۴- رویداد چهارم؛ نشت و آتش‌سوزی در توربین گازی واحد استحصال اتان

در ساعت ۱۱:۵۵ روز رویداد، در حالی که چهار توربین گازی واحد استحصال اتان با ظرفیت کامل در سرویس بودند، نشت شدید گاز سبک برگشتی، عمدتاً متان، از محل فلنج خروجی صافی مسیر مکش یکی از توربین‌های گازی آغاز شد. فشار عملیاتی گاز در این مسیر حدود ۳۳ barg و دمای آن حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد بود.

گاز تحت فشار پس از خروج از اتصال فلنجی، در محیط آزاد منتشر شد و توده‌ای از گاز قابل‌اشتعال در اطراف محل نشت تشکیل داد. با گسترش ابر گاز در محدوده تجهیزات مجاور و رسیدن آن به یک منبع اشتعال در توربین گازی مجاور، انفجار ابر بخار در فضای باز[1] رخ داد و شعله به‌صورت حریق ناگهانی در ابر گاز گسترش یافت. در ادامه، به دلیل تداوم رهایش گاز تحت فشار از محل نشت، حریق به‌صورت آتش فورانی ادامه پیدا کرد.

پس از وقوع رویداد، واحد استحصال اتان به‌صورت اضطراری از سرویس خارج شد. در جریان عملیات کنترل حریق، شیر ایزوله موتوری[2] ورودی توربین گازی شماره ۲ که در معرض حریق قرار گرفته بود، به دلیل آسیب‌دیدن کابل‌ها از سرویس خارج شد و امکان بسته‌شدن خودکار آن فراهم نبود. در نتیجه، تیم اطفای حریق با استفاده از پاشش آب و با رعایت شرایط ایمن، شیر را به‌صورت دستی بست تا مسیر تغذیه گاز به حریق قطع شود. عملیات کنترل و اطفای حریق ادامه یافت و پس از حدود دو ساعت خاتمه پیدا کرد.

گردآوری اطلاعات و تدوین رویداد چهارم

محمد صالحی‌پور | زهرا نوروزی

۴-۱- سناریوی کامل رویداد

در زمان وقوع رویداد، چهار توربین گازی واحد استحصال اتان با ظرفیت کامل در سرویس بودند. در ساعت ۱۱:۵۵، نشت شدید گاز سبک برگشتی، که عمدتاً از متان تشکیل شده بود، از محل اتصال فلنجی خروجی صافی واقع در مسیر مکش یکی از توربین‌های گازی آغاز شد. فشار عملیاتی این جریان حدود ۳۳ barg و دمای آن حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده بود.

با ایجاد نشتی در اتصال فلنجی، گاز تحت فشار از مرز فرایند خارج و با سرعت وارد محیط آزاد شد. تداوم رهایش سبب شد حجم بیشتری از گاز در اطراف محل نشت با هوای محیط مخلوط شود و توده‌ای از گاز قابل‌اشتعال در محدوده تجهیزات شکل گیرد. با ادامه انتشار، ابر گاز از محل اولیه نشت فراتر رفت و در محدوده تجهیزات مجاور گسترش پیدا کرد.

[1] Unconfined Vapor Cloud Explosion – UVCE
[2] Motor Operated Valve – MOV

ابر گاز در ادامه به سمت یکی از توربین‌های گازی مجاور حرکت کرد و به یک منبع اشتعال رسید. اشتعال مخلوط گاز و هوا موجب وقوع انفجار ابر بخار در فضای باز شد و شعله با سرعت در بخش قابل‌اشتعال ابر گاز گسترش یافت؛ به‌گونه‌ای که حریق ناگهانی در محدوده انتشار گاز شکل گرفت.

اشتعال ابر گاز، به‌تنهایی موجب پایان رویداد نشد؛ زیرا جریان گاز از محل اتصال آسیب‌دیده همچنان ادامه داشت. تداوم خروج گاز تحت فشار و اشتعال آن در محل رهایش باعث شد حریق به‌صورت آتش فورانی پایدار شود. در چنین شرایطی، تا زمانی که مسیر تأمین گاز ایزوله نشده و موجودی قابل‌رهایش کاهش نیابد، منبع سوخت حریق همچنان برقرار خواهد بود.

پس از وقوع رویداد، واحد استحصال اتان به‌صورت اضطراری از سرویس خارج شد و کارکنان بهره‌برداری و آتش‌نشانی مجتمع برای کنترل شرایط وارد عمل شدند. یکی از اقدامات ضروری، قطع مسیر تغذیه گاز به ناحیه درگیر حریق بود. با این حال، شیر ایزوله موتوری ورودی توربین گازی شماره ۲ که در معرض حریق قرار داشت، به دلیل آسیب‌دیدن کابل‌های مرتبط با آن از سرویس خارج شده بود و امکان بسته‌شدن خودکار شیر فراهم نشد.

در نتیجه، تیم اطفای حریق ضمن استفاده از پاشش آب و با رعایت شرایط ایمن، به محل شیر دسترسی پیدا کرد و آن را به‌صورت دستی بست. با ایزوله‌شدن مسیر، تغذیه گاز به حریق قطع شد و امکان کنترل مؤثرتر شرایط فراهم گردید. عملیات اطفا و ایمن‌سازی محل ادامه یافت و در نهایت پس از حدود دو ساعت خاتمه پیدا کرد.

در این رویداد، گاز سبک پرفشار و قابل‌اشتعال موجود در مسیر فرایندی، مخاطره اصلی بود؛ اما این مخاطره زمانی به یک رویداد با پیامدهای گسترده تبدیل شد که چند وضعیت به‌صورت متوالی شکل گرفتند: از دست رفتن یکپارچگی اتصال فلنجی و رهایش گاز، تشکیل و گسترش ابر قابل‌اشتعال، رسیدن ابر گاز به منبع اشتعال و در ادامه، استمرار رهایش گاز از محل نشتی. از سوی دیگر، آسیب‌دیدن کابل‌های شیر ایزوله موتوری در اثر حریق، فرایند قطع خودکار جریان گاز را با اختلال مواجه کرد و برای ایزوله‌سازی مسیر، مداخله دستی ضروری شد.

شکل (۴-۱) سناریوی کامل رویداد و توالی مراحل وقوع آن را از آغاز نشت در اتصال فلنجی تا ایزوله‌سازی جریان گاز و کنترل حریق نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱) سناریوی کامل و توالی مراحل وقوع رویداد چهارم

۴-۲- تجهیزات و سیستم‌های مرتبط

در این رویداد، نشت گاز پرفشار از یک اتصال فلنجی موجب رهایش گاز قابل‌اشتعال، تشکیل و گسترش ابر گاز و در ادامه وقوع انفجار ابر بخار در فضای باز، حریق ناگهانی و آتش فورانی شد. پس از آغاز حریق نیز تداوم جریان گاز از بخش آسیب‌دیده، کنترل رویداد را به توانایی ایزوله‌سازی سریع مسیر وابسته کرد.

