۳- رویداد سوم؛ انفجار هیتر ایستگاه تقلیل فشار گاز

در جریان بازدید روزانه دو نفر از کارکنان پیمانکار تعمیرات از ایستگاه تقلیل فشار گاز (CGS)، مشخص شد یکی از دو مشعل هیتر شماره ۱ خاموش شده است. هنگام اقدام برای روشن‌کردن مجدد مشعل، فعال‌شدن شمعک موجب اشتعال مخلوط گاز و هوای تجمع‌یافته در محفظه و وقوع انفجار شد. فشار ناشی از انفجار، درِ هیتر را به بیرون پرتاب کرد و برخورد آن با کارمند مستقر مقابل مشعل، صدمات شدیدی به وی وارد ساخت. مصدوم پس از انتقال به بیمارستان، جان خود را از دست داد.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، در سرویس نبودن سامانه قطع جریان گاز مشعل و اقدام برای روشن‌کردن مجدد آن بدون رعایت الزامات ایمنی و تمهیدات لازم، از عوامل اصلی وقوع رویداد بودند.

گردآوری اطلاعات و تدوین رویداد سوم

محمد صالحی‌پور | زهرا نوروزی

۳-۱- سناریوی کامل رویداد

دو نفر از کارکنان پیمانکار تعمیرات، برای بازدید روزانه به محل ایستگاه تقلیل فشار گاز مراجعه کردند. در جریان بازدید، مشاهده شد که یکی از دو مشعل هیتر شماره ۱ خاموش شده است. خاموش‌شدن مشعل، در صورت ادامه ورود گاز، می‌تواند موجب تجمع سوخت نسوخته در محفظه شود؛ وضعیتی که پیش از هر اقدام برای روشن‌کردن مجدد، باید شناسایی و برطرف شود.

یکی از کارکنان مقابل درِ مشعل هیتر شماره ۱ قرار گرفت و از همکار خود خواست دکمه برقی شمعک را فشار دهد تا مشعل مجدداً روشن شود. در این زمان، گاز در محفظه هیتر تجمع یافته و پس از اختلاط با هوا، مخلوط قابل‌اشتعالی تشکیل داده بود. بنابراین، اقدام برای روشن‌کردن مشعل در شرایطی انجام شد که محفظه برای راه‌اندازی مجدد ایمن نبود.

با فعال‌شدن شمعک، انرژی لازم برای اشتعال مخلوط موجود فراهم شد. احتراق سریع گاز و هوا در فضای محفظه، موجب افزایش ناگهانی فشار و وقوع انفجار شد. فشار حاصل، درِ هیتر را از محل خود جدا کرد و به بیرون پرتاب ساخت.

کارمندی که مقابل درِ مشعل قرار داشت، مستقیماً در مسیر پرتاب در بود. برخورد در با صورت و سینه وی، صدمات شدیدی ایجاد کرد. پس از وقوع حادثه، بلافاصله با اورژانس تماس گرفته شد و مصدوم به بیمارستان انتقال یافت؛ اما به‌دلیل شدت صدمات وارده، در بیمارستان جان خود را از دست داد.

بررسی‌های انجام‌شده نشان داد سامانه کنترل قطع جریان گاز مشعل در سرویس نبوده است. در نتیجه، مانعی که باید از ادامه ورود گاز پس از خاموش‌شدن مشعل جلوگیری می‌کرد، در دسترس نبود. روشن‌کردن مجدد مشعل نیز بدون رعایت الزامات ایمنی و تمهیدات لازم انجام شد و مخلوط قابل‌اشتعال تجمع‌یافته در معرض منبع اشتعال قرار گرفت.

در این رویداد، خاموش‌شدن مشعل آغاز وضعیت غیرعادی بود؛ اما زنجیره حادثه با تجمع گاز، تشکیل مخلوط قابل‌اشتعال و فعال‌شدن شمعک تکمیل شد. قرارگیری کارمند مقابل درِ مشعل نیز او را در معرض مستقیم پیامد مکانیکی انفجار قرار داد.

شکل (۳-۱) می‌تواند سناریوی کامل رویداد و توالی مراحل آن را از پارگی خط لوله تا انفجار ابر گاز و تداوم آتش فورانی نشان دهد.



شکل (۳- ۱) سناریوی کامل و توالی مراحل وقوع رویداد سوم

۳-۲- تجهیزات و سیستم‌های مرتبط

در این رویداد، خاموش‌شدن یکی از مشعل‌های هیتر با تجمع گاز در محفظه احتراق همراه شد. اقدام برای روشن‌کردن مجدد مشعل، مخلوط قابل‌اشتعال موجود را در معرض منبع اشتعال قرار داد و موجب انفجار داخلی و پرتاب درِ هیتر شد. برای جلوگیری از شکل‌گیری چنین زنجیره‌ای، قطع سوخت پس از خاموش‌شدن شعله و کنترل توالی راه‌اندازی مجدد، دو وظیفه اساسی سامانه ایمنی مشعل هستند.

