۱- رویداد اول؛ انفجار و آتش‌سوزی مخزن اتمسفریک سقف ثابت [1]

یک مخزن اتمسفریک با سقف ثابت، حاوی نفت خام، در سطح پایین بهره‌برداری قرار داشت و در نتیجه، فضای بخار قابل‌توجهی در بالای سطح مایع ایجاد شده بود. بخارات هیدروکربنی از طریق ونت‌های عصایی[2] و محل دیپ‌زنی فاقد درپوش به محیط منتشر شدند. وقوع صاعقه، منبع اشتعال لازم را فراهم کرد و بخارات قابل‌اشتعال پیرامون نقاط انتشار مشتعل شدند.

نبود شعله‌گیر مؤثر در مسیر ونت‌ها، امکان بازگشت جبهه شعله به فضای بخار داخل مخزن را فراهم کرد. احتراق سریع مخلوط بخار و هوا موجب افزایش ناگهانی فشار داخلی، جداشدن و پرتاب سقف مخزن شد. پس از برداشته‌شدن سقف، سطح نفت خام در معرض هوا قرار گرفت و حریق اولیه به حریق استخری[3] تبدیل شد.

گردآوری اطلاعات و تدوین رویداد اول

محمد صالحی‌پور | زهرا نوروزی

۱-۱- سناریوی کامل رویداد

مخزن موردنظر یک مخزن اتمسفریک با سقف ثابت و حاوی نفت خام بود که در سطح پایینی از بهره‌برداری قرار داشت؛ به‌طوری‌که ارتفاع مایع در آن حدود ۱/۹ متر گزارش شده بود. پایین بودن سطح مایع، به معنای افزایش قابل‌توجه حجم فضای بخار در بالای نفت خام است؛ فضایی که می‌تواند حاوی مخلوطی از بخارات هیدروکربنی و هوا باشد.

بخارات نفت خام از مسیرهای خروجی مخزن، از جمله ونت‌های عصایی و محل دیپ‌زنی فاقد درپوش، به بیرون راه یافته بودند. بخارات هیدروکربنی، بسته به ترکیب محتویات مخزن، دما و شرایط محیطی، می‌توانند نسبت به هوا سنگین‌تر باشند و در نواحی کم‌ارتفاع یا روی سطح سقف تجمع یابند. در این شرایط، اطراف دهانه‌های خروج بخار و دریچه باز دیپ‌زنی به ناحیه‌ای مستعد تشکیل ابر بخار قابل‌اشتعال تبدیل شد.

وقوع صاعقه، منبع بالقوه‌ای از انرژی اشتعال را فراهم کرد. اگر غلظت بخارات در محدوده اشتعال‌پذیری[4] قرار داشته باشد، حتی یک جرقه یا تخلیه الکتریکی می‌تواند برای آغاز احتراق کافی باشد. در ابتدا، حریق در بخش بیرونی سقف مخزن و در اطراف ونت‌ها و نقاط انتشار بخار ظاهر شد؛ جایی که بخار هیدروکربنی با هوای محیط مخلوط شده بود.

خطر اصلی زمانی تشدید شد که شعله از طریق دهانه‌های باز یا مسیرهای انتشار بخار به فضای بخار داخل مخزن راه یافت. درون مخزن، مخلوط بخار و هوا می‌توانست در محدوده قابل‌اشتعال قرار داشته باشد. احتراق سریع این مخلوط، افزایش

