخـوان الهام‌بخـش، بلکـه نتیجـه منطقـی دهه‌هـا تحـول نظـری و تجربـی در مدیریـت کیفیـت اسـت. سـازمان‌هایی کـه بتواننـد در راسـتای شـراکت‌های اسـتراتژیک، کیفیـت و نـوآوری را بـا هـم تلفیـق نماینـد، خواهنـد توانسـت مزیـت رقابتـی پایـدار ایجـاد کـرده و در عرصه‌هـای پیچیـده و رقابتـی آینـده پیشـرو باقـی بماننـد.

منابع

۱. Deming, W. E. (۱۹۸۶). Out of the crisis. MIT Press.

۲. Juran, J. M. (۱۹۹۳). Quality planning and analysis (۳rd ed.). McGraw-Hill.

۳. Oakland, J. S. (۲۰۱۴). Total quality management and operational excellence: Text with cases (۴th ed.). Routledge.

۴. Leonard-Barton, D. (۱۹۹۲). Core capabilities and core rigidities: A paradox in managing new product development. Strategic Management Journal, ۱۳(S۱۲۵-۱۱۱ ,(۱. https://doi.org/۱۰/۱۰۰۲/smj.۴۲۵۰۱۳۱۰۰۹

۵. Tripsas, M., & Gavetti, G. (۲۰۰۰). Capabilities, cognition, and inertia: Evidence from digital imaging. Strategic Management Journal, ۱۱۶۱-۱۱۴۷ ,(۱۱-۱۰)۲۱. https://doi.org/۱۱/۲۱:۱۰(۱۱/۲۰۰۰۱۰)۰۲۶۶-۱۰۹۷/۱۰/۱۰۰۲

۶. Garvin, D. A. (۲۰۱۹). Competing on the eight dimensions of quality. Harvard Business Review, ۱۰۹-۱۰۱ ,(۶)۶۷

۷. Neely, A., Gregory, M., & Platts, K. (۲۰۰۵). Performance measurement system design: A literature review and research agenda. International Journal of Operations & Production Management, ۱۲۶۳-۱۲۲۸ ,(۱۲)۲۵. https://doi.org/۰۱۴۴۳۵۷۰۵۱۰۶۳۳۶۳۹/۱۰/۱۱۰۸

۸. Bourne, M., Pavlov, A., Franco-Santos, M., Lucianetti, L., & Mura, M. (۲۰۱۸). Performance measurement and management: A system of systems perspective. International Journal of Production Research, ,(۸)۵۶ ۲۷۸۸۲۷۹۹. https://doi.org/۰۰۲۰۷۵۴۳/۲۰۱۷/۱۴۰۱۲۳۵/۱۰/۱۰۸۰

۹. Edmondson, A. (۱۹۹۹). Psychological safety and learning behavior in work teams. Administrative Science Quarterly, ۳۸۳-۳۵۰ ,(۲)۴۴. https://doi.org/۲۶۶۶۹۹۹/۱۰/۲۳۰۷.

۱۰. Frazier, M. L., Fainshmidt, S., Klinger, R. L., Pezeshkan, A., & Vracheva, V. (۲۰۱۷). Psychological safety: A metaanalytic review and extension. Personnel Psychology, ۱۶۵-۱۱۳ ,(۱)۷۰. https://doi.org/۱۰/۱۱۱۱/peps.۱۲۱۸۳

۱۱. Psomas, E. L., & Antony, J. (۲۰۱۷). Total quality management elements and results in higher education institutions: The Greek case. Quality Assurance in Education, ۲۲۳-۲۰۶ ,(۲)۲۵. https://doi.org/۱۰/۱۱۰۸/QAE-۲۰۱۵-۰۸-۰۰۳۳

۱۲. Benner, M. J., & Tushman, M. L. (۲۰۰۳). Exploitation, exploration, and process management: The productivity dilemma revisited. Academy of Management Review, ۲۵۶-۲۳۸ ,(۲)۲۸. https://doi.org/۱۰/۵۴۶۵/amr.۲۰۰۳/۹۴۱۶۰۹۶

نقش تحول‌آفرین هوش مصنوعی در مدیریت ریسک پروژه

مسعود مستقیم، علی عشقی ثانی

چکیده

مدیریت ریسک پروژه، به عنوان یکی از حوزه‌های حیاتی دانش مدیریت پروژه طبق استاندارد PMBOK® ، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست پروژه‌ها ایفا می‌کند. این مقاله ابتدا به تشریح فرآیندهای کلیدی مدیریت ریسک بر اساس استاندارد PMBOK که شامل:

۱. شناسایی ریسک‌ها ۲. تحلیل کیفی ریسک ۳. تحلیل کمی ریسک ۴. برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک‌ها و ۵. پایش ریسک‌ها است می‌پردازد.

در این بخش قصد داریم به چالش‌های سنتی در اجرای موثر این فرآیندها، مانند حجم بالای داده‌ها، ذهنیت در ارزیابی‌ها، محدودیت‌های پیش‌بینی و زمان‌بر بودن تحلیل‌های کمی بپردازیم. در ادامه مقاله، نقش نوظهور و تحول‌آفرین هوش مصنوعی (AI) در تقویت و دگرگونی هر یک از این فرآیندها را به تفصیل بررسی می‌کنیم و نشان داده می‌شود که چگونه فناوری‌های هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین (ML)، پردازش زبان طبیعی (NLP)، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های پیشنهاد دهنده، قادرند:

- شناسایی ریسک‌ها را با تحلیل خودکار اسناد پروژه، گزارشات گذشته، اخبار و شبکه‌های اجتماعی، جامع‌تر و سریع‌تر کنند.
- تحلیل کیفی و کمی ریسک‌ها را با کاهش سوگیری‌های انسانی، ارائه پیش‌بینی‌های دقیق‌تر بر پایه داده‌های تاریخی و واقعی، و انجام شبیه‌سازی‌های پیچیده (مانند تحلیل مونت‌کارلو) بهینه‌سازی نمایند.
- پاسخ‌های بهینه به ریسک‌ها را با پیشنهاد راهکارهای مبتنی بر شواهد و تحلیل سناریوهای مختلف، هوشمندانه‌تر ارائه دهند.
- پایش ریسک‌ها را به صورت بلادرنگ و پیش‌فعالانه با تحلیل مداوم داده‌های پروژه و شناسایی زودهنگام انحرافات یا ظهور ریسک‌های جدید امکان‌پذیر سازند.

این مقاله نتیجه می‌گیرد که ادغام هوش مصنوعی در چارچوب مدیریت ریسک، نه تنها کارایی و دقت فرآیندها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد، بلکه امکان مدیریت ریسک مبتنی بر پیش‌بینی (Predictive) و حتی تجویزی (Prescriptive) را فراهم می‌آورد، امری که به تصمیم‌گیری بهتر، تخصیص موثرتر منابع و در نهایت افزایش احتمال دستیابی به اهداف پروژه منجر خواهد شد. هوش مصنوعی در حال تبدیل شدن به یک همکار ضروری برای مدیران پروژه در عرصه پویا و پر ریسک امروز است.

ریسک چیست؟

ریسک رویدادی یا شرایطی نامطمئن است که در صورت وقوع، می‌تواند بر اهداف پروژه مانند زمان، هزینه، کیفیت یا دامنه، اثر مثبت یا منفی داشته باشد.

فرمول رایج برای سنجش ریسک:

ریسک برابر است با حاصل‌ضرب احتمال وقوع در شدت اثر

چرا محاسبه و سنجش ریسک مهم است؟

- اولویت‌بندی شفاف: با کمی‌سازی ریسک‌ها از طریق محاسبه‌ی «احتمال × اثر»، ریسک‌های بحرانی و نیازمند رسیدگی فوری به‌صورت عینی و شفاف مشخص می‌شوند.
- تصمیم‌گیری مبتنی بر داده: انتخاب بین راه‌حل‌ها، قراردادها و فناوری‌ها وقتی ارزش پولی مورد انتظار (EMV) و سناریوها را می‌دانیم، منطقی‌تر می‌شود.
- ذخیره احتیاطی (Contingency Reserve) / ذخیره مدیریتی (Management Reserve): برآورد کمی ریسک کمک می‌کند ذخایر واقع‌بینانه برای هزینه و زمان تعریف کنیم و از شوک‌های پروژه جلوگیری شود.
- پیش‌بینی دقیق‌تر برنامه و هزینه: شبیه‌سازی‌هایی مثل مونت‌کارلو عدم‌قطعیت را وارد زمان‌بندی/بودجه می‌کند و محدوده‌های واقع‌بینانه‌تری به ما می‌دهد.
- طراحی پاسخ‌های مؤثر: می‌توانیم مشخص کنیم کدام ریسک را باید اجتناب کنیم، کدام را کاهش دهیم، کدام را منتقل کنیم (بیمه/قرارداد) و کدام را بپذیریم و برای فرصت‌ها برعکس، بهره‌برداری/تقویت کنیم.
- هم‌راستاسازی ذی‌نفعان: سنجش کمی زبان مشترکی برای گزارش دهی، آستانه‌های پذیرش ریسک (Risk Appetite/Thresholds) و تعهد به اقدامات ایجاد می‌کند.
- کاهش غافلگیری: رصد شاخص‌های هشداردهنده و امتیاز ریسک‌ها باعث می‌شود مسائل قبل از تبدیل‌شدن به «Issue» مدیریت شوند.

فرایندهای مدیریت ریسک پروژه

۱. برنامه‌ریزی مدیریت ریسک (Plan Risk Management)
چارچوب و قواعد کار را تعیین می‌کند: روش‌ها، نقش‌ها و مسئولیت‌ها، بودجه/زمان ریسک، دسته‌بندی‌ها (RBS)، آستانه پذیرش ریسک و شیوه گزارش‌دهی. خروجی کلیدی: Risk Management Plan
۲. شناسایی ریسک‌ها (Identify Risks)
تهدیدها و فرصت‌ها را از طریق طوفان فکری، مصاحبه، چک‌لیست و... گردآوری و ثبت می‌کند. خروجی: Risk Register + Risk Report
۳. تحلیل کیفی ریسک‌ها (Perform Qualitative Risk Analysis)
به هر ریسک «احتمال» و «اثر» می‌دهد، اولویت‌بندی می‌کند و فهرست «تحت‌نظر» می‌سازد. خروجی: امتیاز/اولویت ریسک‌ها، مالک ریسک، محرک‌ها (Triggers)
۴. تحلیل کمی ریسک‌ها (Perform Quantitative Risk Analysis)
(در صورت نیاز) اثر عدم‌قطعیت بر کل زمان یا هزینه را با روش‌هایی مثل EMV و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برآورد می‌کند و ذخایر احتیاطی را کمی می‌سازد. خروجی: برآورد ذخایر، توزیع نتایج، ریسک‌های اثرگذار بر کل پروژه.
۵. برنامه‌ریزی پاسخ‌ها (Plan Risk Responses)
برای هر «ریسک شناسایی‌شده» (تهدید یا فرصت) راهبرد و اقدام‌های مشخص، زمان‌بندی‌شده و دارای مالک تعیین می‌کند تا اثر آن ریسک بر اهداف پروژه را به حداقل (برای تهدیدها) یا به حداکثر (برای فرصت‌ها) برساند. این فرآیند هم برای ریسک‌های منفرد و هم برای ریسک کل پروژه (Overall Project Risk) به‌کار می‌رود. خروجی: تعیین اقدامات، مالک اقدام، زمان‌بندی، ریسک‌های ثانویه/باقیمانده.
پاسخ ها برای تهدید: اجتناب/کاهش/انتقال/پذیرش/ارجاع
پاسخ ها برای فرصت: بهره‌برداری/تقویت/اشتراک/پذیرش/ارجاع

۶. اجرای پاسخ‌ها (Implement Risk Responses)
اقدامات برنامه‌ریزی‌شده را در عمل پیاده می‌کند و تغییرات لازم را اعمال می‌کند. خروجی: درخواست‌های تغییر، به‌روزرسانی ثبت ریسک/برنامه‌ها.
۷. پایش ریسک‌ها (Monitor Risks)
ریسک‌های شناسایی‌شده را رصد می‌کند، ریسک‌های جدید را می‌افزاید، اثربخشی پاسخ‌ها را ممیزی و وضعیت را گزارش می‌کند. خروجی: به‌روزرسانی‌ها، درس‌آموخته‌ها، بستن ریسک‌ها.