ازاین‌رو، دو موضوع در بررسی تجهیزات مرتبط با این رویداد اهمیت ویژه‌ای دارند: نخست، شیر ایزوله موتوری به‌عنوان یکی از تجهیزات مؤثر در قطع جریان و محدودکردن مدت رهایش؛ و دوم، اتصال فلنجی و گسکت به‌عنوان محل آغاز نشت و یکی از نقاطی که یکپارچگی مکانیکی آن می‌تواند در پیشگیری از وقوع رویداد نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد.

❖ شیر ایزوله موتوری

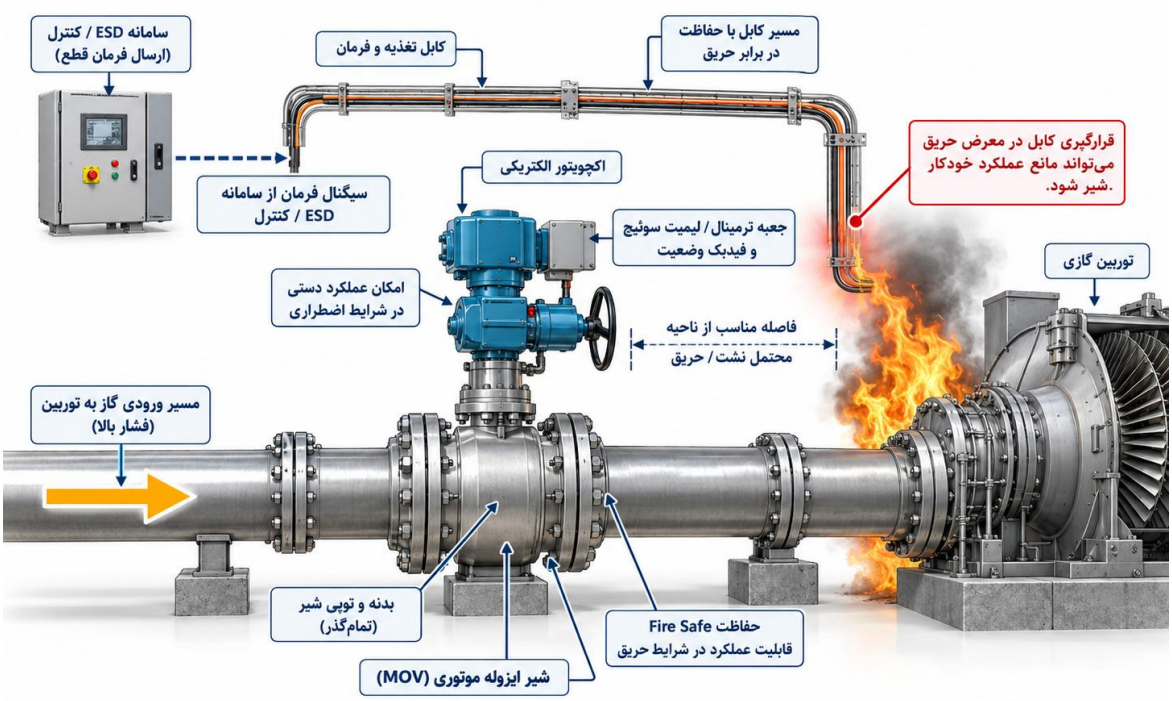
شیرهای ایزوله موتوری، شیرهای صنعتی مجهز به عملگر الکتریکی هستند که در مسیرهای فرایندی برای قطع جریان و ایزوله‌کردن بخش مشخصی از سیستم به کار می‌روند. در شرایط اضطراری، این شیرها می‌توانند تحت فرمان سیستم کنترل یا منطق قطع اضطراری، بسته شده و با قطع جریان سیال، موجودی قابل‌رهایش و مدت تغذیه یک حریق را کاهش دهند.

در این رویداد، شیر ایزوله موتوری ورودی توربین گازی شماره ۲ در محدوده درگیر حریق قرار گرفت. با گسترش حریق و آسیب‌دیدن کابل‌های مرتبط با شیر، امکان بسته‌شدن خودکار آن از بین رفت و در نتیجه، ایزوله‌سازی مسیر گاز به مداخله مستقیم تیم اطفای حریق وابسته شد. کارکنان آتش‌نشانی با استفاده از پاشش آب و با رعایت شرایط ایمن به شیر دسترسی پیدا کردند و آن را به‌صورت دستی بستند.

عملکرد این تجهیز نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان یک شیر ایزوله تنها به خود بدنه و عملگر آن محدود نمی‌شود. محل نصب شیر، فاصله آن از ناحیه بالقوه حریق، مسیر و حفاظت کابل‌های فرمان و تغذیه، قابلیت فعال‌سازی در شرایط اضطراری و امکان دسترسی ایمن برای عملکرد دستی نیز بخشی از قابلیت عملکرد این لایه حفاظتی محسوب می‌شوند.

اگر شیر و اجزای موردنیاز برای فعال‌سازی آن در برابر شرایط حریق قابلیت اطمینان کافی داشتند، امکان بسته‌شدن خودکار شیر در مراحل اولیه رویداد فراهم می‌شد و با قطع سریع‌تر جریان گاز، مدت تغذیه آتش فورانی و شدت پیامدهای ناشی از آن کاهش می‌یافت.

شکل (۴-۲) شماتیک عملکرد شیر ایزوله موتوری و اجزای مؤثر بر قابلیت فعال‌سازی آن در شرایط اضطراری را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲) شماتیک شیر ایزوله موتوری و اجزای مؤثر بر عملکرد آن در شرایط اضطراری

❖ اتصال فلنجی و گسکت

محل آغاز رهایش در این رویداد، یک اتصال فلنجی در مسیر گاز پرفشار بود که در آن از گسکت مارپیچی[1] استفاده شده بود. اتصالات فلنجی از اجزای متداول سیستم‌های لوله‌کشی هستند که امکان اتصال تجهیزات و بخش‌های مختلف خط لوله و همچنین جداسازی آن‌ها برای بازرسی و تعمیرات را فراهم می‌کنند. حفظ آب‌بندی این اتصالات به طراحی فلنج، نوع و جنس گسکت، شرایط فشار و دما و سازگاری اجزای اتصال وابسته است.