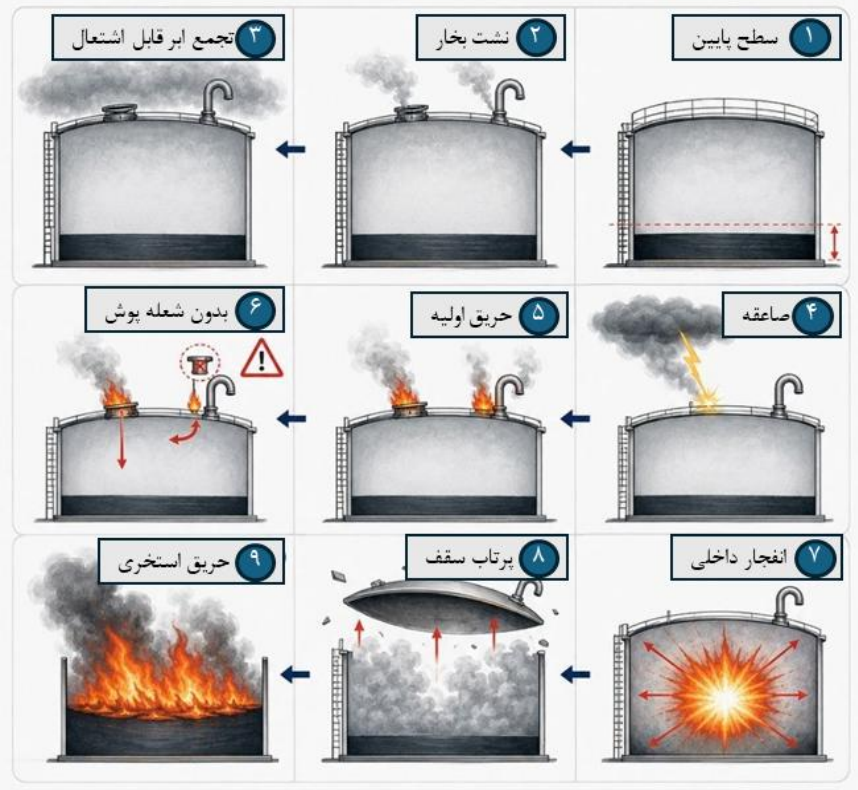
[1] Fixed-Roof Atmospheric Storage Tank
[2] Gooseneck Vents
[3] Pool Fire
[4] Flammability Range

ناگهانی فشار در فضای بخار را به دنبال داشت. فشار حاصل از این رویداد، از ظرفیت سازه‌ای سقف فراتر رفت و موجب جداشدن و پرتاب‌شدن سقف مخزن شد.

پس از جدا شدن سقف، سطح وسیعی از نفت خام مستقیماً در معرض هوا قرار گرفت. آتش کوچک و موضعی اولیه، اکنون به حریق استخری تبدیل شده بود؛ حریقی که سطح مایع سوخت را دربر می‌گیرد و در صورت نبود مهار مؤثر، می‌تواند تا کاهش سطح مایع، تخلیه محتویات یا کنترل کامل عملیات اطفا ادامه یابد.

این سناریو یادآور یک واقعیت مهم در ایمنی فرایند است: خطر تنها در حجم مایع ذخیره‌شده نیست. در یک مخزن با سقف ثابت، فضای بخار نیز بخشی از سامانه فرایندی است و در صورت وجود سوخت، هوا و منبع اشتعال، می‌تواند به محل آغاز یک حادثه[1] بزرگ تبدیل شود.

در این رویداد، نفت خام و بخارات آن مخاطره[2] بودند؛ اما مخاطره زمانی به حادثه تبدیل شد که چند شرط هم‌زمان برقرار شد: تشکیل مخلوط بخار و هوا در محدوده اشتعال، وجود مسیرهای انتشار بخار، و فراهم‌شدن منبع اشتعال ناشی از صاعقه. شکل (۱-۱) سناریوی کامل رویداد و توالی مراحل وقوع آن را نشان می‌دهد.



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

[1] Incident
[2] Hazard

۱-۲- تجهیزات و سیستم‌های مرتبط

در این حادثه، وقوع صاعقه در حضور بخارات قابل اشتعال در اطراف مخزن، باعث ایجاد آتش‌سوزی اولیه شد و در پی آن حریق موضعی با نفوذ با داخل مخزن باعث انفجار و ایجاد حرق گسترده شد. در این رویداد، چند تجهیز ایمنی نصب‌شده بر روی مخزن می‌توانست از ورود شعله به داخل تجهیزات پیشگیری کند، یا برخی تجهیزات فشار مخزن را در شرایط عادی کنترل کند و یا برخی دیگر احتمال ایجاد منبع اشتعال یا انتشار بخار را کاهش دهند.