- شیر ایمنی قطع سوخت مشعل[1]

شیر ایمنی قطع سوخت مشعل ، در مسیر تأمین گاز سوخت نصب می‌شود و وظیفه آن قطع جریان سوخت در صورت تشخیص وضعیت ناایمن است. این شیر معمولاً تحت فرمان سیستم مدیریت مشعل[2] یا سامانه اختصاصی

[1] Safety Shutoff Valve - SSV
[2] Burner Management System - BMS

حفاظت شعله عمل می‌کند. هنگامی که آشکارساز شعله، خاموش‌شدن مشعل را تشخیص دهد یا وجود شعله در زمان مجاز تأیید نشود، منطق حفاظتی فرمان بسته‌شدن شیر را صادر می‌کند تا از ادامه ورود گاز نسوخته به محفظه جلوگیری شود.

در این رویداد، عملکرد صحیح سامانه قطع سوخت می‌توانست پس از خاموش‌شدن مشعل، ورود گاز را متوقف و احتمال تشکیل مخلوط قابل‌اشتعال در محفظه هیتر را کاهش دهد. با این حال، بسته‌شدن شیر به‌تنهایی گاز موجود در محفظه را خارج نمی‌کند؛ بنابراین، قطع سوخت باید با اجرای الزامات ایمن راه‌اندازی مجدد همراه باشد.

اثربخشی این حفاظت به تشخیص صحیح وضعیت شعله، عملکرد منطق قطع، بسته‌شدن به‌موقع شیر و آب‌بندی مؤثر آن وابسته است. بازرسی و آزمون‌های دوره‌ای نیز باید نشان دهند که مجموعه سامانه، در زمان نیاز قادر به قطع جریان سوخت است. وجود شیر، بدون اطمینان از عملکرد آشکارساز، مدار فرمان و خود شیر، حفاظت قابل‌اعتمادی فراهم نمی‌کند. شکل (۳-۲) نشان‌دهنده عملکرد شیر ایمنی قطع سوخت مشعل در کنار سامانه مدیریت مشعل یا حفاظت شعله است.



شکل (۳- ۲) عملکرد شیر ایمنی قطع سوخت مشعل در کنار سامانه مدیریت مشعل یا حفاظت شعله

❖ سیستم جرقه‌زن و شمعک هیتر[1]

جرقه‌زن و شمعک، شعله اولیه موردنیاز برای روشن‌شدن مشعل اصلی را فراهم می‌کنند. ایمنی این فرایند به هماهنگی آن‌ها با آشکارساز شعله و منطق کنترل راه‌اندازی وابسته است؛ به‌گونه‌ای که ورود سوخت و ایجاد جرقه تنها پس از تأیید شرایط لازم انجام شود.

[1] Ignition System & Pilot Burner

پس از خاموش‌شدن مشعل، پیش از تلاش مجدد برای روشن‌کردن آن، باید جریان سوخت قطع و محفظه مطابق توالی تخلیه و تهویه طراحی‌شده، از گاز نسوخته پاک‌سازی شود. این مرحله که «پرج[1]» نام دارد، صرفاً به معنای انتظار برای گذشت یک مدت مشخص نیست؛ بلکه باید شرایط لازم برای خروج گاز، از جمله مسیر عبور هوا، جریان تهویه و مدت اجرای آن، مطابق طراحی تجهیز فراهم و تأیید شود.

پس از تکمیل این مرحله، توالی روشن‌سازی شمعک و مشعل اصلی اجرا می‌شود. اگر شعله در زمان مجاز تشکیل نشود یا وجود آن تأیید نگردد، سامانه حفاظتی باید ورود سوخت را متوقف کند و از ادامه تلاش ناموفق برای روشن‌سازی جلوگیری نماید.

در این رویداد، فعال‌شدن شمعک در حضور گاز تجمع‌یافته، انرژی لازم برای آغاز احتراق را فراهم کرد. نقش حفاظتی سامانه راه‌اندازی، جلوگیری از صدور فرمان روشن‌سازی پیش از تکمیل شرایط ایمن است. بنابراین، سالم‌بودن جرقه‌زن و شمعک کافی نیست؛ توالی راه‌اندازی و منطق‌های حفاظتی مرتبط نیز باید مانع ایجاد جرقه در محفظه‌ای شوند که احتمال حضور مخلوط قابل‌اشتعال در آن وجود دارد.