چالش‌های سنتی مدیریت ریسک (بدون اتکا به AI)

۱) داده و اطلاعات

- پراکندگی و ناسازگاری داده‌ها: استفاده از منابع اطلاعاتی ناهمگون مانند فایل‌های اکسل پراکنده، ایمیل‌ها و ابزارهای جزیره‌ای که منجر به ایجاد نسخه‌های متعارض از داده‌ها می‌شود.
- کیفیت پایین: داده ناقص/قدیمی، تعاریف مبهم، سوگیری در ثبت.
- حجم و سرعت: ورود جریان‌های لحظه‌ای (عملیاتی/بازار/تأمین) که پردازش دستی آن ممکن نیست.
- دسترسی/امنیت: اشتراک‌گذاری دشوار بین تیم‌ها و پیمانکاران.

۲) ماهیت فرآیند

- دوره‌ای و واکنشی: شناسایی/به‌روزرسانی ریسک‌ها مقطعی است، نه پیوسته.
- فاصله تا اقدام: از ثبت ریسک تا تصویب و اجرای پاسخ، گپ زمانی و تصمیم‌های کند.

۳) انسان و قضاوت (سوگیری‌ها)

- سوگیری تأیید، خوش‌بینی، لنگر، دسترس‌پذیری، تازه‌گرایی.
- تفاوت مقیاس‌ها/زبان: امتیازدهی احتمال-اثر ناهمسان و قابل چانه‌زنی.
- وابستگی به چند خبره کلیدی و خستگی از جلسات طولانی.

۴) مدل‌سازی و پیش‌بینی

- ساده‌سازی مفرط: فرض استقلال ریسک‌ها، نرمال‌بودن توزیع‌ها.
- نادیده‌گرفتن وابستگی‌ها/دومینو: سرایت بین زمان‌بندی، هزینه، کیفیت، زنجیره تأمین.
- پوشش ضعیف رویدادهای نادر و سناریوهای افراطی.
- حساسیت بالا به برآوردهای سه‌نقطه‌ای و داده تاریخی کم.

۵) هماهنگی و اجرا

- ترجمه ریسک‌ها به بودجه/زمان‌بندی/تخصیص منابع سخت و پرتنش.
- تضاد منافع ذی‌نفعان در انتخاب پاسخ‌ها (پذیرش/انتقال/کاهش/اجتناب).
- سنجش اثربخشی پاسخ‌ها و نسبت‌دادن نتایج (attribution) مبهم.
- تجمیع ریسک در سطوح پروژه-برنامه-پرتفو با دوباره‌کاری و خطای انسانی.

۶) ابزار و حاکمیت

- ابزارهای پراکنده و ردپای تصمیم‌گیری ضعیف (audit trail ناکافی).
- گزارش‌دهی انطباق/حسابرسی زمان‌بر و پرهزینه.
- بلوغ ناهمگون تیم‌ها و نبود استانداردسازی.

۷) محیط ناپایدار و ریسک‌های نوظهور

- تغییر رژیم‌ها (اقتصادی/مقرراتی/فناوری) و غیرایستایی داده‌ها.
- ریسک‌های نو: سایبری، ESG، شخص ثالث/تأمین‌کننده، که سریع تکامل می‌یابند.
- وابستگی به اشخاص کلیدی و ریسک خروج دانش.

۸) اقتصاد تحلیل کمی

- کمیابی داده تمیز برای کالیبراسیون.
- مونت‌کارلو/بهینه‌سازی‌های سبد پاسخ‌ها پرهزینه و زمان‌بر.
- یکپارچه‌سازی نتایج کمی با قضاوت مدیریتی دشوار.

۹) فرهنگ و انگیزه‌ها

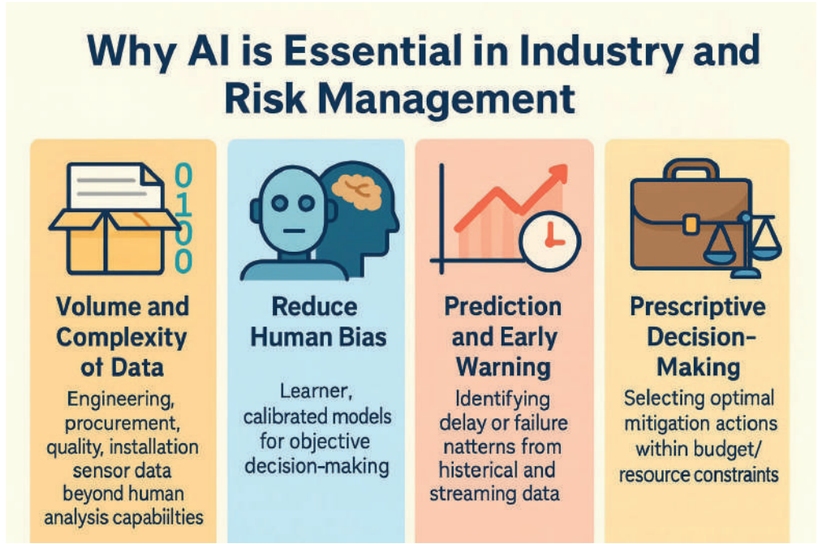
- تنبیه/پاداش نامناسب (ریسک‌پوشی ظاهری به‌جای مدیریت واقعی).
- کاهش توجه به هشدارها و عادی‌انگاری انحراف‌ها.
- ترس از شفافیت که به گزارش‌گری حداقلی منجر می‌شود.

پیامدهای عملی

- تصمیم‌های کند و دیرهنگام، اولویت‌بندی ناقص، و پاسخ‌های واکنشی.
- نشت ریسک از شکاف‌های بین‌تیمی و از دست‌رفتن فرصت‌های کاهش هزینه/زمان.
- گزارش‌های پرزرق و برق ولی کم‌اثر، و غافلگیری در نقاط بحرانی پروژه.

چرا هوش مصنوعی در صنعت و مدیریت ریسک ضروری است؟

- حجم و تنوع داده‌ها (قراردادها، BOM، خرید، NDT ،WPS/PQR، ثبت‌های کیفی، لاگ‌های نصب، سنسورهای تست و راه‌اندازی) از توان تحلیل دستی فراتر رفته است.
- کاهش ذهنیت و سوگیری با مدل‌های یادگیرنده و کالیبره‌شده.
- پیش‌بینی و هشدار زودهنگام بر اساس الگوهای تاریخی و جریان داده‌ی جاری.
- تصمیم‌سازی تجویزی (انتخاب سبد اقدامات کاهشی با محدودیت بودجه/منابع).



مطالعات حوزه ساخت‌وسازو پروژه های EPC نشان می‌دهند هوش مصنوعی در مدیریت ریسک تاخیر، هزینه، کیفیت و ایمنی دستاورد ملموس دارد.

چالش‌های استفاده از AI:

- نیاز به داده‌های تمیز و باکیفیت
- ریسک وابستگی به مدل‌های یادگیری
- ملاحظات اخلاقی و شفافیت تصمیمات AI
- هزینه بالای پیاده‌سازی اولیه

متناسب‌سازی(Tailoring): متناسب‌سازی خروجی‌های هوش مصنوعی یعنی اینکه داده‌ها و تحلیل‌هایی که مدل تولید می‌کند، مستقیماً و بدون تغییر استفاده نشوند؛ بلکه با شرایط خاص سازمان، حوزه کاری و سطح ریسک‌پذیری شما هماهنگ شوند. در مدیریت ریسک این یعنی:

- نتایج خام مدل با سیاست‌ها، مقررات و استانداردهای داخلی تطبیق داده شوند.
- زمینه صنعتی و شرایط محیطی (مثل بازار، قوانین، یا نوع دارایی) لحاظ شود.
- خروجی مدل به شکل قابل‌استفاده برای تصمیم‌گیری مدیریتی بازطراحی گردد (مثل داشبورد، شاخص یا سناریو).

در ادامه به نقش هوش مصنوعی در هرکدام از فرآیندهای مدیریت ریسک می‌پردازیم:

۱) برنامه‌ریزی مدیریت ریسک (Plan Risk Management)

کمک هوش مصنوعی:

- تحلیل داده‌های تاریخی پروژه‌ها برای پیشنهاد بهترین متدولوژی و ساختار شکست ریسک (RBS)
- شبیه‌سازی سناریوها برای برآورد بودجه و زمان مورد نیاز اقدامات ریسک.
- پیشنهاد خودکار نقش‌ها و مسئولیت‌ها با توجه به تجربه پروژه‌های مشابه
- تعیین معیارهای یکسان احتمال/اثر

مثال: ساخت RBS تخصصی برای پروژه ها

ابتدا مجموعه‌ای نمونه از ریسک‌های پروژه به یک سامانه هوش مصنوعی ارائه شد تا بر اساس آن ساختار شکست ریسک (RBS) پیشنهادی تولید شود. نتایج به شرح زیر به دست آمد:

سطح ۱- دسته‌های کلان ریسک

- ریسک‌های مدیریتی و سازمانی
- ریسک‌های فنی و مهندسی
- ریسک‌های تأمین و لجستیک
- ریسک‌های اجرایی و نصب
- ریسک‌های مالی و اقتصادی
- ریسک‌های قراردادی و حقوقی
- ریسک‌های ایمنی، HSE و زیست‌محیطی
- ریسک‌های خارجی (محیطی و سیاسی)

سطح ۲- نمونه زیرشاخه‌ها

- مدیریتی و سازمانی: ضعف در برنامه‌ریزی پروژه- تغییرات مکرر در محدوده کار (Scope)- کمبود منابع انسانی متخصص
- فنی و مهندسی: خطا در طراحی پایه یا تفصیلی- ناسازگاری نقشه‌ها با شرایط سایت- مشکلات در استانداردها و مشخصات فنی
- تأمین و لجستیک: تأخیر در تأمین تجهیزات- مشکلات حمل و نقل داخلی/خارجی- نبود قطعات یدکی حیاتی
- اجرایی و نصب: شرایط نامناسب کارگاهی (آب‌وهوا، زمین)- خطا در نصب تجهیزات- ضعف در هماهنگی تیم‌های پیمانکاری
- مالی و اقتصادی: افزایش غیرمنتظره هزینه‌ها- نوسانات نرخ ارز- تأخیر در پرداخت کارفرما
- قراردادی و حقوقی: ابهام در مفاد قرارداد- ادعاهای پیمانکاران فرعی- دعاوی ناشی از تأخیر یا کیفیت
- ایمنی، HSE و زیست‌محیطی: حوادث ناشی از کار در ارتفاع- آتش‌سوزی یا انفجار- آلودگی محیط زیست (نشت مواد شیمیایی)
- ریسک‌های خارجی: تغییر قوانین و مقررات دولتی- محدودیت‌های تحریمی و وارداتی- ریسک‌های اجتماعی و محلی (اعتراضات، معارضان)

در نهایت از هوش مصنوعی درخواست شد جدول مربوطه را نیز ارائه دهد.