❖ شعله‌پوش[1]

شعله‌پوش یکی از مهم‌ترین تجهیزات ایمنی نصب‌شده در مسیر ونت مخازن حاوی بخارات قابل‌اشتعال است. این تجهیز از مجموعه‌ای از صفحات یا المان‌های فلزی با مجاری بسیار ریز تشکیل شده که هنگام عبور جبهه شعله، گرمای آن را جذب و به بدنه فلزی منتقل می‌کنند. در نتیجه، دمای مخلوط سوخت و هوا تا حدی کاهش می‌یابد که ادامه احتراق امکان‌پذیر نباشد. وظیفه اصلی شعله‌گیر، جلوگیری از بازگشت شعله از محیط بیرون به فضای بخار مخزن است. بنابراین، اگر بخار منتشرشده در اطراف ونت مشتعل شود، شعله‌گیر مناسب و سالم می‌توانست مانع انتقال جبهه شعله به داخل مخزن شود. با این حال باید توجه داشت اثربخشی این تجهیز به انتخاب صحیح نوع شعله‌گیر، نصب درست، بازرسی دوره‌ای[2] و اطمینان از مسدودنبودن المان آن وابسته است. شکل (۱-۲)، اجزای اصلی شعله‌گیر و سازوکار جلوگیری از عبور و بازگشت شعله در مسیر ونت مخزن را نشان می‌دهد.



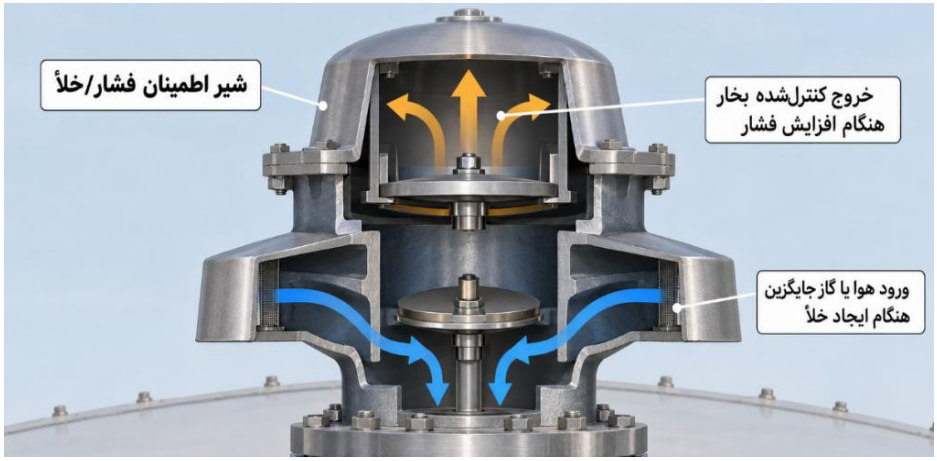
شکل (۱-۲) اجزای اصلی شعله‌پوش و سازوکار جلوگیری از عبور و بازگشت شعله در مسیر ونت مخزن

❖ شیر اطمینان فشار/خلأ[3]

[1] Flame Arrester
[2] Periodic Inspection
[3] Pressure/Vacuum Relief Valve - PVRV

شیر اطمینان فشار/خلأ برای حفظ فشار داخلی مخزن در محدوده طراحی به کار می‌رود. این تجهیز هنگام افزایش فشار داخلی، این شیر امکان خروج کنترل‌شده بخار را فراهم می‌کند و هنگام ایجاد خلأ، اجازه ورود هوا یا گاز جایگزین را می‌دهد تا از آسیب‌های سازه‌ای به مخزن جلوگیری شود. نقش اصلی PVRV ، کنترل فشارهای ناشی از شرایط عادی بهره‌برداری است؛ مانند پر و خالی‌شدن مخزن، تغییر دمای محیط و تبخیر محتویات. این تجهیز می‌تواند انتشار بخار را از مسیر طراحی‌شده و در فشار تنظیم‌شده هدایت کند، اما معمولاً برای رهاسازی فشار ناگهانی ناشی از احتراق سریع فضای بخار طراحی نشده است. بنابراین،PVRV نباید جایگزین شعله‌گیر، حفاظت در برابر صاعقه یا سامانه تخلیه اضطراری فشار تلقی شود. هر یک از این موانع، وظیفه‌ای متفاوت در کنترل خطر دارند.