گسکت‌های Spiral Wound از لایه‌های مارپیچی فلزی و مواد پرکننده تشکیل می‌شوند و در بسیاری از سرویس‌های صنعتی دارای قابلیت آب‌بندی مناسب هستند. بااین‌حال، در نقاطی که سیال قابل‌اشتعال در فشار بالا جریان دارد و رهایش آن می‌تواند پیامدهای شدیدی ایجاد کند، انتخاب نوع اتصال و گسکت اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

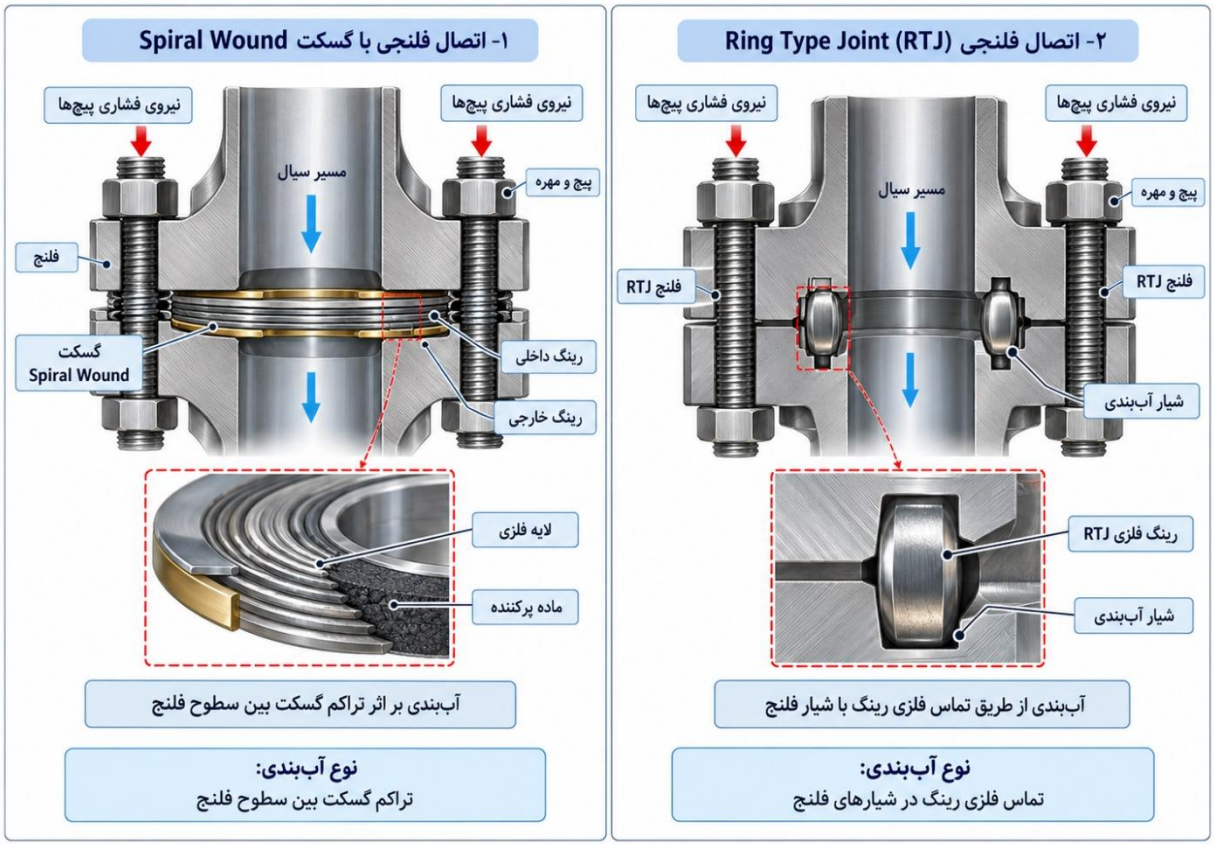
یکی از گزینه‌هایی که در چنین سرویس‌هایی می‌تواند از نظر فنی مورد بررسی قرار گیرد، اتصال رینگی فلزی[2] است. در اتصال RTJ، آب‌بندی به‌وسیله یک رینگ فلزی انجام می‌شود که بین شیارهای مخصوص تعبیه‌شده در

[1] Spiral Wound Gasket
[2] Ring Type Joint – RTJ

سطوح فلنج قرار می‌گیرد. این ساختار برای کاربرد در شرایط فشار و دمای بالا طراحی شده و آب‌بندی اتصال از طریق تماس فلز با فلز در محل رینگ حاصل می‌شود.

با توجه به فشار عملیاتی حدود ۳۳ barg، ماهیت قابل‌اشتعال سیال، پیامد بالقوه رهایش گاز و سابقه وقوع رویدادهای مشابه، بررسی فنی امکان استفاده از اتصال RTJ به جای اتصال مجهز به گسکت Spiral Wound می‌توانست به‌عنوان یکی از گزینه‌های پیشگیرانه مورد توجه قرار گیرد. بااین‌حال، انتخاب نهایی نوع اتصال و گسکت باید بر اساس مجموعه‌ای از عوامل شامل شرایط واقعی سرویس، طراحی فلنج، متریال، فشار و دما، الزامات تعمیراتی و سازگاری مکانیکی اجزای اتصال انجام شود.

کل (۴-۳) نمای شماتیک دو نوع آب‌بندی Spiral Wound و Ring Type Joint و تفاوت ساختاری آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۳) مقایسه شماتیک ساختار و سازوکار آب‌بندی گسکت Spiral Wound و اتصال Ring Type Joint

۴-۳- پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی

در این رویداد، گاز سبک برگشتی، عمدتاً متان، با فشار عملیاتی حدود ۳۳ barg و دمای حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد از محل اتصال فلنجی به محیط رها شد. اختلاف زیاد میان فشار داخل خط و فشار محیط، موجب رهایش سریع گاز و تغییر

شرایط ترمودینامیکی آن پس از خروج شد. یکی از پدیده‌های مهمی که در تحلیل چنین رهایش‌هایی باید مورد توجه قرار گیرد، اثر ژول-تامسون[1] و تغییر دمای گاز در اثر افت فشار است.

❖ اثر ژول-تامسون

اثر ژول–تامسون بیانگر تغییر دمای یک گاز واقعی هنگام عبور از ناحیه پرفشار به ناحیه کم‌فشار، در یک فرایند تقریباً آنتالپی‌ثابت است. برخلاف گاز ایده‌آل، در گازهای واقعی نیروهای بین‌مولکولی سبب می‌شوند که کاهش فشار بتواند با افزایش یا کاهش دما همراه باشد.

جهت این تغییر دما به شرایط اولیه گاز و مقدار ضریب ژول–تامسون[2] وابسته است. اگر این ضریب مثبت باشد، کاهش فشار با کاهش دمای گاز همراه خواهد بود و اگر مقدار آن منفی باشد، گاز هنگام افت فشار گرم می‌شود. در شرایط این رویداد، متان در دمای حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشار حدود ۳۳ barg در محدوده‌ای قرار داشت که ضریب ژول–تامسون آن مثبت است. بنابراین، افت شدید فشار هنگام خروج گاز از محل نشتی می‌توانست موجب کاهش دمای گاز در ناحیه رهایش شود.

این موضوع نشان می‌دهد که دمای گاز پس از خروج از محل نشتی لزوماً برابر با دمای عملیاتی جریان در داخل خط نیست. گازی که در داخل سیستم در دمای حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، پس از تجربه افت شدید فشار می‌تواند در ناحیه نزدیک به محل رهایش دمای پایین‌تری داشته باشد.