این رویداد نشان می‌دهد که ایمنی مشعل به عملکرد هماهنگ قطع سوخت، پایش شعله و کنترل راه‌اندازی وابسته است. سامانه قطع سوخت باید از ادامه ورود گاز پس از خاموش‌شدن شعله جلوگیری کند و سامانه راه‌اندازی نیز باید روشن‌سازی مجدد را به تأیید شرایط ایمن محفظه مشروط سازد. در شکل (۳-۳) جزییات سیستم جرقه‌زن و شمعک هیتر به همراه مراحل روشن‌سازی ایمن این سیستم نشان داده شده است.



شکل (۳- ۳) جزییات سیستم جرقه‌زن و شمعک هیتر به همراه مراحل روشن‌سازی ایمن

۳-۳- پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی

در این رویداد، تجمع گاز در محفظه هیتر، تشکیل مخلوط قابل‌اشتعال و فعال‌شدن شمعک، شرایط لازم برای آغاز احتراق را فراهم کردند. احتراق سریع مخلوط در فضای محفظه، موجب افزایش ناگهانی فشار و پرتاب درِ هیتر شد. برای تحلیل

[1] Purge

این سازوکار، باید میان دو نوع انتشار احتراق، یعنی دفلاگریشن[1] و دتونیشن[2]، تمایز قائل شد؛ زیرا سرعت انتشار، نحوه انتقال انرژی و فشار حاصل در این دو پدیده متفاوت است.

- دفلاگریشن

- دفلاگریشن، انتشار جبهه احتراق با سرعتی کمتر از سرعت صوت در مخلوط واکنش‌نداده است. در این حالت، انتقال حرارت و گونه‌های فعال از ناحیه احتراق به مخلوط مجاور، شرایط لازم برای ادامه واکنش و پیشروی شعله را فراهم می‌کند.

اگر دفلاگریشن در یک محفظه بسته یا نیمه‌بسته رخ دهد، انبساط گازهای داغ حاصل از احتراق با محدودیت روبه‌رو می‌شود. هنگامی که سرعت تولید و انبساط این گازها از ظرفیت خروج آن‌ها بیشتر باشد، فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد. ترکیب و مقدار مخلوط قابل‌اشتعال، فشار و دمای اولیه، آشفتگی جریان، هندسه محفظه و مسیرهای تخلیه، بر نرخ افزایش فشار و بیشینه فشار ایجادشده اثر می‌گذارند.

آشفتگی می‌تواند با افزایش سطح جبهه شعله، سرعت سوختن مخلوط را بیشتر کند. وجود موانع داخلی و محدودیت مسیر خروج نیز ممکن است شتاب‌گیری شعله و افزایش فشار را تشدید کند. بنابراین، دفلاگریشن محصورشده می‌تواند به شکست اجزای محفظه و پرتاب قطعات منجر شود؛ کمتر بودن سرعت انتشار احتراق از سرعت صوت، به معنای کم‌بودن شدت پیامدها نیست.

- دتونیشن

دتونیشن، انتشار جبهه احتراق با سرعتی بیش از سرعت صوت در مخلوط واکنش‌نداده است. در این پدیده، موج ضربه‌ای و ناحیه واکنش شیمیایی به یکدیگر پیوند دارند. موج ضربه‌ای، مخلوط پیش روی خود را به‌شدت فشرده و گرم می‌کند و واکنش سریع مخلوط نیز انرژی لازم برای تداوم موج را تأمین می‌کند.

تشکیل دتونیشن به شرایط مخلوط و محیط انتشار وابسته است. واکنش‌پذیری و ترکیب سوخت و هوا، فشار و دمای اولیه، ابعاد و هندسه مسیر، میزان محصورشدگی و وجود موانع، از عوامل مؤثر در امکان شکل‌گیری آن هستند. در برخی شرایط، شعله دفلاگریشن به‌تدریج شتاب می‌گیرد و به دتونیشن تبدیل می‌شود. این فرایند، «گذار از دفلاگریشن به دتونیشن[3]» نام دارد. با این حال، هر احتراق سریع در فضای محصور الزاماً چنین گذاری را تجربه نمی‌کند.

سازوکار محتمل انفجار در این رویداد:

[1] Deflagration
[2] Detonation
[3] Deflagration-to-Detonation Transition - DDT

بر اساس شرح سناریو، پیش از فعال‌شدن شمعک، مخلوط قابل‌اشتعالی از گاز و هوا در محفظه هیتر وجود داشته است. با آغاز احتراق، فشار محفظه افزایش یافته و درِ هیتر به بیرون پرتاب شده است. این توالی با وقوع دفلاگریشن محصورشده سازگار است و می‌توان آن را مبنای اولیه تحلیل قرار داد.

وقوع انفجار بلافاصله پس از فعال‌شدن شمعک یا شدت پرتاب در، به‌تنهایی وقوع دتونیشن را اثبات نمی‌کند. دفلاگریشن نیز می‌تواند فشار کافی برای شکست و پرتاب اجزای مکانیکی ایجاد کند. همچنین، وجود آثار موج فشار یا تغییر شکل قطعات، بدون تحلیل تکمیلی، برای تشخیص قطعی نوع احتراق کافی نیست.