در این رویداد، وجود و عملکرد صحیح PVRV می‌توانست با کنترل فشار فضای بخار، جلوگیری از افزایش فشار غیرمجاز و کاهش احتمال خروج ناگهانی بخارات قابل اشتعال از مسیرهای نامناسب، نقش مهمی در پیشگیری از وقوع حادثه داشته باشد. شکل (۱-۳) نشان‌دهنده شماتیک PVRV، اجزای اصلی آن و نحوه عملکرد تجهیز در شرایط افزایش فشار و ایجاد خلأ است.



شکل (۱-۳) شماتیک شیر اطمینان فشار/خلأ، اجزای اصلی آن و نحوه عملکرد تجهیز در شرایط افزایش فشار و ایجاد خلأ

۱-۳- پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی

در این حادثه وجود بخارات هیدروکربنی، اختلاط آن‌ها با هوا در محدوده قابل‌اشتعال و حضور یک منبع اشتعال پرانرژی سه شرط اساسی و اصلی در شکل‌گیری این رویداد بودند. درک رفتار بخار نفت خام و نحوه تشکیل اتمسفر قابل‌اشتعال، برای تحلیل دقیق این سناریو ضروری است.

- تشکیل فضای بخار[1]

[1] Vapor Space

در زمان وقوع رویداد، ارتفاع نفت خام داخل مخزن حدود ۱/۹ متر بود؛ بنابراین بخش عمده حجم داخلی مخزن را فضای بالای مایع تشکیل می‌داد، که به آن فضای بخارگفته می‌شود، محل تجمع بخاراتی است که از سطح نفت خام تبخیر می‌شوند. در شرایط تعادل بخار-مایع[۱]، مولکول‌های سبک هیدروکربنی به طور پیوسته از سطح مایع تبخیر شده و هم‌زمان بخشی از بخارات نیز مجدداً میعان می‌شوند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که فشار جزئی بخارات هیدروکربنی با فشار بخار تعادلی[۲] در آن دما برابر شود. بزرگ‌بودن فضای بخار به‌تنهایی به معنای تشکیل مخلوط قابل‌اشتعال نیست؛ اما حجم بیشتری برای حضور بخارات در اختیار قرار می‌دهد. خطر زمانی افزایش می‌یابد که هوا وارد این فضا شود یا بخارات خروجی در بیرون مخزن با هوا مخلوط شوند. در این حالت، به‌ویژه در اطراف ونت‌ها و دریچه‌های باز، ممکن است نواحی با غلظت قابل‌اشتعال شکل بگیرد.