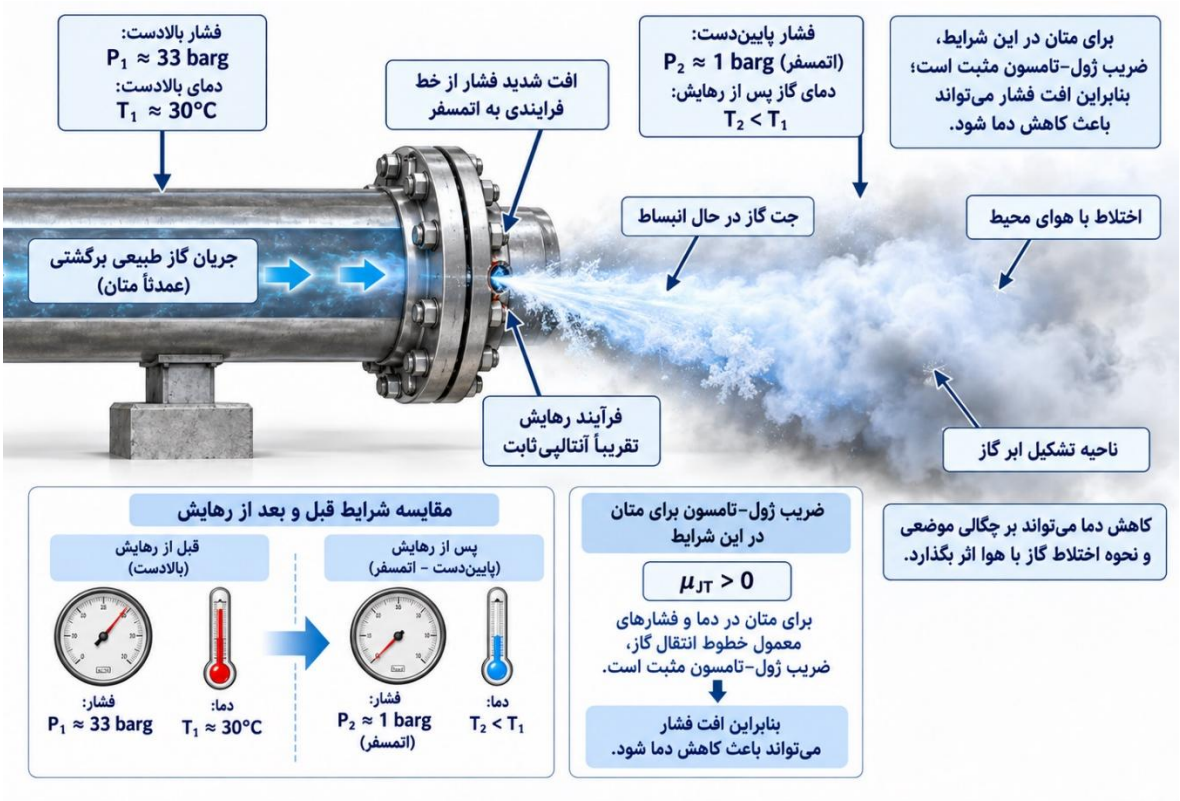
کاهش دما در محل رهایش می‌تواند برخی ویژگی‌های فیزیکی جریان، از جمله چگالی موضعی گاز و شرایط اختلاط اولیه آن با هوای محیط را تحت تأثیر قرار دهد. این تغییرات، همراه با سرعت بالای جت خروجی، بر رفتار اولیه رهایش و نحوه تشکیل و گسترش ابر گاز اثر می‌گذارند.

با این حال، رفتار واقعی گاز پس از خروج تنها تابع اثر ژول–تامسون نیست. در یک رهایش پرفشار، عواملی مانند انبساط سریع گاز، سرعت و تکانه جت، اختلاط با هوای محیط و انتقال حرارت میان گاز و تجهیزات و محیط اطراف نیز بر دمای نهایی و رفتار جریان اثر می‌گذارند. ازاین‌رو، اثر ژول–تامسون باید به‌عنوان یکی از پدیده‌های مؤثر بر شرایط ترمودینامیکی اولیه رهایش در نظر گرفته شود، نه تنها عامل تعیین‌کننده رفتار آن.

در تحلیل پیامد نشتی‌های پرفشار، این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا فشار و دمای ثبت‌شده در خط، تنها شرایط اولیه سیال پیش از رهایش را نشان می‌دهند. برای بررسی دقیق‌تر پراکنش گاز، تشکیل ابر قابل‌اشتعال و پیامدهای بعدی، لازم است شرایط واقعی گاز پس از عبور از محل نشتی و افت فشار نیز مورد توجه قرار گیرد.

[1] Joule–Thomson Effect
[2] Joule–Thomson Coefficient

شکل (۴-۴) می‌تواند به‌صورت شماتیک تغییر فشار و دمای گاز را هنگام عبور از یک محل نشتی پرفشار و نقش اثر ژول - تامسون در کاهش دمای جریان نشان دهد.



شکل (۴-۴) شماتیک تغییر فشار و دمای گاز در رهایش پرفشار بر اثر پدیده ژول–تامسون

۴-۴- تحلیل پاپیونی

در این تحلیل، «نشت گاز از محل اتصال فلنجی» به‌عنوان رویداد مرکزی انتخاب شده است. این رویداد بیانگر از دست رفتن محصورسازی گاز پرفشار در مرز فرایندی و نقطه‌ای است که پس از آن، گاز قابل‌اشتعال وارد محیط شده و امکان شکل‌گیری پیامدهای بعدی فراهم می‌شود.

پیش از رویداد مرکزی، مجموعه‌ای از تهدیدها می‌توانستند یکپارچگی اتصال فلنجی را تضعیف کنند. افت قابلیت آب‌بندی اتصال فلنجی و گسکت، نامناسب‌بودن انتخاب نوع اتصال یا گسکت برای شرایط واقعی سرویس، خطای مونتاژ اتصال و انجام نامناسب تعمیرات از جمله عواملی هستند که می‌توانند به ایجاد مسیر نشتی منجر شوند.

