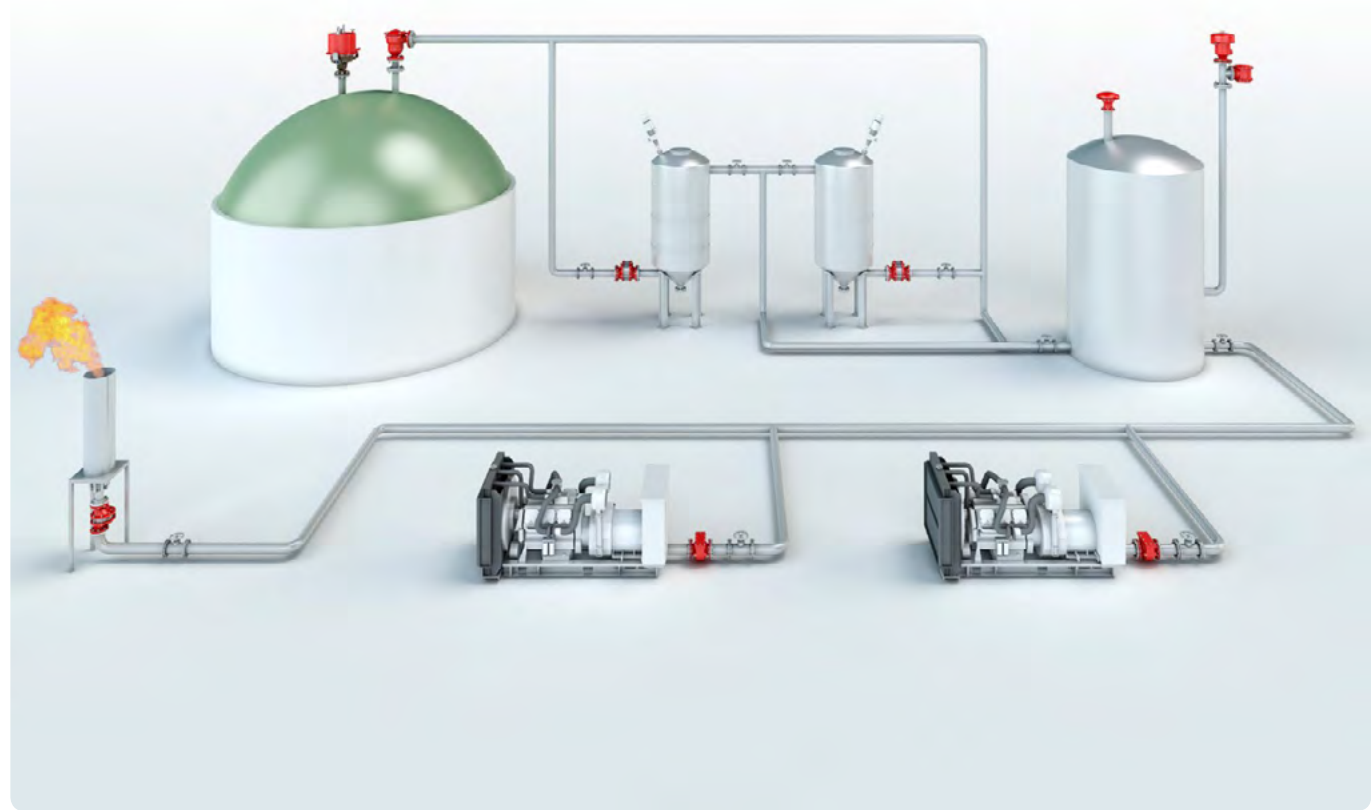




استاندارد، پایش هوشمند، ایزولاسیون، اطفاء، بهره‌برداری، نگهداری و واکنش اضطراری را برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر بررسی می‌کند. پیام اصلی آن است که ایمنی حریق باید از مرحله مکان‌یابی و طراحی مفهومی تا بهره‌برداری، آموزش، مانور اضطراری و بازنگری پس از حادثه، به‌صورت یکپارچه و چندلایه مدیریت شود.

گذار انرژی و توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر، نقش مهمی در کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش تاب‌آوری شبکه برق دارد. با این حال، ورود فناوری‌هایی مانند سامانه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، ذخیره‌سازهای انرژی، هیدروژن سبز، بیوگاز و سامانه‌های هیبریدی، ترکیب تازه‌ای از خطرات حریق و انفجار را وارد صنعت انرژی کرده است.