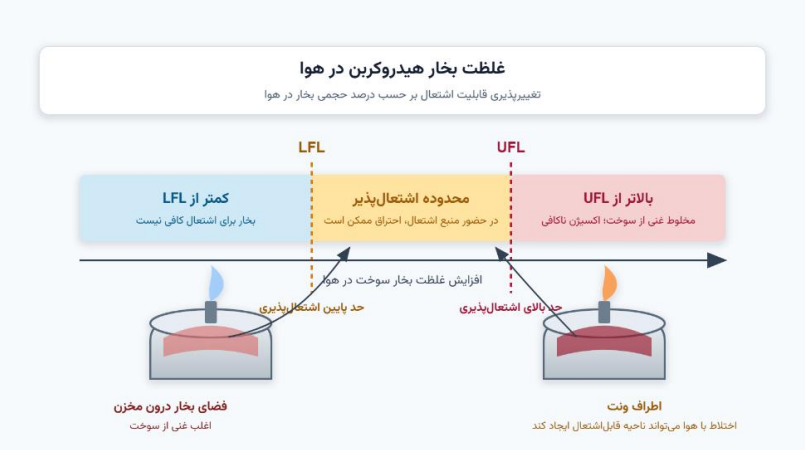
❖ محدوده اشتعال‌پذیری

بخار هیدروکربنی تنها در محدوده مشخصی از غلظت در هوا قابلیت اشتعال دارد. این محدوده با حد پایین اشتعال‌پذیری[۳] و حد بالای اشتعال‌پذیری[۴] تعریف می‌شود. در کاربردهای صنعتی و سامانه‌های آشکارساز گاز، از اصطلاح‌های حد پایین انفجار[5] و حد بالای انفجار[۶] نیز استفاده می‌شود. این اصطلاح‌ها، در کاربرد متداول، به همان حدود غلظت اشاره دارند. در حقیقت LEL و LEL (همچنین UFL وUEL) از نظر عددی یکسان هستند و تفاوت آن‌ها تنها در کاربرد اصطلاحات است؛ در مباحث علمی احتراق معمولاً از واژه «حد اشتعال»[۷] و در سیستم‌های آشکارساز گاز و کاربردهای صنعتی از واژه «حد انفجار»[۸] استفاده می‌شود. اگر غلظت بخار کمتر از LFL باشد، مخلوط بیش از حد رقیق است و احتراق رخ نمی‌دهد .اگر غلظت ازUFL بیشتر باشد، اکسیژن کافی برای ادامه احتراق وجود نخواهد داشت. در شکل (۱-۴) نواحی رقیق، قابل‌اشتعال و غنی از سوخت را بر اساس غلظت بخار هیدروکربنی در هوا نشان می‌دهد.

به عنوان مثال، متان دارای محدوده اشتعال حدود ۵ تا ۱۵ درصد حجمی در هوا است؛ یعنی اگر غلظت متان در مخلوط هوا_متان کمتر از ۵ درصد باشد، سوخت کافی برای احتراق وجود ندارد و اگر بیشتر از ۱۵ درصد باشد، اکسیژن کافی برای ادامه احتراق وجود نخواهد داشت. اما در بازه بین این دو مقدار، حضور یک منبع اشتعال مانند صاعقه میتواند موجب شروع حریق یا انفجار شود.

[1] Vapor-Liquid Equilibrium
[2] Equilibrium Vapor Pressure
[3] Lower Flammable Limit - LFL
[4] Upper Flammable Limit - UFL
[5] Lower Explosive Limit - LEL
[6] Upper Explosive Limit - UEL
[7] Flammability Limit - FL
[8] Explosive Limit - EL

در این رویداد، بخارات خارج‌شده از ونت پس از اختلاط با هوا، در محدوده قابل اشتعال قرار گرفتند و صاعقه انرژی لازم برای آغاز احتراق را فراهم کرد.



شکل (۱-۴) نواحی رقیق، قابل‌اشتعال و غنی از سوخت را بر اساس غلظت بخار هیدروکربنی

برای اشتعال بخارات بسیاری از هیدروکربن‌ها، انرژی بسیار کمی کافی است. این حداقل انرژی لازم برای آغاز احتراق، «حداقل انرژی اشتعال[1]» نام دارد و مقدار آن به نوع و ترکیب بخار، غلظت آن در هوا، دما، فشار و شرایط آزمون وابسته است .

صاعقه یک تخلیه الکتریکی بسیار پرانرژی است که می‌تواند جریان‌های بسیار بالا، دمای موضعی شدید و جرقه یا قوس الکتریکی ایجاد کند. انرژی آزادشده در یک صاعقه می‌تواند به ده‌ها تا صدها مگاژول برسد و جریان آن نیز به ده‌ها هزار آمپر برسد؛ به همین دلیل، صاعقه یکی از قوی‌ترین منابع اشتعال در صنایع فرایندی محسوب می‌شود و در صورت حضور مخلوط قابل اشتعال، احتمال آغاز احتراق بسیار زیاد خواهد بود.

۱-۴-تحلیل پاپیونی[2]

در این تحلیل، «اشتعال بخارات هیدروکربنی» به‌عنوان رویداد مرکزی انتخاب شده است. این رویداد، نقطه اتصال میان عوامل و شرایطی است که پیش از اشتعال وجود داشته‌اند و پیامدهایی که پس از آن گسترش یافته‌اند.

پیش از این رویداد، مجموعه‌ای از تهدیدها و شرایط خطرناک وجود داشت؛ انتشار بخارات هیدروکربنی از ونت‌ها و محل دیپ‌زنی فاقد درپوش، اختلاط این بخارات با هوای محیط و تشکیل مخلوط در محدوده اشتعال‌پذیری، برخورد مستقیم یا غیرمستقیم صاعقه و احتمال ایجاد جرقه ناشی از اختلاف پتانسیل الکتریکی ناخواسته، اتصال زمین ناموثر یا تخلیه الکتریسیته ساکن. برای کنترل این تهدیدها، موانعی مانند کنترل انتشار بخار، اتصال زمین مناسب، حفاظت در برابر صاعقه، بازرسی تجهیزات الکتریکی و حذف منابع بالقوه اشتعال باید وجود داشته و مؤثر باشند.