برای کنترل این تهدیدها، انتخاب نوع اتصال و گسکت باید با درنظرگرفتن فشار، دما، ماهیت سیال و حساسیت سرویس انجام شود. در این رویداد، با توجه به فشار بالای جریان و پیامد بالقوه رهایش گاز قابل‌اشتعال، بررسی فنی امکان استفاده از اتصال Ring Type Joint (RTJ) به‌جای گسکت Spiral Wound می‌توانست به‌عنوان یکی از گزینه‌های پیشگیرانه

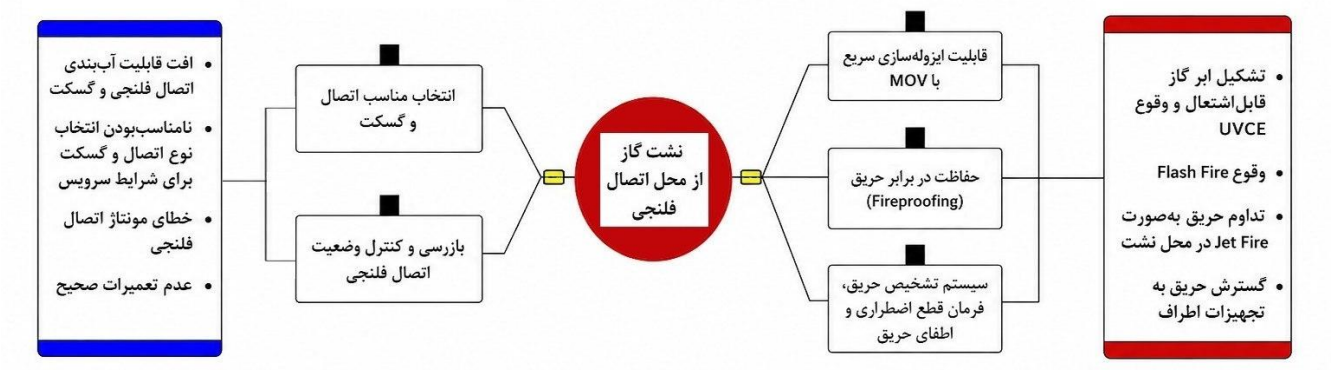
مورد توجه قرار گیرد. همچنین، بازرسی و کنترل وضعیت اتصال فلنجی، گسکت و اجزای مرتبط می‌توانست نشانه‌های افت یکپارچگی یا شرایط مستعد نشت را پیش از تبدیل‌شدن به یک رهایش شدید شناسایی کند.

پس از وقوع رویداد مرکزی، گاز پرفشار وارد محیط شد و با اختلاط با هوا، ابر گاز قابل‌اشتعال تشکیل داد. رسیدن این ابر به منبع اشتعال در محدوده تجهیزات مجاور، شرایط وقوع انفجار ابر بخار در فضای باز و حریق ناگهانی را فراهم کرد. از آنجا که جریان گاز از محل نشتی همچنان ادامه داشت، شعله در محل رهایش به‌صورت آتش فورانی پایدار شد. ادامه حریق نیز می‌توانست تجهیزات و اجزای مجاور را در معرض تابش حرارتی و گسترش آتش قرار دهد.

در سمت پیامدهای تحلیل، ایزوله‌سازی سریع جریان گاز با استفاده از شیرهای موتوری، حفاظت در برابر حریق، سامانه‌های تشخیص حریق و فرمان قطع اضطراری و سامانه‌های Water Spray / Deluge از مهم‌ترین موانع کاهنده پیامد هستند. عملکرد مؤثر این لایه‌ها می‌توانست مدت رهایش، زمان تغذیه آتش فورانی، آسیب حرارتی به تجهیزات و احتمال گسترش حریق را کاهش دهد.

در این رویداد، آسیب‌دیدن کابل‌های شیر ایزوله موتوری ورودی توربین گازی شماره ۲ نشان داد که وجود یک تجهیز ایزوله‌کننده به‌تنهایی برای ایجاد یک مانع قابل‌اعتماد کافی نیست. جانمایی شیر، مسیر کابل‌ها و حفظ قابلیت فعال‌سازی آن در شرایط حریق نیز بخشی از کارکرد حفاظتی این لایه محسوب می‌شوند.

شکل (۴-۵)، شماتیک نمودار Bow-Tie این رویداد را نشان می‌دهد و ارتباط میان تهدیدها، موانع پیشگیرانه، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع کاهنده پیامد را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد.



شکل (۴-۵) نمودار Bow-Tie رویداد چهارم؛ نشت گاز از محل اتصال فلنجی

۴-۵- لایه‌های حفاظت در برابر وقوع و گسترش رویداد

لایه‌های حفاظتی این رویداد دو کارکرد اصلی دارند: نخست، جلوگیری از ایجاد نشت در اتصال فلنجی و دوم، محدودکردن مقدار و مدت رهایش و جلوگیری از گسترش پیامدهای حریق پس از وقوع نشتی. بر این اساس، لایه‌ها در دو گروه پیشگیرانه و کاهنده پیامد بررسی می‌شوند.

۴-۵-۱- لایه‌های حفاظتی پیشگیرانه

❖ انتخاب مناسب اتصال و گسکت

نوع اتصال فلنجی و گسکت باید متناسب با فشار و دمای بهره‌برداری، ماهیت سیال و حساسیت سرویس انتخاب شود. انتخاب نامناسب می‌تواند قابلیت آب‌بندی اتصال را کاهش داده و احتمال ایجاد مسیر نشتی را افزایش دهد. در این رویداد، با توجه به فشار عملیاتی بالای گاز و پیامدهای بالقوه رهایش سیال قابل‌اشتعال، بررسی فنی استفاده از Ring Type Joint (RTJ) به‌جای گسکت Spiral Wound می‌توانست به‌عنوان یکی از اقدامات پیشگیرانه مورد توجه قرار گیرد. بااین‌حال، انتخاب نهایی باید بر اساس طراحی اتصال و شرایط واقعی سرویس انجام شود و استفاده از RTJ به‌تنهایی تضمین‌کننده حذف احتمال نشتی نیست.

❖ بازرسی و کنترل وضعیت اتصال فلنجی

بازرسی اتصال فلنجی باید به‌گونه‌ای انجام شود که وضعیت اجزای اتصال و نشانه‌های احتمالی افت یکپارچگی پیش از تبدیل‌شدن به یک رهایش شدید شناسایی شوند. تناوب و روش بازرسی نیز باید متناسب با شرایط سرویس، اهمیت تجهیز و سطح ریسک آن تعیین شود.

در یک اتصال حاوی گاز پرفشار، تداوم بهره‌برداری در شرایطی که قابلیت آب‌بندی اتصال کاهش یافته است می‌تواند در مدت کوتاهی به رهایش قابل‌توجهی از گاز منجر شود. بنابراین، بازرسی و نگهداری اتصال بخشی از کنترل پیشگیرانه سناریوی نشت محسوب می‌شود.

۴-۵-۲- لایه‌های حفاظتی کاهنده پیامد

❖ قابلیت ایزوله‌سازی سریع با شیرهای موتوری

پس از ایجاد نشتی، یکی از مهم‌ترین اقدامات برای محدودکردن پیامدها، کاهش سریع مقدار و مدت رهایش از طریق ایزوله‌کردن مسیر تغذیه گاز است. شیرهای ایزوله موتوری نصب‌شده در مسیرهای ورودی و خروجی توربین‌های گازی می‌توانند با قطع جریان، موجودی در دسترس برای ادامه رهایش و تغذیه آتش فورانی را کاهش دهند.

در این رویداد، شیر MOV ورودی توربین گازی شماره ۲ در معرض حریق قرار گرفت و آسیب‌دیدن کابل‌های مرتبط با آن موجب از بین رفتن قابلیت بسته‌شدن خودکار شیر شد. در نتیجه، تیم اطفای حریق با استفاده از پاشش آب و با رعایت شرایط ایمن، شیر را به‌صورت دستی بست.