برای تعیین دقیق سازوکار، اطلاعاتی مانند هندسه محفظه، وضعیت مسیرهای خروج، مقدار و ترکیب گاز تجمع‌یافته، محل آغاز اشتعال و الگوی آسیب اجزا باید بررسی شوند. در نبود این اطلاعات، توصیف رویداد به‌عنوان «انفجار محتمل ناشی از دفلاگریشن محصورشده» دقیق‌تر است و قطعیتی فراتر از شواهد موجود ایجاد نمی‌کند.

این تمایز در انتخاب حفاظت اهمیت دارد. سامانه‌ای که برای محدودکردن فشار دفلاگریشن طراحی شده است، الزاماً برای شرایط دتونیشن مناسب نیست. برای نمونه، تخلیه فشار انفجار ممکن است در برابر فشارهای شدید ناشی از دتونیشن حفاظت مناسبی فراهم نکند؛ بنابراین، انتخاب روش حفاظت باید بر اساس سازوکار محتمل احتراق و شرایط واقعی تجهیز انجام شود.

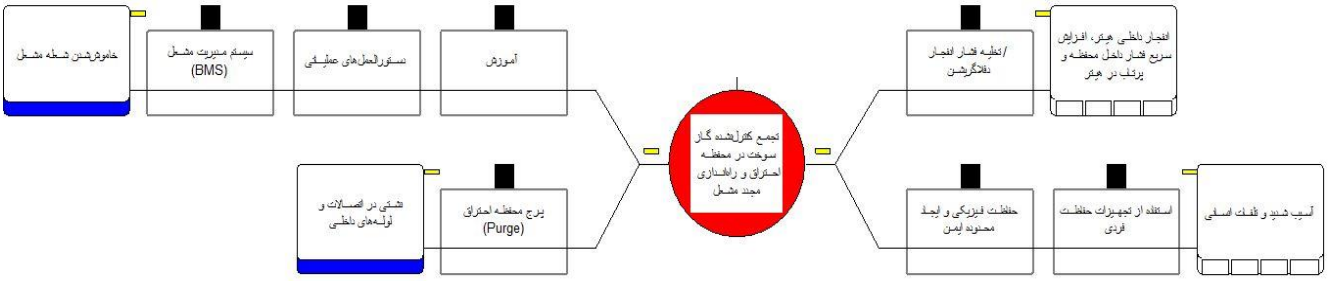
۳-۴-تحلیل پاپیونی

در این تحلیل، «تجمع کنترل‌نشده گاز سوخت در محفظه احتراق و راه اندازی مجدد مشعل» به‌عنوان رویداد مرکزی انتخاب شده است. این رویداد بیانگر از دست رفتن کنترل بر ورود و موجودی سوخت نسوخته در محفظه است. عنوان «از دست رفتن محصورسازی» برای آن دقیق نیست؛ زیرا مسئله اصلی، تجمع ناایمن سوخت در فضای احتراق است، نه الزاماً خروج ماده از مرز محصورکننده تجهیز.

پیش از رویداد مرکزی، خاموش‌شدن شعله و ادامه ورود گاز، شرایط تجمع سوخت نسوخته را فراهم می‌کند. برای جلوگیری از این وضعیت، آشکارساز شعله باید خاموش‌شدن مشعل را تشخیص دهد و سامانه مدیریت مشعل یا سامانه اختصاصی حفاظت شعله، فرمان قطع سوخت را صادر کند. بسته‌شدن مؤثر شیر ایمنی قطع سوخت، زنجیره حادثه را پیش از تجمع ناایمن گاز متوقف می‌کند. اثربخشی این مانع به عملکرد هماهنگ آشکارساز، منطق حفاظتی و شیر وابسته است؛ این اجزا، بخش‌های یک کارکرد حفاظتی مشترک‌اند و نباید بدون بررسی وابستگی‌ها، لایه‌های مستقل تلقی شوند.

پس از تجمع گاز، اقدام برای روشن‌کردن مجدد مشعل می‌تواند مخلوط قابل‌اشتعال را در معرض منبع اشتعال قرار دهد. بنابراین، در چارچوب رویداد مرکزی انتخاب‌شده، روشن‌سازی ناایمن در مسیر تشدید حادثه قرار می‌گیرد. پرج محفظه و جلوگیری از صدور فرمان روشن‌سازی تا تأیید شرایط ایمن، موانعی هستند که می‌توانند از تبدیل تجمع گاز به انفجار جلوگیری کنند.