Risk Breakdown Structure (RBS)

RBS LEVEL 0	RBS LEVEL 1	RBS LEVEL 2
ریسک پروژه	ریسک‌های مدیریتی و سازمانی	ضعف در برنامه‌ریزی پروژه
		تغییرات مکرر در محدوده کار (Scope)
		کمبود منابع انسانی متخصص
	ریسک‌های فنی و مهندسی	خطا در طراحی پایه یا تفصیلی
		ناسازگاری نقشه‌ها با شرایط سایت
		مشکلات در استانداردها و مشخصات فنی
	ریسک‌های تأمین و لجستیک	تأخیر در تأمین تجهیزات
		مشکلات حمل و نقل داخلی/خارجی
		نبود قطعات یدکی حیاتی
	ریسک‌های اجرایی و نصب	شرایط نامناسب کارگاهی (آب‌وهوا، زمین)
		خطا در نصب تجهیزات
		ضعف در هماهنگی تیم‌های پیمانکاری
	ریسک‌های مالی و اقتصادی	افزایش غیرمنتظره هزینه‌ها
		نوسانات نرخ ارز
		تأخیر در پرداخت کارفرما
	ریسک‌های قراردادی و حقوقی	ابهام در مفاد قرارداد
		ادعاهای پیمانکاران فرعی
		دعاوی ناشی از تأخیر یا کیفیت
	ریسک‌های ایمنی، HSE و زیست‌محیطی	حوادث ناشی از کار در ارتفاع
		آتش‌سوزی یا انفجار
		آلودگی محیط زیست (نشت مواد شیمیایی)
	ریسک‌های خارجی (محیطی و سیاسی)	تغییر قوانین و مقررات دولتی
		محدودیت‌های تحریمی و وارداتی
		ریسک‌های اجتماعی و محلی (اعتراضات، معارضان)

۲) شناسایی ریسک‌ها (Identify Risks)

کمک هوش مصنوعی:

- استخراج خودکار ریسک‌ها از قراردادها و مستندات با پردازش زبان طبیعی (NLP)
- مقایسه پروژه جدید با پایگاه داده‌ی پروژه‌های قبلی برای کشف ریسک‌های مشابه.
- تحلیل شبکه‌های اجتماعی یا اخبار برای کشف ریسک‌های بیرونی (مثل تغییر قوانین یا شرایط بازار).

مثال: استخراج خودکار ریسک از اسناد مناقصه

در این بخش ابتدا اسناد مناقصه را در اختیار هوش مصنوعی قرار دادیم و از آن درخواست کردیم تا ریسک های قراردادی و اجرایی پروژه را در فرمت مشخص شده در روش اجرایی مدیریت ریسک پروژه ها (P۸۰) به ما ارائه دهد. نتیجه به شرح ذیل دریافت شد:

	علت	ریسک (بیان استاندارد: علت ⇒ رویداد)	اثرات اصلی
۱	تغییرات مدنظر کارفرما و اصلاح مشخصات	تغییر دامنه ⇒ افزایش مقادیر/تغییر مشخصات	افزایش زمان و هزینه، ادعا/کلیم، دوباره‌کاری
۲	تأخیر کارفرما در پرداخت صورت‌وضعیت‌ها	کمبود نقدینگی ⇒ کندی پیشرفت	توقف جبهه‌های کاری، جرایم تأخیر، افزایش هزینه مالی
۳	زمان ساخت/حمل اقلام Long-Lead و ریسک تأمین	تأخیر تأمین ⇒ تأخیر نصب	بحرانی شدن مسیر، هزینه تسریع/جایگزینی، جریمه تأخیر
۴	الزامات سخت‌گیرانه HSE سایت	عدم انطباق ⇒ HSE توقف کار/NCR	توقف‌های مکرر، حوادث، هزینه‌های جبران/آموزش مجدد
۵	معیارهای سخت آزمون/تحویل	عدم موفقیت ⇒ FAT/SAT تکرار تست/رفع عیب	تأخیر تحویل موقت/قطعی، هزینه رفع عیب، امکانLD
۶	ابهام در حدود کار و اینترفیس‌ها	تداخل با سایر پیمانکاران ⇒ توقف/دوباره‌کاری	اتلاف زمان، افزایش Claims بین طرف‌ها
۷	وابستگی به مجوزها/خدمات موقت کارفرما	عدم دسترسی به برق/آب/مجوز ورود	تأخیر شروع/ادامه کار، هزینه تدارکات موقت
۸	ناکافی بودن MDR/As-Built/ سیستم مدارک	عدم تأیید مستندات ⇒ حبس پرداخت/تحویل	توقف پرداخت، تأخیر تحویل، هزینه تدوین مجدد
۹	محدودیت‌های دسترسی و لجستیک سایت	انسداد مسیر/پنجره‌های محدود کاری	ازدحام فعالیت‌ها، کاهش بهره‌وری، تأخیر حمل سنگین
۱۰	بندهای تعلیق/خاتمه/فورس‌ماژور	تعلیق/خاتمه یا رویداد قهری ⇒ وقفه طولانی	دموب/ریموب، زیان‌های زمانی/هزینه‌ای، اختلاف حقوقی

۳) تحلیل کیفی ریسک (Perform Qualitative Risk Analysis)

کمک هوش مصنوعی:

- استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای برآورد دقیق‌تر احتمال وقوع بر اساس داده‌های واقعی.
- اولویت‌بندی خودکار ریسک‌ها با الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مثل AHP یا TOPSIS)
- بصری‌سازی تعاملی نقشه ریسک‌ها برای تصمیم‌گیرندگان.

مثال: اولویت‌بندی ریسک با تعیین احتمال و شدت اثر وقوع ریسک

از هوش مصنوعی خواسته شد احتمال وقوع و شدت اثر ریسک را محاسبه کرده، نمره ریسک را مطابق روش اجرایی مدیریت ریسک پروژه‌ها (P۸۰) ارائه دهد و دو ریسک بحرانی را شناسایی کند. پاسخ دریافتی از هوش مصنوعی به شرح ذیل می با شد .

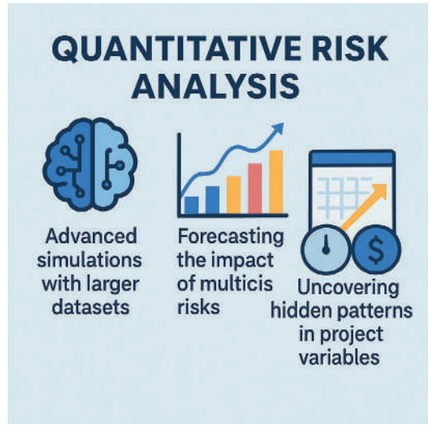
	ریسک (همان ۱۰ مورد قبل)	احتمال وقوع(P)	شدت اثر(I)	نمره ریسک R = P×I
۱	تغییر دامنه توسط کارفرما	0.7	0.7	**0.49**
۲	تأخیر در پرداخت‌ها	0.5	0.9	0.45
۳	تأخیر اقلام Long-Lead و تدارکات	0.7	0.9	**0.63**
۴	عدم انطباق با الزامات HSE سایت	0.3	0.9	0.27
۵	عدم موفقیت در آزمون/تحویل(FAT/SAT)	0.5	0.7	0.35
۶	تداخل اینترفیس‌ها با سایر پیمانکاران	0.5	0.5	0.25
۷	عدم تأمین مجوزها/یوتیلیتی‌های موقت	0.5	0.7	0.35
۸	نارسایی MDR/As-Built/ کنترل مدارک	0.5	0.5	0.25
۹	محدودیت‌های دسترسی/لجستیک سایت	0.5	0.5	0.25
۱۰	فورس‌ماژور/تعلیق/خاتمه	0.3	0.9	0.27

۴) تحلیل کمی ریسک (Perform Quantitative Risk Analysis)

کمک هوش مصنوعی:

- اجرای شبیه‌سازی‌های پیشرفته با داده‌های بزرگتر و متغیرهای بیشتر از آنچه در مدل‌های دستی ممکن است.
- پیش‌بینی تأثیر ترکیبی چند ریسک بر هزینه و زمان پروژه با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌گر.
- یافتن الگوهای پنهان بین متغیرهای پروژه که بر شدت ریسک‌ها اثر می‌گذارند.

مثال: پیش‌بینی Lead Time و قیمت مواد کلیدی



۵) برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک (Plan Risk Responses)

کمک هوش مصنوعی:

- پیشنهاد بهترین استراتژی بر اساس داده‌های گذشته و مدل‌های پیش‌بینی.
- محاسبه خودکار هزینه-فایده هر پاسخ و مقایسه آن‌ها.
- شبیه‌سازی پیامدهای انتخاب هر استراتژی در زمان و بودجه پروژه.

مثال: استخراج رویکرد پاسخ به ریسک و اقدام منتخب

در مرحله بعد، از هوش مصنوعی خواسته شد تا بر اساس ریسک‌های شناسایی‌شده، رویکردهای پاسخ مناسب را مطابق روش اجرایی مدیریت ریسک پروژه ها (P۸۰) پیشنهاد کند و در آخر نیز نتایج مورد انتظار از اقدام منتخب را به ما بگوید که نتایج به شرح ذیل ارائه شد.

نتایج مورد انتظار از اقدام	اقدام منتخب	رویکرد (نحوه کنترل ریسک)	ریسک
کاهش دوباره‌کاری و برگشت‌های مهندسی؛ بازیابی هزینه/زمان تغییرات.	رویه رسمی تغییرات(Change Order) ، قیمت‌گذاری قبل از اجرا؛ درج بند تخصیص هزینه/زمان تغییرات به کارفرما	کاهش + انتقال	تغییر دامنه توسط کارفرما
حفظ نقدینگی پروژه و جلوگیری از توقف جبهه‌های کاری.	تعریف SLA پرداخت، پیش‌بینی جریمه دیرکرد/بهره تأخیر؛ اخذ پیش‌پرداخت و تضمین‌های متناسب	انتقال + کاهش	تأخیر در پرداخت‌ها
کاهش احتمال کمبود تجهیزات و کوتاه‌سازی تأخیر مسیر بحرانی.	سفارش زودهنگام اقلام بحرانی، پایش Milestone تأمین، منبع دوم و بند جریمه تأمین‌کننده	کاهش	تأخیر اقلام Long-Lead و تدارکات
کاهش حوادث و توقف‌ها؛ انطباق با الزامات کارفرما.	تدوین/تأییدHSE Plan ، PTW، آموزش بدو ورود، بازرسی و رسیدگی بهNCR	کاهش	عدم انطباق با الزامات HSE سایت
افزایش احتمال قبولی اولین‌بار، جلوگیری از LD و تأخیر تحویل.	برنامه‌ریزی و اجرایFAT/SAT ، ITP،Witness/Hold و رفع سریع عیوبPunch List	کاهش	عدم موفقیت در آزمون/تحویل(FAT/SAT)
حذف تداخل‌ها و کاهش دوباره‌کاری بین پیمانکاران.	ماتریس اینترفیس، جلسات هماهنگی هفتگی، نقشه‌های مشترک IFCو RFI به‌موقع	کاهش	تداخل اینترفیس‌ها با سایر پیمانکاران
شروع بدون وقفه کارگاه و کاهش توقف‌های ناشی از کمبود.Utility	درج تعهدات خدمات موقت/مجوزها برای کارفرما و برنامه مشترک؛ تهیه منابع موقت جایگزین	انتقال + کاهش	عدم تأمین مجوزها/بوتیلیتی‌های موقت
آزادسازی به‌موقع پرداخت‌ها و تسریع تحویل موقت/قطعی.	تکمیلMDR ، زمان‌بندی تحویل مستندات، کنترل As-Built و تیم مستندسازی کمکی	کاهش	نارسایی/MDR/As-Built کنترل مدارک
بهبود بهره‌وری کارگاه و کاهش ازدحام/تأخیر لجستیک.	برنامه حمل، اخذ مجوزهای ورود/تردد، پنجره‌های حمل شبانه و مسیر جایگزین	کاهش	محدودیت‌های دسترسی/لجستیک سایت
کاهش خسارات زمانی/هزینه‌ای در رخدادهای خارج از کنترل و صیانت قراردادی.	تعریف فرایند اعلان فورس‌ماژور/تعلیق؛ مستندسازی آثار و مذاکره تمدید زمان؛ حذف فعالیت‌های پرریسک غیرضروری	پذیرش مشروط + اجتناب (در بخش‌های قابل حذف)	فورس‌ماژور/تعلیق/خاتمه

۶) اجرای پاسخ‌ها (Implement Risk Responses)

کمک هوش مصنوعی:

- پیش‌بینی زمان‌بندی اجرای پاسخ‌ها و هشدار زودهنگام.
- بهینه‌سازی تخصیص منابع برای اجرای پاسخ‌ها.
- نظارت خودکار بر اثربخشی پاسخ‌ها و یادگیری تطبیقی.