این وضعیت نشان می‌دهد که اثربخشی این لایه تنها به سلامت خود شیر محدود نیست؛ جانمایی شیر، فاصله آن از ناحیه بالقوه نشت و حریق، مسیر کابل‌های فرمان و تغذیه و حفظ قابلیت عملکرد تجهیز در شرایط اضطراری نیز در قابلیت اطمینان آن نقش دارند.

❖ حفاظت در برابر حریق

حفاظت در برابر حریق[4] یک لایه حفاظتی غیرعامل است که با کاهش نرخ انتقال حرارت به تجهیز یا سازه حفاظت‌شده، افزایش دمای آن را به تأخیر می‌اندازد و برای مدت مشخصی امکان حفظ یکپارچگی یا عملکرد آن را فراهم می‌کند.

در این رویداد، حفاظت مناسب تجهیزات، سازه‌ها و اجزای حیاتی در معرض حریق می‌توانست زمان بیشتری برای ایزوله‌سازی جریان، عملکرد تجهیزات ضروری و اجرای اقدامات کنترل حریق فراهم کند. این موضوع به‌ویژه برای اجزایی اهمیت دارد که از دست رفتن عملکرد آن‌ها می‌تواند موجب تداوم تغذیه حریق شود.

- ❖ سامانه تشخیص حریق و فرمان قطع اضطراری

تشخیص سریع وقوع حریق و ارسال فرمان قطع اضطراری می‌تواند زمان لازم برای آغاز ایزوله‌سازی مسیرهای گاز را کاهش دهد. اثربخشی این لایه به تشخیص به‌موقع وضعیت غیرعادی، انتقال صحیح فرمان و قابلیت اجرای فرمان توسط تجهیزات نهایی مانند شیرهای ایزوله وابسته است.

در شرایطی که مسیر فرمان یا اجزای اجرایی در اثر حریق آسیب ببینند، ممکن است تشخیص صحیح رویداد به بسته‌شدن واقعی شیر منجر نشود. بنابراین، سامانه تشخیص، منطق قطع، مسیر انتقال فرمان و تجهیز نهایی باید به‌عنوان اجزای یک کارکرد حفاظتی هماهنگ در نظر گرفته شوند.

- ❖ سامانه‌های Water Spray / Deluge

سامانه‌های پاشش آب و Deluge با خنک‌کردن تجهیزات در معرض حریق و کاهش شار حرارتی دریافتی، می‌توانند از افزایش سریع دمای تجهیزات و تشدید آسیب حرارتی جلوگیری کنند.

در این رویداد، چنین سامانه‌هایی می‌توانستند در حفاظت از تجهیزات و اجزای مجاور، افزایش زمان در دسترس برای ایزوله‌سازی و کاهش احتمال گسترش حریق نقش داشته باشند. بااین‌حال، این سامانه‌ها جایگزین قطع منبع گاز نیستند؛ زیرا تا زمانی که جریان سوخت ادامه داشته باشد، آتش فورانی می‌تواند همچنان پایدار باقی بماند.

۴-۶- ارتباط رویداد با عناصر مدیریت ایمنی فرایند

بررسی سناریوی رویداد، تجهیزات درگیر، پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی و لایه‌های حفاظتی نشان می‌دهد که تحلیل این رویداد نباید تنها به نشت از یک اتصال فلنجی محدود شود. وقوع نشت در مسیر گاز پرفشار، گسترش آن تا تشکیل ابر قابل‌اشتعال و حریق و همچنین از دست رفتن قابلیت عملکرد خودکار یکی از شیرهای ایزوله در شرایط حریق، ضرورت بررسی سازوکارهای مدیریتی و سازمانی مرتبط با شناسایی ریسک، حفظ یکپارچگی تجهیزات، انطباق با الزامات فنی و مدیریت تغییرات را مطرح می‌کند.

در چارچوب مدیریت ایمنی فرایند مبتنی بر ریسک، اثربخشی لایه‌های حفاظتی تنها به وجود فیزیکی آن‌ها وابسته نیست؛ بلکه باید در تمام چرخه عمر، از طراحی و انتخاب تا نصب، بهره‌برداری، بازرسی، نگهداری و اعمال تغییرات، قابلیت اطمینان آن‌ها حفظ شود. ازاین‌رو، شرایط مشاهده‌شده در این رویداد را می‌توان در ارتباط با چهار عنصر مدیریت ایمنی فرایند بررسی کرد.

جدول (۴-۱) مهم‌ترین زمینه‌های مدیریتی و سازمانی مرتبط با رویداد چهارم بر اساس عناصر مدیریت ایمنی فرایند مبتنی بر ریسک

شماره و عنوان المان		توضیحات مربوط به حادثه
۱۰	یکپارچگی دارایی و قابلیت اطمینان	هدف این عنصر، حفظ سلامت و قابلیت عملکرد تجهیزات و اجزای فرایندی در سراسر چرخه عمر آن‌ها است. در این رویداد، محل آغاز نشت یک اتصال فلنجی در مسیر گاز پرفشار بود. وضعیت فلنج، گسکت، پیچ‌ها و سایر اجزای اتصال باید به‌گونه‌ای مدیریت می‌شد که کاهش قابلیت آب‌بندی یا سایر نشانه‌های افت یکپارچگی پیش از ایجاد یک رهایش شدید شناسایی شوند. تعیین روش و تناوب مناسب بازرسی بر اساس شرایط سرویس و سطح ریسک، اجرای صحیح تعمیرات و پیگیری نواقص شناسایی‌شده، از اقداماتی هستند که می‌توانند احتمال شکست چنین اتصالی را کاهش دهند. یکپارچگی دارایی در این رویداد تنها به اتصال فلنجی محدود نیست؛ شیرهای MOV، کابل‌های فرمان و تغذیه و سایر اجزایی که برای ایزوله‌سازی اضطراری موردنیاز هستند نیز باید در زمان نیاز قابلیت عملکرد قابل‌اعتماد داشته باشند.
۷	شناسایی مخاطرات و تحلیل ریسک	یکی از اهداف HIRA، شناسایی سناریوهای بالقوه پیش از وقوع رویداد و تعیین اقدامات کنترلی متناسب با پیامدهای آن‌ها است. در این واحد، سناریوی نشت گاز با فشار حدود ۳۳ barg در مجاورت توربین‌های در سرویس می‌توانست به تشکیل ابر گاز قابل‌اشتعال، وقوع UVCE و Flash Fire و در ادامه تشکیل Jet Fire منجر شود. تحلیل چنین سناریویی باید فراتر از احتمال خرابی موضعی یک فلنج انجام شود و گستره پیامد، منابع اشتعال، امکان گسترش حریق، قابلیت ایزوله‌سازی و آسیب‌پذیری تجهیزات ایمنی در برابر حریق را نیز دربر گیرد. نتایج این تحلیل باید مبنایی برای تعیین نوع اتصال، جانمایی تجهیزات، حفاظت کابل‌ها، الزامات Fireproofing و سایر لایه‌های حفاظتی قرار گیرد.
۲	انطباق با استانداردها	تجهیزات و اجزای دخیل در این سناریو، از اتصال فلنجی و گسکت تا شیرهای ایزوله موتوری، کابل‌ها و حفاظت تجهیزات در برابر حریق، دارای الزامات فنی و طراحی مشخص