اگر مخلوط تجمع‌یافته مشتعل شود، احتراق سریع در محفظه می‌تواند موجب افزایش فشار، شکست یا جداشدن اجزای هیتر و پرتاب آن‌ها شود. در این رویداد، پرتاب درِ هیتر و برخورد آن با کارمند مستقر مقابل مشعل، به صدمات شدید و در نهایت فوت وی انجامید. در این مسیر، حفاظت مهندسی در برابر فشار دفلاگریشن و کنترل حضور افراد در محدوده پیامد، می‌توانند شدت خسارات را محدود کنند. شکل (۳-۴)، شماتیک نمودار پاپیونی این رویداد را نشان می‌دهد و ارتباط میان تهدیدها، موانع پیشگیرانه، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع کاهنده را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد.



شکل (۳- ۴) نمودار پاپیونی ترسیم شده با استفاده از نرم‌افزار Bow Tie Pro برای رویداد اول

۳-۵- لایه‌های حفاظت در برابر وقوع و گسترش حادثه

لایه‌های حفاظتی این رویداد، دو کارکرد اصلی دارند: جلوگیری از تجمع و اشتعال ناایمن گاز در محفظه هیتر و محدودکردن پیامدهای انفجار احتمالی. در تقسیم‌بندی زیر، منظور از حفاظت پیشگیرانه، پیشگیری از وقوع انفجار است. در نموداری که «تجمع کنترل‌نشده گاز» رویداد مرکزی آن باشد، پرج و کنترل روشن‌سازی در سمت جلوگیری از تشدید رویداد قرار می‌گیرند.

۳-۵-۱- لایه‌های حفاظتی پیشگیرانه

- سیستم مدیریت مشعل

سیستم مدیریت مشعل، بر توالی راه‌اندازی، ادامه کار و خاموش‌شدن ایمن مشعل نظارت می‌کند. این سامانه با دریافت وضعیت آشکارساز شعله[1] و سایر ورودی‌های ایمنی، مجازبودن ورود سوخت و ادامه احتراق را تعیین می‌کند. در صورت خاموش‌شدن شعله یا برقرارنبودن شرایط لازم، فرمان قطع سوخت صادر می‌شود و شیر قطع ایمنی [2] سوخت بسته می‌شود.

[1] Flame Detector
[2] Safety Shutoff Valve - SSV

❖ پرج محفظه احتراق[1]

پرج یک لایه حفاظتی برای خارج کردن گازها و بخارات قابل‌اشتعال از محفظه احتراق، پیش از ایجاد منبع اشتعال است.

در این فرآیند، پیش از مجاز شدن جرقه و ورود سوخت، جریان هوای کافی از محفظه عبور داده می‌شود تا غلظت گاز تجمع‌یافته به محدوده‌ای برسد که تشکیل مخلوط قابل‌اشتعال در زمان جرقه‌زنی به حد ایمن کاهش یابد.

به همین دلیل، پس از خاموش شدن شعله، روشن‌کردن مجدد مشعل بدون انجام پرج مناسب می‌تواند یک وضعیت پرخطر ایجاد کند.

❖ دستورالعمل‌های عملیاتی

دستورالعمل‌های عملیاتی باید توالی ایمن راه‌اندازی، توقف، روشن‌کردن مجدد مشعل پس از خاموشی شعله و اقدامات لازم در شرایط غیرعادی را به‌روشنی مشخص کنند. نبود یا اجرا نشدن این دستورالعمل‌ها می‌تواند باعث راه‌اندازی ناایمن مشعل و تجمع گاز در محفظه احتراق شود.

❖ آموزش

آموزش کارکنان بهره‌برداری و تعمیرات درباره خطرات خاموشی شعله، ضرورت Purge پیش از راه‌اندازی مجدد و نحوه واکنش به نشتی یا شرایط غیرعادی، احتمال خطای انسانی را کاهش می‌دهد و از تکرار رفتارهای ناایمن جلوگیری می‌کند.

۳-۵-۲- لایه‌های حفاظتی کاهنده پیامد

❖ سیستم تخلیه فشار انفجار / دفلاگریشن[2]

در صورت وقوع دفلگریشن در محفظه، انرژی آزادشده می‌تواند باعث افزایش بسیار سریع فشار شود. این سیستم با فراهم‌کردن یک مسیر مهندسی‌شده برای تخلیه محصولات احتراق، از افزایش فشار تا سطوح مخرب جلوگیری می‌کند.

در صورت طراحی صحیح، فشار داخلی با بازشدن پنل یا تجهیز تخلیه فشار به سمت یک مسیر امن هدایت می‌شود و بدین ترتیب از وارد شدن فشار بیش از ظرفیت طراحی به بدنه یا اجزای محفظه جلوگیری می‌شود.

این لایه برای دفلاگریشن طراحی می‌شود و نباید با سیستم‌های حفاظت در برابر دتونیشن یکسان در نظر گرفته شود.