در سامانه‌های فتوولتائیک، مدارهای DC حتی پس از قطع بخش AC ممکن است همچنان برق‌دار باقی بمانند. در نیروگاه‌های بادی، بخش عمده تجهیزات پرخطر در ارتفاع و داخل ناسل قرار دارد. در ذخیره‌سازهای باتری، انرژی شیمیایی ذخیره‌شده می‌تواند

توسعه سریع نیروگاه‌های تجدیدپذیر، از جمله سامانه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، ذخیره‌سازهای باتری، سامانه‌های هیدروژنی، تأسیسات بیوگاز و نیروگاه‌های هیبریدی، الگوهای جدیدی از خطرات حریق و انفجار ایجاد کرده است. این خطرات به دلیل ماهیت الکتریکی، شیمیایی، مکانیکی و فرایندی تجهیزات، با رویکردهای سنتی ایمنی حریق به‌طور کامل کنترل نمی‌شوند. در سامانه‌های خورشیدی، قوس الکتریکی DC، نقاط داغ، خرابی اینورتر و ترانسفورماتور از سناریوهای شاخص هستند. در توربین‌های بادی، تمرکز تجهیزات الکتریکی و مکانیکی در ناسل، وجود روغن‌های روانکار، صاعقه و محدودیت دسترسی، کنترل حادثه را دشوار می‌کند. در ذخیره‌سازهای باتری، فرار حرارتی، آزادسازی گازهای قابل اشتعال، گسترش سلول به سلول و شعله‌وری مجدد، چالش اصلی است. در سامانه‌های هیدروژنی و بیوگاز، نشت گاز، تشکیل اتمسفر قابل انفجار، سمیت، خوردگی و Backfire اهمیت دارد.

این مقاله با رویکردی سناریومحور، اصول طراحی ایمن، الزامات

SMART FIRE ENGINEERING INTELLIGENT PROTECTION. CONTINUOUS ASSURANCE.



مهندسی حریق در نیروگاه‌های تجدیدپذیر

نیروگاه‌های تجدیدپذیر، با وجود مزایای زیست‌محیطی، با سناریوهای پیچیده حریق (از فرار حرارتی باتری‌ها تا قوس الکتریکی در سیستم‌های فتوولتائیک) روبرو هستند که مدیریت آن‌ها نیازمند دانش فراتر از روش‌های سنتی است. این نوشتار با بررسی دقیق این تهدیدات، از مرحله طراحی مفهومی تا واکنش اضطراری، راهکارهای مهندسی‌شده و پایش هوشمند را برای تضمین ایمنی و تاب‌آوری این زیرساخت‌های حیاتی ارائه می‌دهد.