شماره و عنوان المان		توضیحات مربوط به حادثه
		هستند. انطباق با استانداردها صرفاً به انتخاب یک تجهیز استاندارد یا وجود مدارک طراحی محدود نمی‌شود؛ بلکه وضعیت واقعی نصب، بهره‌برداری، بازرسی، نگهداری و عملکرد تجهیز نیز باید با الزامات مربوطه سازگار باقی بماند. در این رویداد، بازبینی انطباق نوع اتصال و گسکت با شرایط سرویس، وضعیت MOV و متعلقات آن، مسیر کابل‌ها و حفاظت تجهیزات حیاتی در برابر حریق می‌توانست نقاط آسیب‌پذیر موجود را پیش از وقوع رویداد آشکار کند. بنابراین، انطباق با استانداردها باید در طول چرخه عمر تجهیز و متناسب با تغییر شرایط و الزامات فنی به‌صورت مستمر ارزیابی شود.
۱۳	مدیریت تغییر[1]	پس از وقوع یک رویداد مشابه در گذشته، نصب شیرهای MOV در مسیرهای ورودی و خروجی توربین‌ها به‌عنوان اقدامی برای افزایش قابلیت ایزوله‌سازی انجام شده بود. بااین‌حال، در رویداد حاضر، MOV ورودی توربین گازی شماره ۲ در معرض حریق قرار گرفت و آسیب‌دیدن کابل‌ها موجب از دست رفتن قابلیت بسته‌شدن خودکار آن شد. این وضعیت اهمیت بررسی جامع تغییرات را نشان می‌دهد. هر تغییر باید علاوه بر تحقق هدف اصلی خود، از نظر اثر بر سایر اجزای سیستم و سناریوهای اضطراری نیز ارزیابی شود. در چنین تغییری، جانمایی شیر، مسیر و حفاظت کابل‌ها، مواجهه احتمالی با حریق، امکان دسترسی اضطراری و وابستگی عملکرد شیر به اجزای جانبی باید مورد توجه قرار گیرند. هدف مدیریت تغییر آن است که اقدام اصلاحی برای کاهش یک ریسک، بدون بررسی پیامدهای جانبی، موجب ایجاد آسیب‌پذیری جدید در سیستم نشود.

۴-۷- مراجع و منابع تخصصی ایمنی فرایند

در بررسی این رویداد، از شرح تجهیزات و اتصالات فرایندی تا تحلیل لایه‌های حفاظتی و حفاظت تجهیزات در برابر حریق، از استانداردها و منابع تخصصی مرتبط با شیرهای صنعتی، اتصالات فلنجی، گسکت‌ها و حفاظت در برابر حریق استفاده شده است. مهم‌ترین منابع مرتبط با مباحث مطرح‌شده در جدول (۴-۲) معرفی شده‌اند.

جدول (۴-۲) مهم‌ترین منابع مورد استفاده در تحلیل رویداد چهارم

[1] Management of Change – MOC

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
API RP 553 [1]	Refinery Valves and Accessories for Control and Safety Instrumented Systems	در بررسی شیرهای MOV و قابلیت عملکرد آن‌ها در شرایط اضطراری به این مرجع استناد شد. در این رویداد، قابلیت اطمینان MOV در ایزوله‌سازی سریع مسیر گاز و نقش آن در محدودکردن تغذیه حریق مورد توجه قرار گرفت.
API 6FA [2]	Standard for Fire Test for Valves	در بررسی قابلیت عملکرد شیر در شرایط حریق به این استاندارد استناد شد. در این رویداد، MOV ورودی توربین گازی شماره ۲ در معرض حریق قرار گرفت و قابلیت عملکرد شیر در چنین شرایطی، از موضوعات مهم در ارزیابی لایه ایزوله‌سازی بود.
ASME B16.20 [3]	Metallic Gaskets for Pipe Flanges	در بررسی گسکت‌های Spiral Wound و Ring Type Joint (RTJ) به این استاندارد استناد شد. در این رویداد، انتخاب گسکت متناسب با شرایط سرویس گاز پرفشار و حساسیت اتصال نسبت به نشتی مورد توجه قرار گرفت.
ASME B16.5 [4]	Pipe Flanges and Flanged Fittings	در بررسی اتصال فلنجی محل آغاز نشت به این استاندارد استناد شد. الزامات مرتبط با ابعاد، رده‌های فشار–دما و مشخصات اتصال، مبنای بررسی تناسب اتصال فلنجی با شرایط عملیاتی بود.
API RP 2218 [5]	Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants	در بررسی Fireproofing تجهیزات و اجزای حیاتی به این مرجع استناد شد. در این رویداد، حفاظت مناسب در برابر حریق می‌توانست با به‌تأخیرانداختن افزایش دمای اجزای حفاظت‌شده، زمان بیشتری برای ایزوله‌سازی مسیر گاز و کنترل حریق فراهم کند.

۴-۸- سنجش تحلیل مهندسی رویداد

پس از بررسی و واکاوی سناریوی رویداد، پدیده‌های فیزیکی مؤثر، تجهیزات ایمنی و لایه‌های حفاظتی، اکنون نوبت به سنجش تحلیل مهندسی است. پرسش‌های این بخش برای ارزیابی توانایی شما در پیوند دادن شواهد فنی، شناسایی نقاط شکست در زنجیره رویداد و انتخاب تصمیم‌های مؤثر در کنترل خطر طراحی شده‌اند؛ نه صرفاً یادآوری مفاهیم مطرح‌شده. (پاسخنامه و توضیح مختصر پاسخ‌های صحیح، در انتهای کتابچه ارائه شده است.)

۱- فرض کنید در یک تحلیل پیامد، نشت گاز متان از اتصال فلنجی با فشار حدود ۳۳ barg شبیه‌سازی شده است. مهندس تحلیلگر دمای گاز در خط را مستقیماً به‌عنوان دمای گاز در محل رهایش وارد مدل می‌کند. با توجه به شرایط این رویداد، کدام ارزیابی فنی دقیق‌تر است؟

الف) دمای گاز در محل رهایش الزاماً با دمای خط برابر است؛ زیرا افت فشار فقط بر سرعت گاز اثر می‌گذارد و بر دمای آن اثر قابل‌توجهی ندارد.

ب) چون متان در شرایط رویداد ضریب ژول–تامسون مثبت دارد، افت فشار می‌تواند با کاهش دمای گاز همراه شود؛ بنابراین شرایط ترمودینامیکی رهایش باید جدا از شرایط عملیاتی خط بررسی شود.