[1] Combustion Chamber Purging
[2] Explosion Relief / Deflagration Venting System

- حفاظت فیزیکی و ایجاد محدوده ایمن[1]

پس از وقوع رویداد، ایجاد محدوده ایمن و جلوگیری از حضور افراد در مقابل مسیر احتمالی پرتاب اجزای هیتر، یک لایه مهم برای کاهش پیامدهای انسانی است. تعیین فاصله‌های حفاظتی، محدودکردن دسترسی و جلوگیری از استقرار افراد در مناطق در معرض خطر می‌تواند احتمال قرارگیری افراد در مسیر پرتاب قطعات و سایر پیامدهای فیزیکی انفجار را کاهش دهد.

- استفاده از تجهیزات حفاظت فردی[2]

استفاده از PPE متناسب با خطرات موجود، مانند کلاه و محافظ صورت، می‌توانست به‌عنوان یک لایه کاهنده پیامد، شدت آسیب‌های وارده به کارکنان را تا حدی کاهش دهد و در شرایط مشابه، احتمال صدمات و مرگ را کاهش دهد.

۳-۶- ارتباط رویداد با عناصر مدیریت ایمنی فرآیند

بررسی سناریوی رویداد، تجهیزات ایمنی، پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی و لایه‌های حفاظتی نشان می‌دهد که تحلیل این حادثه باید فراتر از اقدام برای روشن‌کردن مجدد مشعل باشد. در سرویس نبودن سامانه قطع سوخت و روشن‌سازی بدون رعایت الزامات ایمنی، ضرورت بررسی نحوه اجرای دستورالعمل‌ها، آموزش کارکنان و اطمینان از عملکرد موانع حفاظتی را مطرح می‌کند. بررسی کفایت طراحی نیز بخشی از این تحلیل است. بر این اساس، عوامل گزارش‌شده و زمینه‌های مدیریتی و سازمانی نیازمند بررسی، در ارتباط با عناصر مدیریت ایمنی فرایند تحلیل می‌شوند. مهم‌ترین ضعف‌های مدیریتی و سازمانی مرتبط با این رویداد، مطابق جدول (۳-۱)، تحلیل می‌شوند.

جدول (۳- ۱) مهم‌ترین ضعف‌های مدیریتی و سازمانی با توجه به عناصر مدیریت ایمنی فرایند مبتنی بر ریسک در رویداد سوم

شماره	عنوان المان	توضیحات مربوط به حادثه
۱۰	دستورالعمل‌های عملیاتی[3]	دستورالعمل‌های عملیاتی، مبنای انجام صحیح عملیات‌های حساس مانند راه‌اندازی، خاموش‌کردن و راه‌اندازی مجدد تجهیزات فرآیندی هستند. در این رویداد، خاموش شدن شعله مشعل یک وضعیت عملیاتی غیرعادی بود که نیازمند اجرای گام‌های مشخص شامل بررسی علت خاموشی، اطمینان از قطع جریان سوخت، انجام پرج محفظه احتراق و سپس اقدام برای راه‌اندازی مجدد مشعل بود.

[1] Safe Zone
[2] Personal Protective Equipment - PPE
[3] Operating Procedures

شماره و عنوان المان		توضیحات مربوط به حادثه
۹	روش‌های انجام کار ایمن[1]	روش‌های انجام کار ایمن، الزامات لازم برای انجام فعالیت‌هایی را مشخص می‌کنند که در شرایط خاص، دارای پتانسیل ایجاد آسیب هستند. در این رویداد، اقدام کارکنان برای روشن کردن مجدد مشعل در مقابل درِ هیتر، بدون اطمینان از ایمن بودن شرایط داخل محفظه احتراق انجام شد. اجرای صحیح روش‌های انجام کار ایمن، شامل ارزیابی شرایط پیش از اقدام، رعایت فاصله ایمن از نقاط خطرناک و انجام فعالیت طبق الزامات مصوب، می‌توانست احتمال قرارگیری افراد در معرض پیامد انفجار را کاهش دهد.
۱۰	یکپارچگی دارایی و قابلیت اطمینان	هدف این المان، اطمینان از عملکرد قابل اعتماد تجهیزات در طول چرخه عمر آن‌ها است. در این رویداد، سرویس نبودن سیستم کنترل قطع جریان گاز مشعل هیتر، یکی از عوامل اصلی معرفی شد. سیستم‌های ایمنی مانند سیستم مدیریت مشعل، آشکارساز شعله و شیرهای قطع ایمنی سوخت باید در شرایط خاموشی شعله، از ورود ادامه‌دار گاز به محفظه احتراق جلوگیری می‌کردند. اجرای برنامه‌های تعمیرات پیشگیرانه، تست‌های دوره‌ای عملکرد تجهیزات ایمنی و اطمینان از آماده‌به‌کاری سیستم‌های حفاظتی، می‌توانست از تجمع گاز در محفظه احتراق جلوگیری کند.
۱۲	آموزش و اطمینان از عملکرد[2]	این المان بر اطمینان از صلاحیت افراد، درک مخاطرات و توانایی اجرای صحیح وظایف عملیاتی تمرکز دارد. در این رویداد، تجربه حوادث مشابه در گذشته نشان داد که درس‌آموخته‌های قبلی و الزامات مربوط به نحوه اقدام در شرایط خاموش شدن شعله، به‌صورت مؤثر در رفتار عملیاتی کارکنان و پیمانکاران نهادینه نشده بود. آموزش‌های دوره‌ای، ارزیابی صلاحیت کارکنان و اطمینان از درک صحیح خطرات راه‌اندازی مجدد هیتر پس از خاموشی شعله، می‌توانست از تکرار چنین رویدادی جلوگیری کند.