فرهاد اردشیری مبارکه
مشاور حوزه انرژی
fa1726505@gmail.com

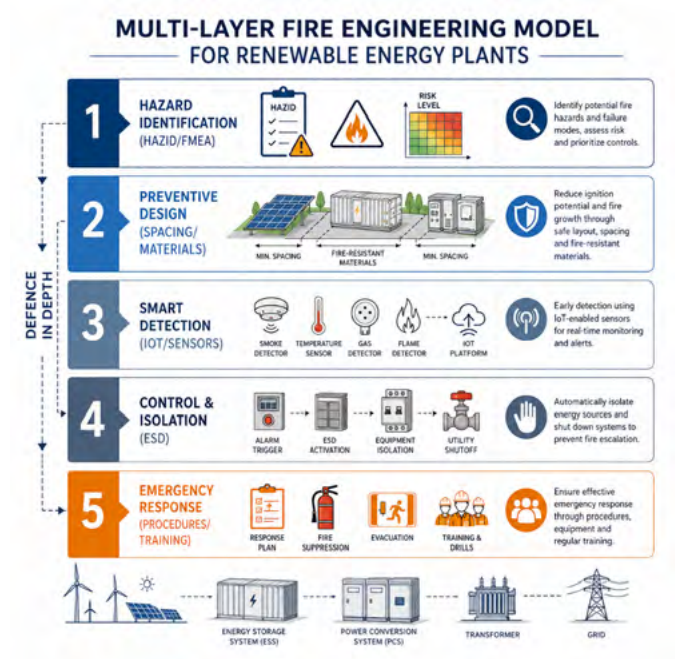


اصول طراحی ایمن و کنترل‌های پیشگیرانه

راهبرد مؤثر در مهندسی حریق، «دفاع در عمق» است؛ یعنی ریسک نباید به یک تجهیز یا یک روش اطفاء وابسته باشد. طراحی ایمن باید هم احتمال وقوع حادثه را کاهش دهد و هم در صورت وقوع، پیامد آن را محدود کند. در مرحله مکان‌یابی و جانمایی، فاصله مناسب میان تجهیزات پرخطر مانند ترانسفورماتورها، اینورترها، کانتینرهای باتری، مخازن هیدروژن، واحدهای بیوگاز و ساختمان کنترل باید لحاظ شود. مسیر دسترسی خودروهای آتش‌نشانی، منابع آب، جهت باد غالب، ریسک صاعقه، سیلاب، پوشش گیاهی و مجاورت با مناطق حساس نیز باید بررسی شود. در بخش حفاظت الکتریکی، استفاده از کابل و کانکتور استاندارد، حفاظت اضافه‌جریان، اتصال زمین، تشخیص قوس DC، جداسازی مناسب مدارها، مدیریت کابل، برچسب‌گذاری نقاط قطع و کنترل خطر Arc Flash اهمیت دارد. در سامانه‌های PV، کیفیت نصب و کاهش خطاهای اتصال نقش ویژه‌ای در کاهش قوس DC دارد. در BESS، طراحی حرارتی، تهویه، فاصله‌گذاری واحدها، انتخاب سامانه باتری معتبر، پایش وضعیت سلول‌ها، Interlock‌های ایمنی، تخلیه فشار و محدودسازی Propagation اهمیت اساسی دارد.

در سامانه‌های هیدروژنی و بیوگاز، باید طراحی ضدنشست، تهویه مؤثر، آشکارسازی گاز، طبقه‌بندی مناطق خطرناک، تجهیزات ضدجرقه، bonding/Grounding، Relief و کنترل خوردگی در طراحی لحاظ شود.

مخزن هیدروژن گسترش یابد. بنابراین تحلیل سناریوهای آبخاری در این سایت‌ها ضروری است.



شکل ۱. سناریوهای نماینده حریق و لایه‌های کنترلی در نیروگاه‌های تجدیدپذیر



مدیریت حادثه را دشوارتر می‌کند.

در سامانه‌های ذخیره‌ساز باتری، مهم‌ترین سناریو، فرار حرارتی در سلول‌های لیتیوم‌یونی است. این فرایند می‌تواند در اثر اضافه‌شارژ، اتصال کوتاه داخلی، آسیب مکانیکی، خرابی سامانه مدیریت باتری یا نقص خنک‌کاری آغاز شود. پس از آن، آزادسازی گازهای قابل اشتعال، افزایش فشار، انفجار، گسترش حریق به ماژول‌های مجاور و شعله‌وری مجدد ممکن است رخ دهد.

در سامانه‌های هیدروژنی، نشست از اتصالات، شیرها، کمپرسورها یا مخازن فشار می‌تواند منجر به Jet Fire، Flash Fire یا انفجار در فضای محصور شود. هیدروژن دامنه اشتعال وسیع، انرژی اشتعال بسیار پایین و شعله کم‌دید دارد؛ بنابراین کشف سریع نشست و ایزولاسیون منبع، حیاتی است.

در تأسیسات بیوگاز، متان و سولفید هیدروژن، دو عامل اصلی ریسک هستند. تجمع متان در فضاهای بسته می‌تواند اتمسفر انفجاری ایجاد کند و H_2S علاوه بر سمیت، موجب خوردگی تجهیزات و افزایش احتمال نشستی می‌شود. Backfire در مشعل‌ها یا موتورهای گازسوز نیز یکی از سناریوهای مهم است.

در نیروگاه‌های هیبریدی، خطر اصلی فقط مجموع ریسک‌های هر فناوری نیست، بلکه برهم‌کنش میان زیرسامانه‌ها است.

برای مثال، حریق در تابلو برق می‌تواند تهویه BESS را مختل کند، یا حریق پوشش گیاهی می‌تواند به کانتینر باتری، ترانسفورماتور یا

در شرایط خرابی به فرار حرارتی و حریق شدید منجر شود. در سامانه‌های هیدروژنی و بیوگاز نیز نشست گاز و تشکیل اتمسفر قابل اشتعال یا انفجار، چالش اصلی است.

از این‌رو، مدیریت ایمنی حریق در نیروگاه‌های تجدیدپذیر باید بر پایه شناخت سناریوهای واقعی، طراحی پیشگیرانه، پایش زودهنگام، ایزولاسیون سریع، اطفای متناسب با فناوری و واکنش اضطراری سناریومحور انجام شود.