ج) افت فشار باعث افزایش دمای متان می‌شود، اما این افزایش تنها در صورتی اهمیت دارد که گاز پیش از رسیدن به منبع اشتعال به حالت مایع تبدیل شود.

د) دمای گاز در محل رهایش فقط تابع فشار است و اثر ضریب ژول–تامسون در یک رهایش سریع گاز قابل صرف‌نظر کردن است.

۲- فرض کنید اتصال فلنجی پس از تعمیر، از نظر ظاهری سالم بوده و گسکت جدید نیز مطابق مشخصات طراحی نصب شده است؛ اما در بازرسی‌های بعدی، برنامه مشخصی برای پایش وضعیت اتصال و پیگیری نشانه‌های افت آب‌بندی وجود نداشته است. کدام تحلیل از دیدگاه یکپارچگی دارایی و قابلیت اطمینان دقیق‌تر است؟

الف) چون گسکت مطابق مشخصات طراحی انتخاب شده است، احتمال نشت تا زمان مشاهده خرابی آشکار ناچیز است و بازرسی دوره‌ای نقش محدودی دارد.

ب) مهم‌ترین اقدام، افزایش تعداد تجهیزات اطفای حریق اطراف اتصال است؛ زیرا افت آب‌بندی یک مسئله پیامدی محسوب می‌شود، نه یک مسئله یکپارچگی.

ج) انتخاب گسکت مناسب به‌تنهایی برای حفظ یکپارچگی کافی نیست؛ وضعیت اتصال باید متناسب با شرایط سرویس پایش و بازرسی شده و در صورت مشاهده نشانه‌های افت عملکرد، به‌موقع اصلاح شود.

د) اگر اتصال در زمان تعمیر آزمون شده باشد، تکرار بازرسی آن فقط در صورت تغییر فشار عملیاتی ضروری است.

۳- پس از یک رویداد مشابه قبلی، شرکت برای کاهش پیامد نشت گاز اقدام به نصب MOV در مسیر ورودی و خروجی توربین‌ها می‌کند. در رویداد بعدی مشخص می‌شود که MOV ورودی توربین شماره ۲ به دلیل آسیب کابل‌های آن در حریق، به‌صورت خودکار عمل نکرده است. کدام نتیجه از منظر مدیریت تغییر منطقی‌تر است؟

الف) چون نصب MOV یک اقدام اصلاحی برای کاهش ریسک بوده است، بررسی مدیریت تغییر فقط باید به عملکرد خود شیر محدود می‌شد و کابل‌کشی موضوع مستقلی است.

ب) نصب MOV نشان می‌دهد اقدام اصلاحی قبلی موفق بوده است و از کار افتادن آن در حریق صرفاً یک خرابی اتفاقی محسوب می‌شود.

ج) چون MOV در نهایت به‌صورت دستی بسته شده است، قابلیت عملکرد خودکار آن در ارزیابی مدیریت تغییر اهمیت ثانویه دارد.

د) تغییر ایجادشده باید علاوه بر هدف اولیه، اثر آن بر جانمایی شیر، مسیر کابل‌ها، مواجهه با حریق و قابلیت عملکرد لایه حفاظتی در شرایط اضطراری را نیز ارزیابی می‌کرد.

۴- فرض کنید در لحظات ابتدایی رویداد، ابر گاز قابل‌اشتعال تشکیل شده و پس از رسیدن به منبع اشتعال، Flash Fire و سپس Jet Fire در محل نشت ایجاد شده است. اگر MOV ورودی توربین بتواند بلافاصله پس از تشخیص شرایط اضطراری بسته شود، کدام اثر محتمل‌تر است؟

الف) با قطع جریان ورودی، مدت تغذیه Jet Fire و جرم کل گاز آزادشده کاهش می‌یابد؛ بنابراین شدت و تداوم پیامدها می‌تواند محدود شود، هرچند این اقدام لزوماً پیامد اولیه ناشی از ابر شکل‌گرفته را حذف نمی‌کند.

ب) با بسته‌شدن MOV، ابر گاز موجود بلافاصله از بین می‌رود و بنابراین وقوع Flash Fire و UVCE نیز به‌طور کامل منتفی می‌شود.

ج) عملکرد MOV فقط بر Jet Fire اثر دارد و پس از تشکیل ابر گاز، هیچ ارتباطی با شدت پیامدهای بعدی ندارد.

د) بسته‌شدن MOV عمدتاً از آسیب حرارتی تجهیزات جلوگیری می‌کند و تأثیر اصلی آن بر مدت و جرم گاز آزادشده نیست.

۵- در یک ارزیابی ریسک، مشخص شده است که نشت از اتصال فلنجی در مجاورت توربین‌های در سرویس می‌تواند علاوه بر پیامد موضعی، به UVCE، Flash Fire، Jet Fire و گسترش حریق منجر شود. در همین شرایط، مشخص می‌شود که طراحی اتصال، قابلیت عملکرد MOV و حفاظت تجهیزات در برابر حریق هرکدام جداگانه بررسی شده‌اند، اما ارتباط آن‌ها در یک سناریوی واحد ارزیابی نشده است. کدام رویکرد از دیدگاه شناسایی مخاطرات و تحلیل ریسک و مدیریت ریسک مناسب‌تر است؟

الف) چون هر تجهیز به‌صورت مستقل دارای حفاظت است، بررسی ترکیبی ضرورتی ندارد و ارزیابی باید بر احتمال اولیه نشت متمرکز باشد.

ب) کافی است احتمال خرابی اتصال کاهش داده شود؛ زیرا پس از وقوع نشت، عملکرد لایه‌های کاهنده پیامد دیگر در ارزیابی ریسک اهمیت زیادی ندارد.

ج) سناریوی کامل باید از نشت تا پیامدهای نهایی بررسی شود و اثر متقابل لایه‌هایی مانند یکپارچگی اتصال، ایزوله‌سازی سریع و حفاظت در برابر حریق در تعیین و کاهش ریسک لحاظ شود.

د) با توجه به وجود Fireproofing و سیستم اطفا، سناریوی UVCE و Jet Fire را می‌توان در یک پیامد واحد در نظر گرفت؛ زیرا هر دو ناشی از یک منبع گاز هستند.

References:

[1] American Petroleum Institute. 2012. *Refinery Valves and Accessories for Control and Safety Instrumented Systems* (API Recommended Practice 553, 2nd edition).

[2] American Petroleum Institute. 2020. *standard for Fire Test of Valves* (API Standard 6FA, 5th edition).

[3] Association for Materials Protection and Performance. 2023. *Metallic Gaskets for Pipe Flanges* (ASME B16.20-2023).

[4] Association for Materials Protection and Performance. 2025. *Pipe Flanges and Flanged Fittings* (ASME B16.5-2025).

[5] American Petroleum Institute. 2020. *Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants* (API Recommended Practice 2218, 3rd edition).