مثال: نحوه فرآیند اجرای پاسخ‌ها

از هوش مصنوعی پرسیده شد ورودی های مورد نیاز خود را در فرآیند اجرای پاسخ، برای ریسک بحرانی شناخته شده اعلام کند و همچنین اقداماتی را که برای ما انجام خواهد داد به همراه خروجی کار ارائه دهد.

به عنوان نمونه ریسک تأخیر اقلام Long-Lead (R=۰/۶۳) از جدول ریسک‌ها بررسی گردید.

ورودی: سوابق خرید، اینکوترمز، برنامه تولید سازنده، وضعیت حمل/گمرک، اخبار اختلال زنجیره تأمین.

AI چه می‌کند؟ مدل پیش‌بینی ETA و ریسک تأخیر هر آیتم + امتیازدهی سازنده‌ها و پیشنهاد اقدام (Expedite، منبع دوم، تغییر مشخصه مورد تأیید)

خروجی اجرایی: داشبورد *Heat-map تدارکات* با هشدار <۱۴ روز قبل از بحرانی‌شدن مسیر، لیست اقدام تسریع و نامه استاندارد به سازنده.

در اخر هوش مصنوعی ریسک بحرانی شناخته شد را به عنوان مثال تبدیل به یک Playbook اجرایی کرد. (ورودی‌ها، مدل، تریگر، مسئول، SLA اقدام، و KPI موفقیت)

ریسک تأخیر اقلام Long-Lead

ورودی داده: سفارش‌ها (PO)، برنامه تولید سازنده، وضعیت حمل/گمرک، تاریخچه OTIF فروشنده،Lead واقعی گذشته، لاگ تسریع، تغییرات مشخصات.

PO_ID	Item	Vendor	Incoterm	Lead weeks	Promised ETD	Predicted_ Delay_days	Risk Score	Status	Trigger	Next_Action	Owner	Action_SLA _days	Due_Date	Notes
PO-001	Main Feed Pump	ABC Pumps	FOB	24	12/7/2025	18	0.63	Red	ETA variance > 14 days	Expedite + partial shipment + weekly vendor call	Procurement Lead	7	10/15/2025	Model confidence: 0.78, all vendor shortlisted
PO-002	Control Valve Set	FlowTech	CIF	12	11/12/2025	5	0.35	Amber	Supplier OTIF < 90%	Issue corrective plan; qualify second source	Procurement Lead	10	10/18/2025	Awaiting FAT schedule
PO-003	Instrumentation Cables	IranCable	EXW	8	11/2/2025	0	0.2	Green	None	Routine follow-up per cadence	Buyer	14	10/22/2025	—

مدل‌ها/هوش مصنوعی: پیش‌بینی ETA و «Predicted_Delay_days» هر آیتم (مدل سری‌زمانی یا گرادیان بوستینگ).
امتیازدهی ریسک تأمین‌کننده (کیفیت، تأخیر، NCR)

تریگرهای کنترلی: ETA variance > ۱۴ روز یا Lead > ۱۲ هفته یا OTIF < ۹۰٪

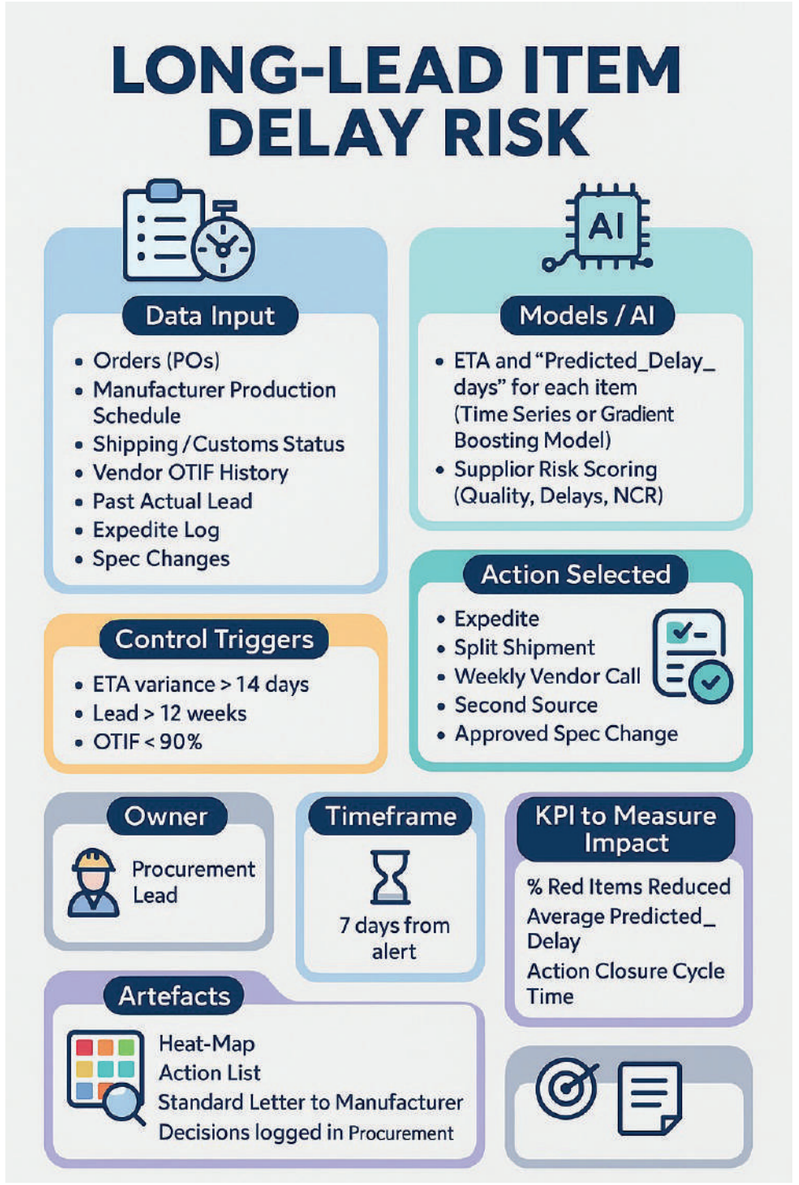
اقدام منتخب: تسریع (Expedite)، حمل جزئی، تماس هفتگی با Vendor، منبع دوم، تغییر مشخصه مورد تأیید کارفرما.

مالک: Procurement Lead

اقدام: ۷ روز از لحظه هشدار.

KPI سنجش اثر: کاهش ٪ آیتم‌های قرمز، میانگین Predicted Delay، زمان چرخه بستن اقدام.

Artefactها (خروجی‌های ملموس): «Heat-map تدارکات»، لیست اقدامات، نامه استاندارد به سازنده، ثبت تصمیمات در شیت Procurement Risk.



۷) پایش و کنترل ریسک (Monitor Risks)

کمک هوش مصنوعی:

- پایش بلادرنگ پروژه با داده‌های سنسورها، گزارش‌های روزانه و سیستم‌های ERP
  تشخیص الگوهای هشداردهنده برای ریسک‌های در حال وقوع (مثلاً تأخیرهای متوالی یا افزایش هزینه‌ها).
- تولید داشبورد هوشمند و گزارش خودکار برای مدیران پروژه.

مثال: خلاصه هفتگی برای کمیته ریسک/کارفرما

جمع‌بندی

مدیریت ریسک پروژه طبق PMBOK ذاتاً یک فرآیند داده‌محور و تکرارشونده است، اما در عمل به دلیل محدودیت‌های انسانی و ابزارهای سنتی، با مشکلاتی مثل سوگیری در قضاوت، حجم بالای داده‌ها و کندی تصمیم‌گیری روبه‌رو می‌شود. هوش مصنوعی می‌تواند این محدودیت‌ها را پوشش دهد و مدیریت ریسک را از یک فعالیت صرفاً واکنشی به یک فرآیند پیش‌فعال و هوشمند ارتقا دهد.

- در شناسایی ریسک‌ها: AI با استفاده از NLP و تحلیل داده‌های پروژه، ریسک‌های پنهان در قراردادها و شبکه‌های اجتماعی را سریع‌تر و جامع‌تر کشف می‌کند.

- در تحلیل ریسک‌ها: با یادگیری ماشین و شبیه‌سازی‌های پیچیده (مثل مونت‌کارلو)، می‌توان احتمال و اثر ریسک‌ها را دقیق‌تر سنجید و وابستگی‌های پیچیده بین آن‌ها را کشف کرد.
- در برنامه‌ریزی و پاسخ به ریسک‌ها: هوش مصنوعی امکان طراحی راهبردهای پاسخ بهینه را بر اساس تحلیل هزینه-فایده و سناریوهای پیش‌بینی فراهم می‌آورد.
- در پایش ریسک‌ها: با اتصال به داده‌های لحظه‌ای پروژه، AI می‌تواند انحراف‌ها یا ریسک‌های نوظهور را زودتر هشدار دهد و حتی اقدامات اصلاحی پیشنهاد کند.

نکته کلیدی

ادغام AI در مدیریت ریسک، فقط به معنای سریع‌تر و دقیق‌تر شدن تحلیل‌ها نیست؛ بلکه ماهیت تصمیم‌گیری را تغییر می‌دهد:

- از تحلیل گذشته‌نگر (Reactive) به سمت مدیریت آینده‌نگر (Predictive & Prescriptive)
- از وابستگی به افراد کلیدی به سمت سیستم‌های هوشمند و داده‌محور
- از مدیریت مقطعی ریسک به سمت پایش بلادرنگ و مستمر

اگرچه چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های باکیفیت، هزینه اولیه و شفافیت تصمیمات در مسیر پیاده‌سازی هوش مصنوعی وجود دارد، اما سودمندی ملموس آن در کاهش تأخیرها، کنترل هزینه‌ها و افزایش احتمال موفقیت پروژه، این چالش‌ها را توجیه‌پذیر می‌کند.

نتیجه‌گیری نهایی

ادغام هوش مصنوعی در مدیریت ریسک پروژه دیگر یک گزینه لوکس نیست، بلکه یک ضرورت راهبردی برای بقا و موفقیت در محیط‌های پیچیده و پرریسک امروزی است.

هوش مصنوعی در حال تبدیل شدن به یک همکار بلادرنگ، خستگی‌ناپذیر و بسیار دقیق برای مدیران پروژه است که آنان را در تبدیل عدم‌قطعیت‌ها به فرصت‌های کنترل‌شده یاری می‌رساند. آینده متعلق به سازمان‌ها و مدیرانی است که بتوانند از این توانمندساز تحول‌آفرین، حداکثر بهره را ببرند.

منابع

۱. Project Management Institute. (۲۰۲۱). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide) (۷th ed.).

۲. Hillson, D. (۲۰۱۷). Practical project risk management: The ATOM methodology.

۳. Zhang, L., Wu, X., & Skibniewski, M. J. (۲۰۱۴). Application of artificial intelligence methods in construction project risk management: A review. Automation in Construction, ۴۹, ۱-۱۴.