سناریوهای شاخص حریق در نیروگاه‌های تجدیدپذیر

در نیروگاه‌های تجدیدپذیر، سناریوی حریق به نوع فناوری وابسته است و نمی‌توان یک نسخه واحد برای همه سامانه‌ها ارائه کرد. در سامانه‌های فتوولتائیک، قوس الکتریکی DC، اتصال نامناسب کانکتورها، آسیب کابل‌ها، نفوذ رطوبت، نقاط داغ ناشی از سایه یا آلودگی، و خرابی اینورترها و ترانسفورماتورها از مهم‌ترین عوامل شروع حریق هستند. ویژگی مهم این سامانه‌ها، تداوم خطر برقداری DC در روز و پیچیدگی ایمن‌سازی کامل هنگام عملیات اضطراری است.

در نیروگاه‌های بادی، حریق معمولاً در ناسل و به‌دلیل خرابی تجهیزات الکتریکی، افزایش دمای یاتاقان یا گیربکس، نشست روغن، خطای سیستم ترمز، یا صاعقه آغاز می‌شود. محدودیت دسترسی به ارتفاع، وزش باد و احتمال سقوط قطعات مشتعل،



سلول‌ها باید دوره‌ای ارزیابی شود. در هیدروژن و بیوگاز، تست نشتی، کالیبراسیون آشکارسازها، کنترل خوردگی، بررسی Relief و رعایت الزامات مناطق خطرناک ضروری است. مدیریت تغییر نیز یک اصل حیاتی است. هر تغییر در باتری، اینورتر، منطق کنترلی، مسیر کابل، تهویه، نوع گاز، نرم‌افزار BMS یا چیدمان تجهیزات باید از نظر اثر بر ریسک حریق و انفجار ارزیابی شود.

استانداردها و الزامات مرجع

استانداردها حداقل چارچوب قابل قبول برای طراحی، نصب، بهره‌برداری و نگهداری ایمن را فراهم می‌کنند، اما جایگزین تحلیل ریسک اختصاصی سایت نیستند. برای تجهیزات الکتریکی و ایمنی کار، NFPA 70 و NFPA 70E اهمیت دارند. برای سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی UL 9540A ، UL 9540 ، NFPA 855 و IEC 62933 از مراجع اصلی هستند و در سامانه‌های PV استانداردهای IEC 61730 ، IEC 62548 ، IEC 62446-1 و همچنین UL 1699B و UL 3741 کاربرد دارند. برای هیدروژن نیز NFPA 2 و الزامات ATEX/IECEx و برای مدیریت ریسک و سیستم‌های مدیریتی، ISO 45001 ، ISO 31000 و ISO 14001 قابل استفاده‌اند. انطباق با این اسناد باید با الزامات قانونی محلی، نظر مرجع آتش‌نشانی، شرایط اقلیمی و نتایج ارزیابی ریسک تکمیل شود.

در BESS، خاموش شدن شعله الزاماً به معنای پایان خطر نیست؛ زیرا سلول‌ها ممکن است همچنان داغ یا ناپایدار باشند. راهبرد اصلی شامل خنک‌سازی، جلوگیری از گسترش، پایش پساحریق، کنترل گازهای آزادشده، تخلیه فشار و مدیریت رواناب آلوده است. در سامانه‌های هیدروژنی، اولویت با قطع نشت، ایزولاسیون، تخلیه فشار و کنترل محدوده است؛ خاموش کردن شعله بدون قطع منبع نشت می‌تواند خطر انفجار را افزایش دهد. در بیوگاز نیز قطع سوخت، تهویه، کنترل Backfire، پایش H₂S و رعایت رویه ورود به فضای بسته ضروری است.

بهره‌برداری، نگهداری و مدیریت خطای انسانی

بخش قابل‌توجهی از حوادث در مرحله بهره‌برداری و نگهداری رخ می‌دهد؛ جایی که خطاهای نصب، تعویق تعمیرات، قطعات غیراستاندارد، Bypass کردن Interlockها، ضعف آموزش، نبود مجوز کار گرم یا بی‌توجهی به هشدارهای اولیه می‌تواند به حادثه منجر شود. برنامه PM و CBM باید برای هر فناوری اختصاصی باشد. در PV، ترموگرافی، تست عایقی، بازبینی کانکتورها و مدیریت پوشش گیاهی ضروری است. در توربین بادی، پایش روغن، باتاقان، ترمز، صاعقه‌گیر و سامانه اطفای داخلی اهمیت دارد. در BESS، سلامت BMS، تهویه، آشکارساز گاز، سامانه اطفاء و وضعیت