[1] Minimum Ignition Energy – MIE

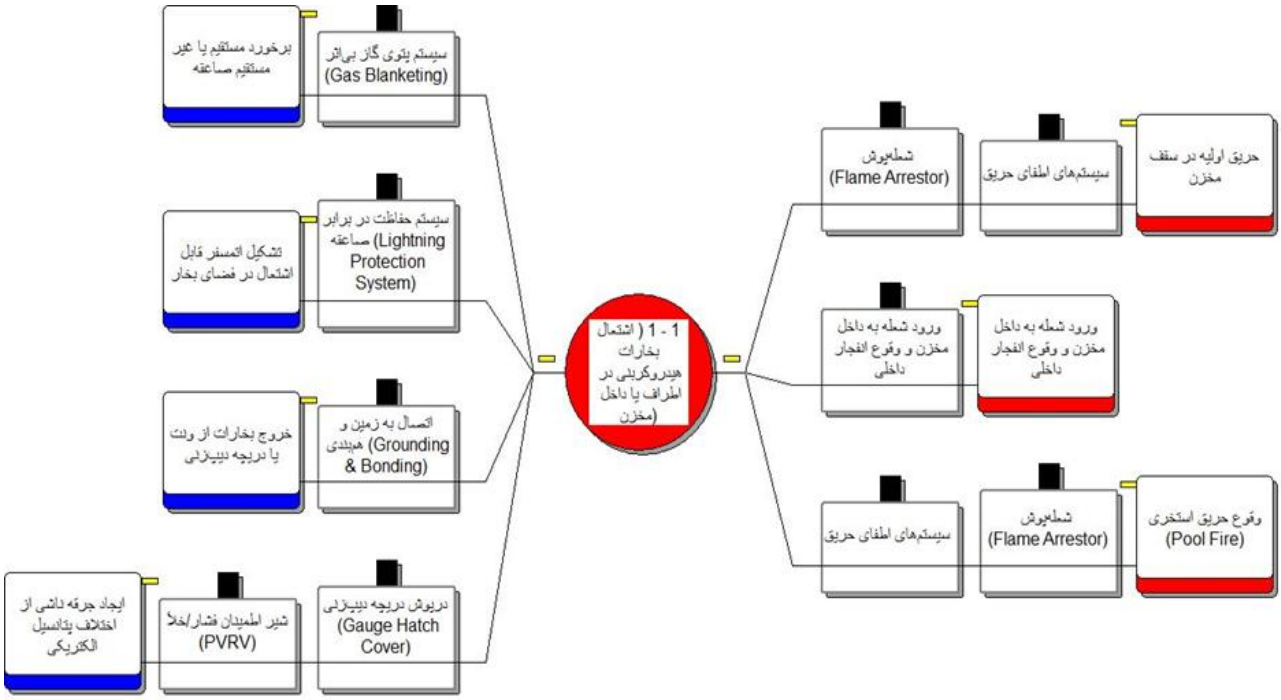
[2] پیش از مطالعه این بخش، برای آشنایی بیشتر با روش تحلیل پاپیونی، به بخش ابتدایی کتابچه مراجعه کنید.

پس از اشتعال بخارات، حادثه می‌تواند از یک حریق موضعی در اطراف ونت‌ها، دریچه دیپ‌زنی یا سطح سقف مخزن آغاز شود. اگر شعله‌گیر مناسب و سالم در مسیر ونت وجود نداشته باشد یا عملکرد آن مؤثر نباشد، جبهه شعله ممکن است به فضای بخار داخل مخزن بازگردد. احتراق سریع مخلوط بخار و هوا در این فضای محدود، فشار داخلی را به‌طور ناگهانی افزایش می‌دهد و می‌تواند به جداشدن یا پرتاب‌شدن سقف مخزن منجر شود. با برداشته‌شدن سقف، سطح نفت خام در تماس مستقیم با هوا قرار می‌گیرد و حریق موضعی اولیه به حریق استخری تبدیل می‌شود. در صورت ناکافی‌بودن فاصله‌گذاری، خنک‌کاری و سامانه‌های اطفای حریق، آتش می‌تواند به تجهیزات یا مخازن مجاور سرایت کند و اثرات دومینویی[1] ایجاد کند.