۴. روش اجرایی مدیریت ریسک پروژه‌ها (P۸۰)

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)

بهروز شهبازی

۱. مقدمه

طراحی و استقرار سیستم‌های نگهداری و تعمیرات یکی از مسائل حیاتی امروز صنایع به شمار میرود و به عنوان یکی از عوامل موثر در بهبود کارکرد دستگاه‌ها مورد توجه بوده است. این مهم نقش بسزایی در حفظ قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی، کیفیت محصول، افزایش بازدهی و کاهش ریسک و همچنین امنیت تجهیزات برعهده دارد. لذا از جایگاه ویژه‌ای در صنایع برخوردار است. (تقی پور و آوخ دارستانی، ۱۳۹۶)

با پیشرفت تکنولوژی و پیچیده‌تر شدن روش‌های استفاده و نگهداری و تعمیرات، نیاز به دانش و تجربه بیشتر احساس می‌شود. لذا بایستی سعی شود تا حد ممکن عمر ماشین‌آلات و تجهیزات را افزایش داد و بیشترین کارایی را در طور شبانه روز از آن‌ها طلب کرد که این مهم با بکارگیری یک سیستم نگهداری و تعمیرات مناسب و متناسب با صنعت موردنظر، امکان‌پذیر خواهد بود. با در اختیار داشتن یک سیستم نگهداری و تعمیرات هدفمند و کارا می‌توان قیمت تمام شده خدمات یا محصولات را به میزان قابل توجهی کاهش داد. (شاکری و ساعدی، ۱۳۹۰)

امروزه سازمان‌های صنعتی و بخش‌های درگیر آن‌ها در امر نگهداری و تعمیرات، از یک سو به دلیل هزینه‌های بالای نیروی انسانی، قطعات مصرفی و مجموعه سرمایه‌گذاری‌های اولیه که نسبتاً زیاد محسوب می‌شوند و از سوی دیگر به دلیل اهمیت زیاد مدت زمان انجام کارها و عوامل دیگری از قبیل ارز بری، وابستگی‌های فنی و گاهاً راهبردی و ...، به دنبال روش‌ها و برنامه‌های جدید به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی تجهیزات و ماشین آلات خود می‌باشند. (دبیری اقدم و همکاران، ۱۳۸۴)

یکی از رویکردهایی که در زمینه نگهداری و تعمیرات توجه ویژه‌ای را در سالیان اخیر به خود جلب کرده است، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان می‌باشد که بر اساس هوشمندسازی سیستم نگهداری و تعمیرات عمل می‌کند و تا حدودی توانسته است نیاز سازمان‌ها در جلوگیری از توقف‌های پیش‌بینی شده را بگیرد.

همانطور که می‌دانید نگهداری و تعمیرات ضمانت ادامه فعالیت دارایی‌های فیزیکی سازمان با توجه به انتظار کاربران می‌باشد. اینکه کاربران چه انتظاراتی دارند وابسته به این است که تجهیز دقیقاً در کجا و چگونه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر شرایط عملیات چگونه است. لذا می‌توان نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان را اینگونه تعریف کرد:

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان عبارت است از فرآیندی برای تعیین آنچه باید انجام شود تا ادامه فعالیت دارایی فیزیکی در انجام آنچه کاربرانش در شرایط عملیاتی موجود انتظار دارند، تضمین شود. (زواشکیانی و آزادگان، ۱۳۸۹، ص ۲۴)

۲. مبانی و چارچوب مفهومی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)

۲/۱. تعریف

قابلیت اطمینان (پایایی) عبارت است از احتمال اینکه یک سیستم، تجهیز یا جزء، در شرایط کاری مشخص و برای مدت زمان معین، بدون خرابی وظیفه مورد انتظار خود را انجام دهد. در راستای تعریف نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در بخش قبل، می توان اینگونه بیان کرد که RCM عبارتست از فرآیندی که اقدامات مورد نیاز نگهداری و تعمیرات ماشین آلات و تجهیزات را در شرایط کاری مختلف تعیین می‌نماید تا هر یک از این تجهیزات وظایف اصلی خود را به بهترین نحو ممکن به انجام برسانند. مانیتورینگ و پایش شرایط ماشین آلات و تجهیزات، نقش اساسی و مهمی در این فرآیند دارد و در حقیقت این فرآیند با انجام اقدامات زیر تکمیل می شود:

- شناسایی و معرفی ماشین‌آلاتی که در وضعیت بحرانی قرار دارند.
- تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر در قابلیت اطمینان
- تجزیه و تحلیل حالات خرابی و آثار آن
- تجزیه و تحلیل اثرات خرابی یک ماشین بر کل کارخانه (نوری، ۱۳۸۳)
-

RCM مفهومی است که عموماً برای دستیابی به پیشرفت‌هایی در زمینه‌هایی چون ایجاد سطوح مینیمم نگهداری و تعمیرات امن، تغییر رویه‌ها و راهبردهای عملیاتی و ایجاد رژیم‌ها و طرح‌های حفظ سرمایه مورد استفاده قرار می‌گیرد و اجرای موفقیت آمیز آن منجر به افزایش اثربخشی هزینه، زمان کار دستگاه و درک بیشتر از سطح ریسکی خواهد شد که سازمان در حال مدیریت آن است.

جان موبری RCM را به عنوان فرآیندی برای تعیین سطوح حداقلی امن نگهداری و تعمیرات توصیف نمود. این توصیف در گزارش‌های نوولان و هیپ از شرکت هواپیمایی یونایتد نیز تکرار شد. جهت اجرای فرآیند RCM می‌بایست با بکارگیری یک چارچوب سازمان یافته در مورد ماشین‌آلات و تجهیزات موجود و شرایط کاری آن‌ها، به هفت سوال به شرح ذیل درباره تجهیز یا سیستم مورد بررسی، پاسخ داده شود:

۱. مورد فرضی که باید انجام شود و استانداردهای عملکرد مرتبط با آن چیست؟
۲. از چه راه‌هایی ممکن است نتواند کارکردهای مورد نیاز را ارائه کند؟
۳. وقایعی که موجب هر خرابی می‌شوند چیست؟
۴. هنگام بروز هر خرابی چه اتفاقی می‌افتد؟
۵. هر خرابی چه قدر اهمیت دارد؟
۶. کدام کار سیستماتیک پیشگیرانه را می‌توان انجام داد تا از عواقب خرابی جلوگیری شده یا به میزان مطلوبی کاهش یابد؟
۷. در صورت عدم یافتن یک کار پیشگیرانه مناسب، چه باید کرد؟

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، یک چارچوب مهندسی است که تعریف یک رژیم نگهداری و تعمیرات کامل را امکان‌پذیر می‌کند. این چارچوب، نگهداری و تعمیرات را به عنوان ابزاری برای حفظ کارکردهایی در نظر می‌گیرد که ممکن است کاربر از ماشین‌آلات در یک زمینه عملیاتی مشخص انتظار داشته باشد. همچنین به عنوان یک دیسیپلین، ذینفعان ماشین‌آلات را قادر می‌سازد تا کار دارایی‌های فیزیکی خود را پایش، ارزیابی، پیش بینی و به طور کلی درک نمایند.

فرآیند RCM در بخش های مختلفی در سازمان پیاده‌سازی و اجرا می‌گردد که بخش اول آن به شناسایی زمینه عملیاتی ماشین‌آلات و نوشتن اثرات حالت خرابی و تحلیل انتقادی آنها می‌پردازد.

بخش دوم آن به تحلیل و اعمال منطق RCM مربوط می‌شود که به تعیین وظایف مناسب نگهداری و تعمیرات برای حالت‌های خرابی شناسایی شده در بخش اول، می‌پردازد. زمانی که منطق برای همه اجزای شناسایی شده کامل باشد، فهرست حاصل از نگهداری و تعمیرات اصطلاحاً «بسته بندی» می‌شود، طوری که دوره‌های زمانی وظایف، منطقی می‌شوند تا به صورت بسته‌های کار فراخوانی گردند. لذا می‌توان گفت RCM در سراسر دوره نگهداری و تعمیرات، قابلیت ارائه سرویس را دارد و اثر بخشی سیستم نگهداری و تعمیرات را تحت بررسی مداوم قرار می‌دهد و با توجه به تجربه به دست آمده، تعدیل می‌نماید.

از RCM می‌توان برای ایجاد یک استراتژی نگهداری و تعمیرات مقرون به صرفه برای رفع علل عمده خرابی تجهیزات و ماشین‌آلات استفاده کرد و می‌توان گفت که یک رویکرد سیستماتیک برای تعریف برنامه نگهداری و تعمیرات رایج متشکل از کارهای مقرون به صرفه است که کارکردهای مهم را حفظ می‌نماید. این مهم علاوه بر اقدامات پیشگیرانه سنتی، بر کاربرد تکنیک‌های نگهداری پیش‌بینانه (PdM) هم تاکید دارد.

RCM یک روش مهندسی در جهت ایجاد ارتباط بین فعالیت‌های نت و مکانیزم خرابی‌ها به کمک یک ساختار منطقی می‌باشد که هدف آن دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر (متناسب با میزان هزینه) به وسیله انجام آیتم‌های ضروری (و نه بیشتر) می‌باشد. در واقع این مهم فرآیندی است که تعیین می‌کند چه کارهایی باید انجام شود تا این اطمینان حاصل گردد که یک ماشین وظایف خود را به درستی انجام می‌دهد. به بیان دیگر، RCM علم انتخاب فعالیت نگهداری و تعمیرات مناسب براساس قابلیت اطمینان مورد انتظار از سیستم، خطاها و تاثیر خطاهای تجهیزات می‌باشد (یزدیان، ۱۳۹۰).

یک سیستم RCM مستقل و هوشمند قادر است سطح قابلیت اطمینان سیستم تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر را پایش نموده و نوع فعالیت نگهداری و تعمیرات مورد نیاز را تعیین و به ما ارائه نماید (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۸).
فرآیند RCM توصیف شده در گزارشات، سه ریسک اصلی ناشی از خرابی تجهیزات را به شرح تهدیدات در قبال ایمنی، قابلیت دسترسی و بهینه‌سازی هزینه‌ها تشخیص می‌دهد و بیشترین تاثیر نگهداری و تعمیرات را برای ماشین‌آلات بر مبنای این موارد ایجاد می‌کند. (نوری، ۱۳۸۳)

۲/۲. مقایسه RCM با نگرش‌های قبلی نگهداری و تعمیرات

نگهداری و تعمیرات مجموعه‌ای از فعالیتها و عملکردها است که هر کدام با توجه به تعاریف خود، ماموریت عملیاتی نگهداشتن دستگاه‌ها، ماشین‌آلات و تجهیزات را دارند که باعث می‌گردند قابلیت عملیاتی آنها حفظ شود. از دهه ۱۹۳۰ تاکنون می‌توان سیرتکاملی نگهداری و تعمیرات شامل تحولات و تغییرات آن حوزه را به سه دوره تقسیم نمود:

۲/۲/۱. دوره اول و BM

نسل اول شامل دوره قبل از جنگ جهانی دوم می‌شود. در آن زمان صنایع به شکل امروزی مکانیزه و ماشینی نشده بود و لذا خرابی‌ها و زمان توقف ماشین‌آلات و تجهیزات اهمیت زیادی نداشت و مشکل جدی را برای بیشتر مدیران و دست اندرکاران امر تولید ایجاد نمی‌نمود. به بیان دیگر، مفهوم جلوگیری از بروز عیب در ذهن اکثر مدیران و مهندسین ناشناخته بود و ضرورتی در این خصوص از جانب آن‌ها احساس نمی‌شد. از طرف دیگر بیشتر تجهیزات ساده و در عین حال بسیار قوی‌تر از میزان مورد نیاز، طراحی شده بودند. لذا این مهم باعث قابل اطمینان بودن آنها و همچنین سهولت تعمیرآن‌ها می‌گردید. نتیجه آنکه در آن زمان نیازی به استفاده از نت سیستماتیک فراتر از سروی های دوره‌ای نظیر روغن‌کاری یا تمیزکاری عادی احساس نمی‌شده و اکثر شرکت‌ها و واحدهای تولیدی و صنعتی تنها در زمانی که دستگاه و یا تجهیزات از کار می‌افتادند، نسبت به بازبینی یا تعمیر آن‌ها اقدام می‌نمودند. در حقیقت سیستم نگهداری و تعمیرات در زمان از کار افتادگی معمول و کارآمد بود که با (Breakdown Maintenance) شناخته می‌شود.

۲/۲/۲. دوره دوم و PM

در طول جنگ جهانی دوم همه چیز به طور سلسله‌وار دستخوش تغییر گردید. در آن زمان تقاضا برای کالا افزایش یافته بود در حالی که سطح نیروی انسانی صنعتی به شدت افت نموده بود. این عامل باعث افزایش مکانیزاسیون صنعت گردید. در دهه ۱۹۵۰ ماشین‌آلات و تجهیزات پیچیده تر و متنوع‌تر شدند که این مهم منجر به آغاز وابستگی صنعت به ماشین گردید. با رشد این وابستگی، رفته رفته تمرکز روی زمان توقف بیشتر از گذشته احساس شد. لذا تفکر جلوگیری از خرابی تجهیزات شکل گرفت که نهایتاً منتهی به ایجاد مفهوم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (Preventive Maintenance) گردید. در دهه ۱۹۶۰ این مفهوم بیشتر شامل انجام تعمیرات اساسی ماشین‌آلات و تجهیزات در فواصل زمانی ثابت می‌شد.
از طرفی افزایش تدریجی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات به نسبت هزینه سایر فعالیت‌ها، باعث پدید آمدن و رشد سیستم‌های برنامه‌ریزی و کنترل نگهداری و تعمیرات شد که کمک شایانی به تحت کنترل درآوردن نگهداری و تعمیرات نمودند و امروزه نیز نقش مهمی در این خصوص دارند.