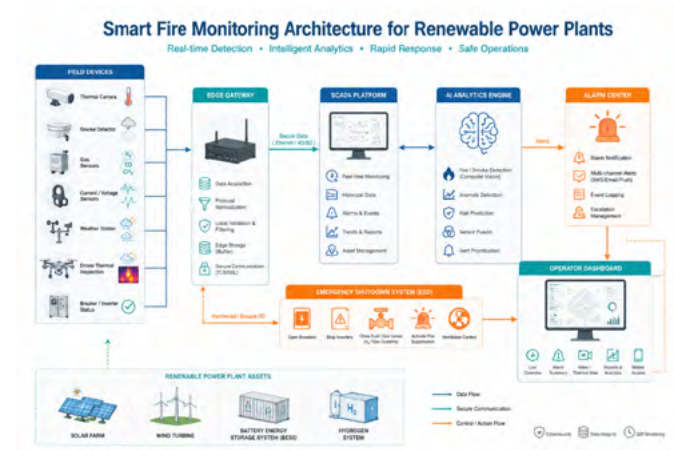


پایش هوشمند، آشکارسازی و هشدار زودهنگام

یکی از تفاوت‌های مهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر با تأسیسات سنتی، قابلیت بالای آن‌ها برای داده‌برداری و پایش پیوسته است. معماری پایش هوشمند می‌تواند از ترکیب داده‌های الکتریکی، حرارتی، مکانیکی، گازی و محیطی برای شناسایی زودهنگام شرایط غیرعادی استفاده کند.

در سامانه‌های PV، پایش جریان و ولتاژ رشته‌ها، تشخیص قوس، ترموگرافی دوره‌ای، تحلیل کاهش عملکرد و آشکارسازی نقاط داغ می‌تواند از گسترش خرابی جلوگیری کند. در توربین‌های بادی، مانیتورینگ دما، ارتعاش، کیفیت روغن، وضعیت سیستم صاعقه‌گیر و آلارم‌های ناسل اهمیت دارد. در BESS، داده‌های BMS شامل دما، ولتاژ، جریان، عدم تعادل سلولی، وضعیت خنک‌کاری و آلارم‌های گازی باید با منطق Shutdown و تهویه اضطراری یکپارچه شود. در سامانه‌های هیدروژنی و بیوگاز، آشکارسازهای گاز باید در محل مناسب نصب، کالیبره و به سیستم تهویه، قطع اضطراری و هشدار متصل شوند.

اتصال این داده‌ها به SCADA، تعریف سطح هشدار و اقدام، استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، ترموگرافی پهپادی و دوقلوی دیجیتال می‌تواند امکان نگهداری پیش‌بینانه و کاهش ریسک حادثه را فراهم کند.



شکل ۲. معماری پایش هوشمند حریق در نیروگاه‌های تجدیدپذیر

اطفاء، ایزولاسیون و راهبرد عملیاتی

در نیروگاه‌های تجدیدپذیر، اطفای حریق باید متناسب با فناوری انجام شود. در PV، باید فرض شود بخش‌هایی از مدار DC همچنان برقرار هستند؛ بنابراین عملیات باید با شناخت نقاط قطع، فاصله ایمن و رویه‌های ویژه انجام شود. در توربین‌های بادی، با توجه به محدودیت دسترسی به ناسل، اطفای داخلی، ایزوله‌سازی و کنترل محیط پیرامونی اهمیت بیشتری از مداخله مستقیم دارد.



ERP: برنامه واکنش اضطراری؛ Emergency Response Plan
H₂S: سولفید هیدروژن؛ Hydrogen Sulfide
NFPA: انجمن ملی حفاظت در برابر حریق آمریکا
IEC: کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک
UL: آزمایشگاه‌های ایمنی آندرایترز؛ Underwriters Laboratories
ATEX: الزامات اروپایی تجهیزات در اتمسفرهای انفجاری؛
IECEX: نظام جهانی تأیید تجهیزات مورد استفاده در محیط‌های انفجاری
ISO: سازمان بین‌المللی استانداردسازی
LPS: سامانه حفاظت در برابر صاعقه؛ Lightning Protection System
MOC: مدیریت تغییر؛ Management of Change