[1] Safe Work Practices
[2] Training and Performance Assurance

۳-۷- مراجع و منابع تخصصی ایمنی فرایند

در بررسی این رویداد، از شرح سناریو و پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی تا تحلیل پاپیونی، لایه‌های حفاظتی و عوامل مدیریتی و سازمانی، از منابع تخصصی ایمنی فرایند و استانداردهای مرتبط با ایمنی هیتر و احتراق استفاده شده است. مهم‌ترین منابع مرتبط با این مباحث در جدول (۳-۲) معرفی شده‌اند.

جدول (۳- ۲) مهم‌ترین منابع مورد استفاده در تحلیل رویداد دوم

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
NFPA 85 [1]	Boiler and Combustion Systems Hazards Code	در بررسی سیستم مدیریت مشعل، شیر قطع ایمنی سوخت، پایش شعله، توالی‌های ایمن راه‌اندازی و پرچ به این استاندارد استناد شد. NFPA 85 الزامات مرتبط با حفاظت سیستم‌های احتراقی و مشعل‌ها را پوشش می‌دهد و در این هفته، مبنای فنی بررسی عملکرد لایه‌هایی بود که می‌توانستند پس از خاموش شدن شعله، از ادامه ورود سوخت و ایجاد شرایط خطرناک در محفظه احتراق جلوگیری کنند.
NFPA 68 [2]	Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting	در بررسی تخلیه فشار انفجار / دفلاگریشن ، این استاندارد مبنای توضیح عملکرد حفاظت در برابر افزایش فشار ناشی از دفلاگریشن قرار گرفت. در سناریوی این هفته، در صورت وقوع دفلگریشن در محفظه هیتر، یک سامانه تخلیه فشار مناسب می‌توانست با فراهم‌کردن مسیر مهندسی‌شده برای تخلیه فشار و محصولات احتراق، از افزایش فشار داخلی تا سطوح مخرب جلوگیری کرده و احتمال پرتاب در هیتر را کاهش دهد.
NFPA 69 [3]	Standard on Explosion Prevention Systems	در بررسی پیشگیری از انفجار و تمایز میان دفلگریشن و دتونیشن، به این استاندارد استناد شد. استاندارد NFPA 69 چارچوب‌های حفاظت پیشگیرانه در برابر انفجار را بررسی می‌کند. در مباحث این هفته، این

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
		مرجع برای درک جایگاه اقداماتی که می‌توانستند از ایجاد یا گسترش شرایط انفجاری جلوگیری کنند و همچنین تمایز آن‌ها از حفاظت در برابر پیامدهای یک انفجار مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۸- سنجش تحلیل مهندسی رویداد

پس از بررسی و واکاوی سناریوی حادثه، 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 حادثه 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- در این رویداد، فرض کنید سیستم مدیریت مشعل (BMS) پس از خاموش شدن شعله، سیگنال عدم وجود شعله را از Flame Detector دریافت کرده است؛ اما شیر قطع ایمنی سوخت (SSV) به دلیل نقص عملکردی بسته نشده است. کدام تحلیل دقیق‌تر است؟

الف) چون BMS وضعیت شعله را تشخیص داده است، وقوع انفجار دیگر ارتباطی با عملکرد SSV ندارد.

ب) BMS یک لایه تشخیص و فرمان است، اما تا زمانی که SSV جریان سوخت را قطع نکند، امکان ادامه ورود گاز و تشکیل مخلوط قابل‌اشتعال وجود دارد.

ج) عملکرد Flame Detector به‌تنهایی برای جلوگیری از تجمع گاز کافی است و SSV تنها نقش کاهش پیامد را دارد.

د) در این شرایط، تنها Purge می‌توانست از وقوع رویداد جلوگیری کند و سایر تجهیزات نقشی نداشتند.