۲/۲/۳. دوره سوم و RCM

از اواسط دهه ۱۹۷۰، فرآیند تغییر در صنعت شتاب حتی نسبت به گذشته شتاب بیشتری گرفت. در این دوره سرمایه‌گذاری روی ماشین‌آلات صنعتی و اتوماسیون افزایش یافت که منجر به ارزش مالی و اقتصادی آن‌ها شد و نهایتاً مدیران و صاحبان صنایع را بر آن داشت که به فکر راهکارهای منطقی جهت افزایش طول عمر مفید تجهیزات تولیدی بیفتند و عملاً چرخه عمر اقتصادی آن‌ها را طولانی‌تر نمایند. افزایش سطح اثربخشی تجهیزات و ماشین‌آلات، بهبود کیفیت محصولات در کنار کاهش هزینه‌های نت و عدم خسارت به محیط زیست از جمله مواردی بودند که باعث ایجاد تحول در زمینه نگهداری و تعمیرات گردیدند. از جمله دست‌آوردهای جدید نت در این دوره می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱. معرفی سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM) و ترویج استفاده از روش‌های پایش وضعیت (CM) نظیر آنالیز لرزش، حرارت سنجی و ...
۲. معرفی و بکارگیری انواع روش‌ها و تکنیک‌های تجزیه و تحلیل خرابی‌های ماشین‌آلات
۳. طراحی تجهیزات با تاکید بیشتر بر قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر آن‌ها
۴. تحول در تفکر سازمانی و گرایش آن به سمت مشارکت، انعطاف پذیری و کار گروهی
۵. معرفی سیستم نگهداری و تعمیرات مؤثر
۶. معرفی سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به عنوان یک روش جامع در جهت تصمیم‌گیری برای استفاده درست از سیستم های نگهداری و تعمیرات موجود.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی شرح داده شد، RCM را می‌توان به عنوان فرآیندی معرفی کرد که اولاً معین می‌کند چه کاری می‌بایست برای تداوم عمر هرگونه سرمایه فیزیکی انجام شود و ثانیاً در جهت عملی نمودن انتظاراتی که کاربران از تجهیزات دارند حرکت می‌کند.

در مقایسه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان با نگرش‌های قبلی می‌توان به عنوان نمونه به موارد زیر که میزان بهبود و اثر بخشی این سیستم‌ها را نسبت به موارد قبلی نشان می‌دهد، اشاره نمود:

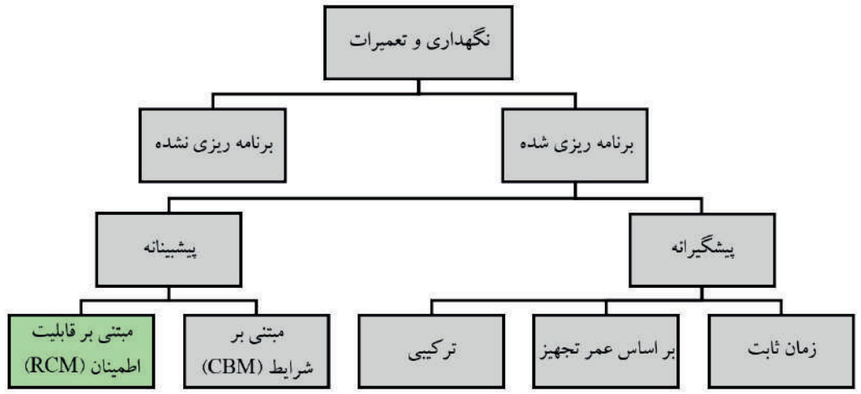
۱. در این سیستم‌ها هدف از اجرای نت، حفظ کارکرد و میزان دقت ماشین‌آلات و تجهیزات است، در حالی‌که در نگرش‌های قبلی هدف از اجرای نت، حفاظت و نگهداری از ماشین‌آلات و تجهیزات بوده است.
۲. این سیستم‌ها در زمینه اجتناب، کاهش یا حذف اثرات خرابی‌ها می‌باشند، در حالی که سیستم قدیمی در زمینه پیشگیری از بروز خرابی‌ها می‌باشد.
۳. مهمترین تاثیر اجرای صحیح نت مطابق نگرش‌های قبلی، افزایش قابلیت دسترسی به ماشین‌آلات (به عبارت دیگر کاهش توقفات) با کمترین هزینه ممکن می‌باشد، در صورتی که اثرات اجرای نت مطابق نگرش‌های جدید، به افزایش قابلیت دسترسی به ماشین‌آلات و کاهش هزینه‌ها محدود نبوده بلکه مواردی همچون افزایش ارزش افزوده تولید، حفظ محیط زیست، بازده انرژی، کیفیت تولید، افزایش ایمنی در محیط کار و رضایت مشتریان را نیز در بر می‌گیرد.
۴. در نگرش‌های قبلی احتمال وقوع خرابی در بسیاری از ماشین‌آلات و تجهیزات با افزایش طول عمر آنها، افزایش می‌یابد در حالی که در نگرش‌های جدید احتمال وقوع بسیاری از خرابی‌ها ارتباطی با طول عمر ماشین‌آلات و تجهیزات ندارد.
۵. در نگرش‌های قبلی به منظور پیاده‌سازی و اجرای یک برنامه نت موفق جهت ارزیابی وضعیت، نیاز است که اطلاعات جامعی از نرخ خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات در دسترس باشد، در حالی‌که در سیستم جدید این‌گونه نمی‌باشد و عموماً تصمیم‌گیری‌ها برای کاهش خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات و همچنین پیاده‌سازی و اجرای برنامه‌های نگهداری و تعمیرات برای آن‌ها، تقریباً در همه موارد بدون نیاز به اطلاعات کافی در زمینه نرخ خرابی انجام می‌پذیرد.
۶. در نگرش‌های قبلی حوادثی که منجر به خرابی‌های چندگانه روی ماشین آلات می‌شوند، معمولاً نتیجه بد شانسی بوده و از این رو قابل کنترل نیستند، اما در نگرش‌های جدید که بر اساس سیستم‌های تحت کنترل پایه‌ریزی شده اند، احتمال اینکه یک خرابی با عوارض چندگانه رخ دهد به عنوان یک متغیر قابل کنترل می‌باشد. (یزدیان، ۱۳۹۰)

۲/۳. نگهداری و تعمیرات پیشبینانه

انقلاب صنعتی چهارم که با ظهور فناوری‌های نوین و نوظهور نظیر رباتیک، هوش مصنوعی و ... همراه است، منجر به استفاده گسترده از حسگرها شده که باعث تسهیل عملیات تولید می‌شوند. با کاربرد الگوریتم‌های پیش‌بینی و شناسایی شکست‌های آینده در زمان حقیقی، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه به طرز معنی‌داری در جهت کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد سیستم کسب و کار، از این پیشرفت‌های فناوری بهره‌مند شده است، زیرا از داده‌های غیر یکنواخت برای تشخیص رفتارهای غیر طبیعی تجهیزات (تشخیص)، پیش بینی حالت‌های شکست در آینده (پیش‌آگاهی) و پشتیبانی از تصمیمات در زمان آتی (تصمیم‌گیری واکنشی) استفاده می‌کند. (دو و همکاران، ۲۰۱۵)
در طول سالیان گذشته، به واسطه الگوریتم‌های تصمیم‌گیری، پیش‌بینی شکست‌ها انجام می‌شده است. در شکل ۱ اختراع‌های مهم که در دوره‌های مختلف انقلاب صنعتی رخ داده و باعث پیشرفت شگرف در هر دوره نسبت به دوره قبل شده‌اند، ذکر گردیده است.

شکل ۱. روند انقلاب صنعتی

تصمیم‌گیری در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه نشانگر مرحله‌ای است که به پیش‌بینی بر اساس حسگرها در زمان‌های حقیقی نزدیک به یک خرابی می‌پردازد. این امر به منظور ارائه توصیه‌های واکنشی درباره اقدامات نگهداری و تعمیرات مورد نیاز انجام می‌شود تا اثر خرابی پیش‌بینی شده را حذف کرده یا کاهش دهد.
در انقلاب صنعتی چهارم به کاربرد گسترده حسگرها برای پایش شرایط اشاره شده است که قادر هستند در زمان‌های مختلف تصمیم‌گیری را تسهیل نمایند. ولدمن و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود بر این اساس از مفهوم «پنجره فرصت»، یعنی فاصله زمانی بین نقطه‌ای که یک خرابی احتمالی رخ می‌دهد و نقطه‌ای که در آن به یک نقص عملکردی بدتر منجر می‌شود، استفاده نمودند و همچنین نشان دادند که الگوریتم‌های تصمیم‌گیری می‌توانند اقداماتی برای حذف نقص عملکردی پیش‌بینی شده یا کاهش اثر آن داشته باشند. از آنجایی که محیط‌های تولیدی دارای پویایی و پیچیدگی می‌باشند، تصمیم‌گیری به یک کار چالش برانگیز تبدیل می‌شود و این موضوع باعث افزایش علاقه به روش‌ها و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری درباره نگهداری و تعمیرات شده است.
نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان از منظر جایگاه در روش‌های نگهداری و تعمیرات، در بخش امور برنامه ریزی شده پیش‌بینانه می‌گنجد.



شکل ۲. بخش‌بندی نگهداری و تعمیرات

۳. مرور ادبیات نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به دهه ۷۰ میلادی و برنامه‌های نت صنایع هواپیمایی آمریکا بر می‌گردد. زمانی که هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ طراحی شد، یک تیم مهندسی مامور شدند تا برنامه جامع نت پیشگیرانه را برای این هواپیما تدوین نمایند.
پس از تدوین برنامه نت پیشگیرانه، ارزیابی انجام شده نشان داد که هزینه انجام این فعالیت‌ها بسیار بالا و قابل مقایسه با هزینه ساخت هواپیما می‌باشد. لذا تردیدهای جدی درباره لزوم انجام فعالیت‌های PM مفصل به وجود آمد و گروهی تحت عنوان MSG تشکیل شد تا برنامه بهینه‌ای را برای نگهداری و تعمیرات این هواپیما طراحی نماید. مطالعات تخصصی که توسط این گروه انجام شد، نهایتاً منجر به تدوین برنامه‌ای شد که به نام MSG۳ مشهور گردید. MSG۳ در واقع نسخه اولیه از روشی بود که بعدها تحت عنوان RCM در صنعت مشهور گردید.
یکی از اولین گزارش‌هایی که راجع به این موضوع منتشر شد، گزارش Heap و Nowlan است که عضو تیم MSG نیز بوده‌اند. تاریخ انتشار این گزارش نسبتاً مفصل، به سال ۱۹۷۸ میلادی بر می‌گردد و اولین سند رسمی درباره RCM به شمار می‌رود.
اصطلاح نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان اولین بار در مقالات عمومی تالیف شده توسط تام متسون، استنلی نوولان، هوارد هیپ و سایر مدیران و مهندسان ارشد شرکت هواپیمایی یونایتد (UAL) برای توصیف فرآیند مورد استفاده برای تعیین الزامات نگهداری و تعمیرات هواپیما به کار رفت.
RCM یک روش مهندسی در جهت ایجاد ارتباط بین فعالیت‌های نت و مکانیزم خرابی‌ها به کمک یک ساختار منطقی می‌باشد که هدف آن دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر (متناسب با میزان هزینه) به وسیله انجام آیتم‌های ضروری (و نه بیشتر) می‌باشد.
در واقع این مهم فرآیندی است که تعیین می‌کند چه کارهایی باید انجام شود تا این اطمینان حاصل گردد که یک ماشین وظایف خود را به درستی انجام می‌دهد. به بیان دیگر، RCM علم انتخاب فعالیت نگهداری و تعمیرات مناسب براساس قابلیت اطمینان مورد انتظار از سیستم می‌باشد (یزدیان، ۱۳۹۰). یک سیستم RCM مستقل و هوشمند قادر است سطح قابلیت اطمینان سیستم تولید کارگاهی انعطاف پذیر را پایش نموده و نوع فعالیت نگهداری و تعمیرات مورد نیاز را تعیین و به ما ارائه نماید (Rahmati et al. ۲۰۱۸).