منابع منتخب

- 1- NFPA 70, National Electrical Code.
- 2- NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace.
- 3- NFPA 855, Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems.
- 4- NFPA 2, Hydrogen Technologies Code.
- 5- IEC 62446-1, Photovoltaic systems – Testing, documentation and maintenance.
- 6- IEC 62548, Photovoltaic arrays – Design requirements.
- 7- IEC 61730, Photovoltaic module safety qualification.
- 8- IEC 62933, Electrical energy storage systems.
- 9- UL 9540, Energy Storage Systems and Equipment.
- 10- UL 9540A, Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation.
- 11- UL 1699B, Photovoltaic DC Arc-Fault Circuit Protection.
- 12- UL 3741, Photovoltaic Hazard Control.
- 13- ISO 31000, Risk Management Guidelines.
- 14- ISO 45001, Occupational Health and Safety Management Systems.
- 15- ISO 14001, Environmental Management Systems.



واکنش اضطراری و یادگیری پس از حادثه

BESS، فرار حرارتی و انتشار گازهای قابل اشتعال می‌تواند به گسترش سریع حریق، انفجار و شعله‌وری مجدد منجر شود. در هیدروژن، نشت سریع، دامنه اشتعال وسیع و انرژی اشتعال پایین ایجاب می‌کند که آشکارسازی و ایزولاسیون در اولویت باشد. در بیوگاز، خطر متان، H₂S، خوردگی، Backfire و فضای بسته باید همزمان مدیریت شود. در نیروگاه‌های هیبریدی نیز سناریوهای آبشاری و وابستگی متقابل زیرسامانه‌ها، سطح پیچیدگی ریسک را افزایش می‌دهد.

بر این اساس، ایمنی حریق در نیروگاه‌های تجدیدپذیر نباید به نصب چند تجهیز اطفای یا تهیه یک دستورالعمل عمومی اضطراری محدود شود. رویکرد مؤثر باید از مرحله مکان‌یابی، طراحی مفهومی، انتخاب فناوری، جانمایی تجهیزات، طراحی الکتریکی و فرایندی، تهویه، فاصله‌گذاری، انتخاب سامانه‌های پایش و تعریف منطق ایزولاسیون آغاز شود و در دوره بهره‌برداری با نگهداری پیشگیرانه، پایش هوشمند، مدیریت تغییر، آموزش، مانور اضطراری و بازنگری پس از حادثه ادامه یابد.

معماری پایش هوشمند، به‌ویژه در سایت‌های بزرگ و هیبریدی، می‌تواند حلقه اتصال میان داده، تصمیم و اقدام باشد. ترکیب داده‌های SCADA، BMS، حسگرهای حرارتی، آشکارسازهای گاز، ترموگرافی، پایش ارتعاش، تحلیل جریان و ولتاژ و الگوریتم‌های پیش‌بینی‌کننده، امکان شناسایی زود هنگام خرابی و جلوگیری از

برنامه واکنش اضطراری باید سناریومحور و متناسب با فناوری باشد. نقشه سایت، محل تجهیزات پرخطر، مسیرهای دسترسی، منابع آب، نقاط قطع اضطراری، محل شیرهای ایزولاسیون، شعاع‌های ایمن و اطلاعات تماس باید به‌روز و در اختیار تیم بهره‌بردار و آتش‌نشانی محلی باشد. مانورهای دوره‌ای باید سناریوهایی مانند حریق آرایه PV، حریق ناسل، Thermal Runaway در کانتینر باتری، نشت هیدروژن، تجمع بیوگاز و حریق آبشاری در سایت هیبریدی را پوشش دهد. پس از هر حادثه یا شبه‌حادثه، تحلیل ریشه‌ای، بازنگری طراحی، اصلاح رویه‌ها، آموزش مجدد، به‌روزرسانی نرم‌افزارهای کنترلی و ارزیابی عملکرد سامانه‌های آشکارسازی و اطفای ضروری است.

نتیجه‌گیری

نیروگاه‌های تجدیدپذیر اگرچه از منظر پایداری انرژی و کاهش انتشار اهمیت بالایی دارند، اما از دیدگاه مهندسی حریق دارای مجموعه‌ای متنوع و فناوری‌محور از مخاطرات هستند. در سامانه‌های PV، قوس DC، نقاط داغ و برقدار ماندن مدارها چالش اصلی است.

در نیروگاه‌های بادی، تمرکز تجهیزات در ارتفاع، صاعقه و وجود روغن‌های قابل اشتعال مدیریت حادثه را پیچیده می‌کند. در