۲- پس از خاموش شدن شعله هیتر، اپراتور بدون انجام Purge و بدون بررسی وضعیت محفظه احتراق، اقدام به روشن کردن مجدد مشعل می‌کند. کدام تحلیل درباره نقش Purge صحیح‌تر است؟

الف) Purge فقط برای افزایش کیفیت احتراق و کاهش مصرف سوخت استفاده می‌شود و نقش مستقیمی در جلوگیری از انفجار ندارد.

ب) Purge با کاهش دمای محفظه، احتمال آسیب مکانیکی هیتر را کاهش می‌دهد، اما تأثیر مهمی بر خطر انفجار ندارد.

ج) Purge یک لایه حفاظتی پیشگیرانه است که با خارج کردن گازهای تجمع‌یافته، احتمال تشکیل مخلوط قابل‌اشتعال پیش از جرقه‌زنی را کاهش می‌دهد.

د) Purge تنها پس از وقوع انفجار برای تخلیه محصولات احتراق و کاهش فشار استفاده می‌شود.

۳- در این رویداد، فرض کنید انفجار داخلی هیتر به دلیل Deflagration رخ داده است. کدام گزینه درباره نقش Explosion Relief / Deflagration Venting و BMS صحیح‌تر است؟

الف) Deflagration Venting پس از شروع احتراق، با کاهش فشار از شدت پیامد جلوگیری می‌کند.

ب) هر دو لایه برای جلوگیری از تشکیل مخلوط قابل اشتعال طراحی شده‌اند و عملکرد مشابهی دارند.

ج) Deflagration Venting با قطع جریان سوخت، از ادامه ورود گاز به محفظه احتراق جلوگیری می‌کند و نقش اصلی آن پیشگیری از انفجار است.

د) BMS و Deflagration Venting هر دو تنها پس از افزایش فشار فعال می‌شوند و تفاوت عملکردی قابل توجهی ندارند.

۴- در این رویداد مشخص شد که پیش از وقوع انفجار، تجربه یک رویداد مشابه در هیتر دیگری وجود داشته، اما درس‌آموخته‌ها به‌طور مؤثر در عملیات جاری نهادینه نشده بود. کدام تحلیل مدیریتی دقیق‌تر است؟

الف) ضعف اصلی در آموزش و اطمینان از عملکرد (Training and Performance Assurance) بوده است؛ زیرا الزامات و درس‌آموخته‌های رویداد قبلی به‌طور مؤثر در صلاحیت و عملکرد کارکنان نهادینه نشده بود.

ب) ضعف اصلی در یکپارچگی دارایی و قابلیت اطمینان (Asset Integrity and Reliability) بوده است؛ زیرا سیستم کنترل قطع جریان گاز مشعل در وضعیت قابل‌اعتماد و آماده‌به‌کار قرار نداشت.

ج) ضعف اصلی در دستورالعمل‌های عملیاتی (Operating Procedures) بوده است؛ زیرا الزامات حاصل از رویداد قبلی به‌طور مؤثر در دستورالعمل‌های مربوط به خاموشی و راه‌اندازی مجدد مشعل منعکس نشده بود.

د) ضعف اصلی در بازبینی مدیریت و بهبود مستمر (Management Review and Continuous Improvement) بوده است؛ زیرا درس‌آموخته حاصل از رویداد قبلی به اقدام اصلاحی مؤثر، پایدار و قابل‌پیگیری تبدیل نشده بود.

۵- فرض کنید در زمان بازدید مشخص شده بود که سیستم قطع خودکار جریان گاز مشعل در سرویس نیست و علت خاموش شدن شعله نیز مشخص نشده است. کارکنان برای روشن‌کردن مجدد مشعل در مقابل درِ هیتر قرار گرفته‌اند. کدام اقدام، از دیدگاه روش‌های انجام کار ایمن (Safe Work Practices) مناسب‌تر بود؟

الف) روشن‌کردن شمعک از فاصله نزدیک، مشروط به اینکه فرد در زمان جرقه‌زنی مستقیماً مقابل درب هیتر قرار نگیرد.

ب) ادامه عملیات پس از کاهش فشار گاز ورودی، زیرا کاهش فشار احتمال وقوع انفجار را به حداقل می‌رساند.

ج) توقف فعالیت و جلوگیری از راه‌اندازی مجدد تا مشخص‌شدن وضعیت ایمنی هیتر و فراهم‌شدن شرایط لازم برای راه‌اندازی ایمن.

د) روشن‌کردن شمعک از فاصله نزدیک، مشروط به اینکه فرد در زمان جرقه‌زنی از تجهیزات حفاظت فردی مانند کلاه و حفاظ صورت استفاده کند.

References:

[1] National Fire Protection Association. 2023. *Boiler and Combustion Systems Hazards Code* (NFPA 85).

[2] National Fire Protection Association. 2023. *Standard on Explosion Prevention by Deflagration Venting* (NFPA 68).

[3] National Fire Protection Association. 2019. *Standard on Explosion Prevention Systems* (NFPA 69).