در مقایسه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان با نگرش‌های قبلی می‌توان به عنوان نمونه به موارد زیر که میزان بهبود و اثر بخشی این سیستم‌ها را نسبت به موارد قبلی نشان می‌دهد، اشاره نمود:
۱. در این سیستم‌ها هدف از اجرای نت، حفظ کارکرد و میزان دقت ماشین‌آلات و تجهیزات است، در حالیکه در نگرش‌های قبلی هدف از اجرای نت، حفاظت و نگهداری از ماشین‌آلات و تجهیزات بوده است.
۲. این سیستم‌ها در زمینه اجتناب، کاهش یا حذف اثرات خرابی‌ها می‌باشند، در حالی که سیستم قدیمی در زمینه پیشگیری از بروز خرابی‌ها میباشد.
۳. مهمترین تاثیر اجرای صحیح نت مطابق نگرش‌های قبلی، افزایش قابلیت دسترسی به ماشین‌آلات (به عبارت دیگر کاهش توقفات) با کمترین هزینه ممکن می‌باشد، در صورتی که اثرات اجرای نت مطابق نگرش‌های جدید، به افزایش قابلیت دسترسی به ماشین‌آلات و کاهش هزینه‌ها محدود نبوده بلکه مواردی همچون افزایش ارزش افزوده تولید، حفظ محیط زیست، بازده انرژی، کیفیت تولید، افزایش ایمنی در محیط کار و رضایت مشتریان را نیز در بر میگیرد (یزدیان، ۱۳۹۰).
رحمتی و همکاران (۲۰۱۸) با ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه بر مبنای RCM، به بررسی مشترک زمانبندی نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی تولید پرداختند و از آن طریق عملکردهای سیستم نگهداری و تعمیرات یک مسئله برنامه‌ریزی تولید پیچیده تحت عنوان مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر را نشان داده و مدیریت نمودند.
بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲، تمرکز پژوهش‌ها بیشتر بر کاربردهای صنعتی RCM بوده است. برای نمونه، اوکوبی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای روی ماشین شکل‌دهی شیشه نشان دادند که استفاده از FMEA می‌تواند خرابی‌ها را کاهش دهد. نصری و همکاران (۲۰۲۰) نیز با توسعه روشی برای سیستم‌های حفاظتی برق ثابت کردند که RCM قادر است هزینه‌های ناشی از خطا را به‌طور چشمگیری کاهش دهد.
در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها در حوزه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) مسیر تکاملی چشمگیری را طی کرده‌اند. در سال ۲۰۲۲، یانگ و همکاران با ارائه رویکردی مأموریت‌محور برای سیستم‌های چندحالتی، امکان نگهداری فرصت‌محور مبتنی بر قابلیت اطمینان را مطرح کردند و همچنین مطالعه‌ای در صنعت دریایی نشان داد که داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی می‌توانند ارزش افزوده قابل‌توجهی برای اجرای RCM فراهم آورند.
در سال ۲۰۲۳، دا سیلوا و همکاران مفهوم RCM مبتنی بر ریسک (RRCM) را برای بهبود تصمیم‌گیری‌های نگهداری پیشنهاد نمودند. در همین سال، ژونگ و همکاران مروری جامع بر نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر Digital Twin ارائه کردند و جِنا و همکاران چارچوب RCM ۴/۰ را در راستای پیوند Industry ۴/۰ با قابلیت اطمینان مطرح ساختند.
در سال ۲۰۲۴، نسخه توسعه‌یافته RCM ۴/۰ توسط جِنا و همکاران منتشر شد که بر ادغام عمیق‌تر با Digital Twin و IIoT تأکید داشت. همچنین مقاله‌ای درباره برنامه‌ریزی استراتژیک نگهداری در عصر دیجیتال، رویکردی سازمانی برای ترکیب RCM با ابزارهای نوین دیجیتال ارائه کرد. در نهایت، در سال ۲۰۲۵ کالیشفسکی و همکاران چارچوبی RCM محور برای شبکه‌های جریان تعمیرپذیر پیچیده پیشنهاد کردند که گامی مهم در توسعه مدل‌های نگهداری سیستم‌های کلان‌مقیاس محسوب می‌شود.
در مجموع، این روند نشان می‌دهد که از ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵، حرکت اصلی پژوهش‌ها از مدل‌های کلاسیک RCM به سمت نسخه‌های دیجیتال، ریسک‌محور و داده‌محور بوده است.

۴. اجزای اصلی RCM و شبیه سازی آن

هدف اصلی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیرات مقرون به صرفه برای اجزای کارخانه است. لذا اجزای اصلی آن به شرح زیر است:

۴/۱. اجزای اصلی

انتخاب سیستم یا تجهیز مورد بررسی
- تعیین مرزهای سیستم
- شناسایی اجزا و زیرسیستم‌های مهم

تعیین کارکردها و استانداردهای عملکرد
- مشخص کردن اینکه تجهیز یا سیستم دقیقاً چه کاری باید انجام دهد.
- تعیین پارامترهای عملکردی (ظرفیت، کیفیت، سرعت، ایمنی، الزامات محیطی و ...)

شناسایی حالت‌های خرابی
- بررسی اینکه هر جزء به چه شکل می‌تواند خراب شود (سایش، شکست، نشتی، فرسودگی و ...)
- معمولاً با استفاده از روش FMEA یا FMECA

تعیین اثرات خرابی
- توصیف پیامدهای مستقیم هر خرابی (توقف تولید، خطر ایمنی، آلودگی محیطی، هزینه تعمیر و ...)

تجزیه و تحلیل پیامدهای خرابی
- بررسی اهمیت هر خرابی از نظر ایمنی، محیط زیست، عملکرد تولیدی، هزینه مستقیم

انتخاب استراتژی نگهداری مناسب

- بـر اسـاس تحلیـل پیامدهـا و قابلیـت اطمینـان، تصمیم‌گیـری بیـن نگهـداری پیشـگیرانه (PM)، نگهـداری پیش‌بینانـه/وضعیـت محـور (CBM/PdM)، نگهـداری واکنشـی (Run to Failure)، بازطراحـی یـا اصـلاح تجهیـز (در صـورت غیرقابـل قبـول بـودن سـایر گزینه‌هـا)

اجرای برنامه RCM

- پیاده‌سازی وظایف نگهداری و تعمیرات انتخاب‌شده
- برنامه‌ریزی منابع انسانی، ابزار، قطعات یدکی و ...

بازخورد و بهبود مستمر

- ثبت داده‌ها و تحلیل نتایج
- اصلاح برنامه بر اساس تجربه واقعی (RCM یک فرآیند پویا است، نه یک پروژه یک‌باره)

۴/۲. مفهوم RCM و شبیه سازی آن

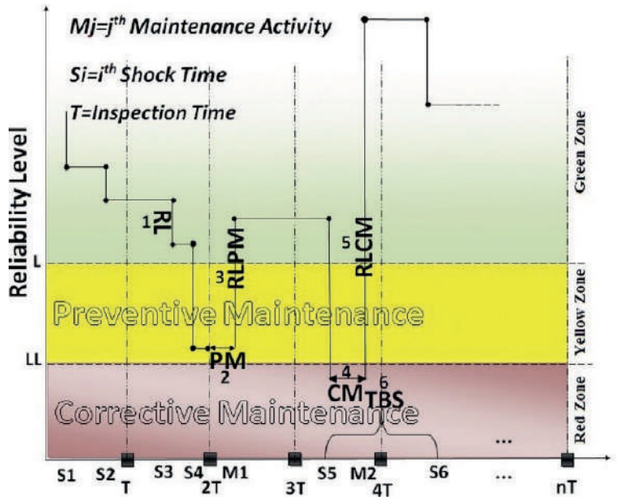
RCM روشـی هوشـمند اسـت کـه حالت‌هـای شکسـت را تعییـن و طبقه‌بنـدی کـرده و تـلاش می‌کنـد تـا قابلیـت اطمینـان سیسـتم را در یـک سـطحی کـه مانـع وقـوع ایـن حالت‌هـا می‌شـود، حفـظ کنـد. بـه عبـارت دیگـر، ایـن روش مفاهیـم کلاسـیک نگهـداری و تعمیـرات ماننـد PM یـا CM را در سیسـتم هوشـمند خـود بـه کار گرفتـه و آن‌هـا را بـا روش‌هـای نگهـداری و تعمیـرات و قابلیـت اطمینـان جدیـد توسـعه می‌دهـد.

در شبیه‌سـازی RCM، فرآینـد شـوک¬دهی و ردیابـی به¬طـور تصادفـی بـرای کاهـش سـطح پایایـی ماشـین¬¬ها بـه کار گرفتـه می¬شـود. (بن-دایـا و همـکاران، ۲۰۰۰).

سـپس بـا توجـه بـه وضعیـت پایایـی سیسـتم و ماشـین¬ها، سیسـتم هوشـمند دسـتورات لازم را بـه منظـور انجـام اقـدام مـورد نیـاز در هـر لحظـه و روی هـر یـک از ماشـین¬ها بـه گونـه¬ای انجـام می¬دهـد کـه شـاخص¬های عملکـردی ماننـد هزینـه بهینـه شـده و پایایـی سیسـتم در بهتریـن سـطح حفـظ گـردد (کابالـه و همـکاران، ۲۰۱۵).

در ایـن RCM، فرآینـد اسـتهلاک و شـوک‌دهی مسـئولیت بـه وجـود آمـدن شـوک و اسـتهلاک ماشـین¬ها را بـا توجـه بـه بـار تخصیـص داده شـده بـه آن‌هـا در هـر لحظـه بـه عهـده دارد. بـه عـلاوه اسـتهلاک پیشـنهادی بـر پایـه سـطح پایایـی سیسـتم کـه تابعـی از شـوک¬های تصادفـی بـه وجـود آمـده اسـت، اقدامـات لازم را پیش¬بینـی و تعییـن می‌نمایـد. البتـه لازم بـه ذکـر اسـت، در ایـن تحقیـق تابـع پایایـی صرفـاً تابعـی از شـوک¬ها و زمـان بـوده ولـی در نسـخه¬های توسـعه یافتـه RCM ایـن مهـم می¬توانـد تابعـی از سـایر عوامـل و متغیرهـا نیـز باشـد.

بـه عـلاوه در ایـن شبیه‌سـازی، دو نـوع اقـدام کلـی CM و PM در نظـر گرفتـه شـده¬ اسـت کـه این¬هـا در سـایر تحقیقـات و در واقعیـت بـا توجـه بـه ابـزار تجزیـه و تحلیـل خرابـی و اثـرات آن (FMEA) موجـود در RCM قابـل توسـعه یـا ریـز شـدن هسـتند. در ایـن مـدل RCM پیشـنهادی، اگـر قابلیـت اطمینـان از اولیـن آسـتانه بحرانـی L کمتـر شـود، فرآینـد PM را پیشـنهاد کـرده و اگـر پایین¬تـر از نـرخ خرابـی LL باشـد، یـک اقـدام اصلاحـی یـا تعویـض رخ می‌دهـد.



شکل ۳. فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات به دلیل قابلیت اطمینان

شـکل ۳ نوسـانات سـطح قابلیـت اطمینـان، حالت‌هـای خرابـی، و متغیرهـای تصادفـی مسـئله را در کنـار فعالیت‌هـای نگهـداری و تعمیـرات انجـام شـده مطابـق بـا وضعیـت قابلیـت اطمینـان معرفـی می‌کنـد. همچنیـن توضیحـات نمادهـا و اعـداد معرفـی شـده در شـکل ۳ نیـز در جـدول ۱ آمـده اسـت:

جدول ۱. توضیحات برای موارد ارائه شده در شکل ۳

نماد	نام رویداد	رویداد
RL	سطح خرابی ناشی از شوک	۱
PMD	طول مدت PM	۲
RLPM	میزان بهبود ناشی از PM	۳
CMD	طول مدت CM	۴
RLCM	میزان بهبود ناشی از CM	۵
TBS	زمان تصادفی بین دو شوک متوالی	۶

نکتـه حائـز اهمیـت آن اسـت کـه حـرف R در RLPM و RLCM در شـکل ۳ تعریـف جدیـد بـر پایـه پایایـی دارد و نـه سـطح بهبـود. مقادیـر S نیـز در ایـن شـکل زمـان شـوک‌ها را نشـان می‌دهـد کـه باعـث کاهـش قابلیـت اطمینـان ماشـین در رونـد شبیه‌سـازی می‌گردنـد.

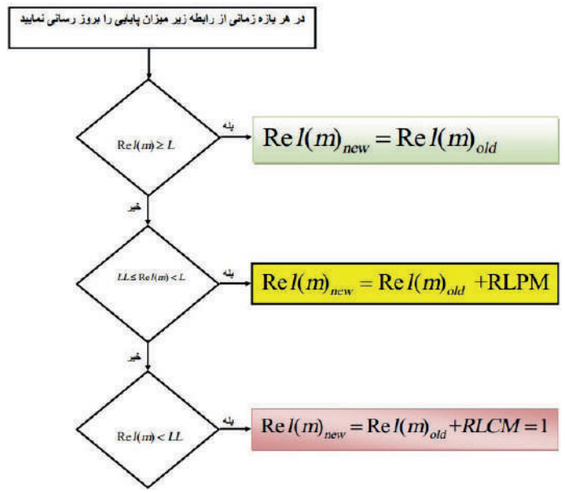
ایـن مثـال شـامل شـش شـوک S1 تـا S6، بـوده کـه در محـور افقـی ارائـه شـده اسـت. مقادیـر M، ماننـد M1 و M2 نیـز نشـان دهنـده زمـان فعالیـت نگهـداری و تعمیـرات jth در ماشـین هسـتند.

پـس از شـوک‌های S1 تـا S3، قابلیـت اطمینـان ماشـین هنـوز بالاتـر از L و در منطقـه سـبز اسـت. بنابرایـن دسـتگاه بـه هیـچ فعالیـت نگهـداری و تعمیراتـی نیـاز نـدارد. سـپس شـوک تصادفـی چهـارم (S۴) قابلیـت اطمینـان ماشـین را نسـبت بـه نگهـداری و تعمیـرات پیشـگیرانه L (منطقـه زرد) کاهـش می‌دهـد.

بنابرایـن در زمـان بازرسـی 2T فعالیـت نگهـداری و تعمیـرات PM قابـل تشـخیص اسـت. فعالیـت نگهـداری و تعمیـرات PM بازسـازی و بهبـود سـطح تخریـب در M۱ و بازگشـت قابلیـت اطمینـان بـه منطقـه سـبز را برعهـده دارد. در ایـن سـطح از قابلیـت اطمینـان تـا زمانـی کـه S۵ اتفـاق بیفتـد، ماشـین کار می‌کنـد. از آنجائـی کـه سـطح قابلیـت اطمینـان ماشـین پـس از شـوک S۵ کمتـر از LL و در منطقـه قرمـز اسـت، نگهـداری و تعمیـرات CM بایـد انجـام شـود.

نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM) با PM، دو تفاوت متمایز به شرح زیر دارد:

۱. بین فواصل بازرسی می‌تواند رخ دهد و باعث شکست ماشین شود.
۲. قابلیت اطمینان را به یک سطح قابلیت اطمینان یک ماشین جدید بر می‌گرداند.



شکل ۴. نحوه بروزرسانی پایایی ماشین‌ها با توجه به سطح پایایی آن‌ها

شکل شماره ۴ نشان دهنده یک متغیر تصادفی است که سطح قابلیت اطمینان (پایایی) ماشین ((Rel(m)) را نشان می‌دهد.

۵.نتیجه‌گیری

RCM یـک رویکـرد هوشـمند و سیسـتماتیک اسـت کـه بـا شناسـایی و طبقه‌بنـدی حالت‌هـای خرابـی، تـلاش می‌کنـد سـطحی از قابلیـت اطمینـان را حفـظ کنـد کـه از بـروز ایـن خرابی‌هـا جلوگیـری نمایـد. بـه عبـارت دیگـر، ایـن روش، مفاهیـم نگهـداری و تعمیـرات پیشـگیرانه (PM) و اصلاحـی (CM) را در چارچوبـی هوشـمند تلفیـق کـرده و آن‌هـا را بـا رویکردهـای نویـن نگهـداری و تعمیـرات و قابلیـت اطمینـان توسـعه می‌دهـد.

پیاده‌سـازی نگهـداری و تعمیـرات مبتنـی بـر قابلیـت اطمینـان (RCM) بـا تمرکـز بـر تحلیـل کارکردهـای سیسـتم، شناسـایی حالت‌هـای بالقـوه خرابـی و بررسـی پیامدهـای ناشـی از آن‌هـا، رویکـردی جامـع و نظام‌منـد بـرای طراحـی و بهینه‌سـازی اسـتراتژی‌های نگهداشـت فراهـم می‌سـازد.

اجـرای ایـن روش عـلاوه بـر کاهـش احتمـال خرابی‌هـای پیش‌بینی‌نشـده، منجـر بـه ارتقـای قابلیـت اطمینـان، افزایـش در دسـترس‌پذیری تجهیـزات و بهبـود سـطح ایمنـی عملیاتـی می‌گـردد. از سـوی دیگـر بهره‌گیـری از RCM موجـب کاهـش هزینه‌هـای چرخـه عمـر تجهیـزات، افزایـش بهـره‌وری منابـع و بهبـود کیفیـت فرآیندهـای تولیـدی می‌شـود.

نکتـه حائـز اهمیـت آن اسـت کـه RCM یـک فرآینـد ایسـتا و ثابـت نبـوده، بلکـه ماهیتـی پویـا و بازخوردمحـور دارد؛ به‌گونـه‌ای کـه بـا اسـتفاده از داده‌هـای واقعـی عملکـرد و شـرایط متغیـر بهره‌بـرداری، قابلیـت به‌روزرسـانی و اصـلاح مسـتمر یافتـه و از ایـن طریـق امـکان تصمیم‌گیـری مبتنـی بـر شـواهد و بهبـود مسـتمر نظـام نگهداشـت سـازمان را فراهـم مـی‌آورد.

فهرست منابع

- تقی‌پـور راضیـه، آوخ دارسـتانی سـروش (۱۳۹۷)، «انتخـاب اسـتراتژی مناسـب نگهـداری و تعمیـرات بـا رویکـرد سلسـله مراتبـی فـازی»، فصلنامـه علمـی - پژوهشـی مطالعـات مدیریـت صنعتـی، سـال شـانزدهم، شـماره ۵۰: صفحـه ۲۲۸-۱۹۳.
- دبیـری اقـدم اصغـر، صابونـی اقـدم عـارف، عصمـت پرسـت مرتضـی، جهانـی زاده محمودرضـا (۱۳۸۴)، «بررسـی روشـهای نویـن نـت در صنعـت هواپیمایـی نظامـی»، سـومین کنفرانـس ملـی نگهـداری و تعمیـرات، ۱۹ شـهریور مـاه، تهـران، تهـران، ایـران.
- شـاکری محسـن، سـاعدی نرگـس (۱۳۹۰)، «بکارگیـری نگهـداری و تعمیـرات مبتنـی بـر قابلیـت اطمینـان در ماشـین آلات کشـاورزی»، پنجمیـن همایـش ملـی بررسـی ضایعـات محصـولات کشـاورزی، ۹ آذر مـاه، مشـهد، خراسـان، ایـران.
- موبـری جـان (۱۳۸۹)، نگهـداری و تعمیـرات مبتنـی بـر قابلیـت اطمینـان، علـی زواشـکیانی و رضـا آزادگان، انتشـارات آریانـا قلـم، تهـران، ایـران.
- نـوری علیرضـا (۱۳۸۳)، «نگهـداری و تعمیـرات مبتنـی بـر قابلیـت اطمینـان، هفتمیـن همایـش حمـل و نقـل ریلـی»، دانشـگاه صنعتـی شـریف، ۹ و ۱۰ اردیبهشـت مـاه، تهـران، تهـران، ایـران.
- یزدیـان احمـد، (۱۳۹۰)، «چگونـه نگهـداري و تعميـرات مبتنـي بـر قابليـت اطمينـان (RCM) را در يـک کارخانـه پيـاده کنيـم؟»، چهارميـن کنفرانـس ملـی نـت، ۱۷ دی مـاه، تهـران، تهـران، ایـران.

- Ben-Daya, M., Duffuaa, S., Raouf, A. (۲۰۰۰), »A generic conceptual simulation model for maintenance systems«. International Journal of Production Economics, ۵۲-۴۱ :(۳-۱)۶۴.
- da Silva, R.F., Melani, A.H.d.A., Michalski, M.A.d.C., de Souza, G.F.M. (۲۰۲۳), »Reliability and Risk Centered Maintenance: A Novel Method for Supporting Maintenance Management«. Appl. Sci., ۱۰۶۰۵ :۱۳.
- Do P., Vu H.C., Barros A., Brenguer C. (۲۰۱۵), »Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams«, Reliability Engineering & System Safety ۶۷-۵۶ :۱۴۲.
- Jena, M. C., Mishra, S. K., Moharana, H. S. (۲۰۲۴), »Integration of Industry ۴/۰ with reliability centered maintenance to enhance sustainable manufacturing«. Environmental Progress & Sustainable Energy, ۲)۴۳): e۱۴۳۲۱.
- Kabale, R., Oke, A., Smith, J. (۲۰۱۵), »An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities«. Journal of Quality in Maintenance Engineering, ۲۵۸-۲۴۵ :(۳)۲۱.
- Kaliszewski, N., Marian, R., Chahl, J. (۲۰۲۵), »A reliability centred maintenance-oriented framework for modelling, evaluating, and optimising complex repairable flow networks«. Complex & Intelligent Systems, :(۵)۱۱ ۱۵-۱.
- Nasri, M.H., Derakhshandeh, S.Y., Kargar, A. (۲۰۲۰), »A Novel Method to Apply Reliability-Centered Maintenance on Over-Current Protection Systems«. Electric Power Components and Systems, ۱۰۳۵-۱۰۲۱ :(۱۰-۹)۴۸.
- Okwuobi, S., Ishola, F., Ajayi, O., Salawu, E., Aworinde, A., Olatunji, O., Akinlabi, S. A. (۲۰۱۸), »A Reliability-Centered Maintenance Study for an Individual Section-Forming Machine«. Machines, ۵۰ :(۴)۶.
- Rahmati S.H.A., Ahmadi A., Karimi B. (۲۰۱۸), »Developing simulation-based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem«, Scientia Iranica ۲۸۰۶-۲۷۸۸ :۲۵.
- Veldman J., Wortmann J.C., Pol H. (۲۰۱۱), »Typology of condition-based maintenance«, International Journal of Production Economics, ۱۳-۱ :(۱)۱۳۱.
- Yang, X., He, Y., Zhou, D., & Zheng, X. (۲۰۲۲), »Mission reliabilitycentered maintenance approach based on quality stochastic flow network for multistate manufacturing systems«. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability, ۴۶۷-۴۵۵ :(۳)۲۴.
- Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., Duan, J. (۲۰۲۳), »Overview of predictive maintenance based on digital twin technology«. Heliyon, ۴ ۹): e۱۴۵۳۴.

گروه مپنا

شرکت مهندسی و ساخت
بویلر و تجهیزات مپنا

گاهنامه تخصصی

آب و بخار

www.mapnabe.com
mailbox@mapnabe.com