در سمت پیامدهای این تحلیل، شعله‌گیر، سامانه کشف حریق و گاز، اعلام حریق، سامانه فوم، خنک‌کاری مخازن مجاور، حوضچه محصورکننده و طرح واکنش اضطراری، موانع کاهنده پیامد به‌شمار می‌آیند. نکته اساسی این است که خروج بخار و تشکیل اتمسفر قابل‌اشتعال، پیامد حادثه نیستند؛ بلکه تهدیدها و شرایطی هستند که پیش از رویداد مرکزی شکل می‌گیرند. همچنین ورود شعله به مخزن، مرحله‌ای تشدیدکننده میان حریق اولیه و احتراق فضای بخار است؛ مرحله‌ای که عملکرد صحیح شعله‌گیر می‌تواند در متوقف‌کردن آن نقشی تعیین‌کننده داشته باشد.

در شکل (۱-۵)، شماتیک نمودار پاپیونی حادثه ارائه شده است. این نمودار با استفاده از نرم‌افزار Bow Tie Pro ترسیم شده است که ارتباط میان تهدیدها، رویداد مرکزی، پیامدهای بالقوه و موانع پیشگیرانه و کاهنده پیامد را به‌صورت یکپارچه نشان می‌دهد.

[1] Domino Effects



شکل (۱-۵) نمودار پاپیونی ترسیم شده با استفاده از نرم‌افزار Bow Tie Pro برای رویداد اول

۱-۵- لایه‌های حفاظت در برابر وقوع و گسترش حادثه

در ادامه، لایه‌های حفاظتی بیان شده در این تحلیل بررسی می‌شوند؛ لایه‌هایی که هر یک می‌توانند احتمال وقوع رویداد را کاهش دهند یا از گسترش پیامدهای آن جلوگیری کنند.

۱-۵-۱- لایه‌های حفاظتی پیشگیرانه

لایه‌های حفاظتی پیشگیرانه، مجموعه‌ای از تجهیزات، روش‌های عملیاتی و کنترل‌های مدیریتی‌اند که پیش از وقوع رویداد مرکزی وارد عمل می‌شوند. هدف آن‌ها جلوگیری از انتشار بخارات هیدروکربنی، تشکیل اتمسفر قابل‌اشتعال و فراهم‌شدن منبع اشتعال است؛ یعنی قطع زنجیره حادثه پیش از آن‌که به حریق یا انفجار منتهی شود.

- سیستم پتوی گاز بی‌اثر[1]

در این سیستم، فضای بخار بالای مایع با یک گاز بی‌اثر(معمولاً نیتروژن) پر می‌شود تا غلظت اکسیژن به کمتر از مقدار لازم برای احتراق برسد. در نتیجه، حتی در صورت تبخیر هیدروکربن‌ها، امکان تشکیل اتمسفر قابل اشتعال از بین می‌رود.

- سیستم حفاظت در برابر صاعقه[2]

[1] Gas Blanketing
[2] Lightning Protection System

این سامانه با استفاده از میله‌های صاعقه‌گیر[1]، هادی‌های میانی[2] و شبکه اتصال به زمین، مسیر کنترل‌شده‌ای با امپدانس پایین برای عبور جریان صاعقه فراهم می‌کند. در این شرایط، جریان بسیار بزرگ صاعقه به جای عبور از بدنه مخزن یا ایجاد قوس الکتریکی در نقاط حساس، مستقیماً به زمین هدایت می‌شود و احتمال ایجاد جرقه و اشتعال بخارات کاهش می‌یابد.

- اتصال به زمین و هم‌بندی[3]

هم‌بندی باعث می‌شود تمام اجزای فلزی مخزن و تجهیزات جانبی در یک پتانسیل الکتریکی قرار گیرند و اتصال به زمین نیز مسیر تخلیه ایمن بارهای الکتریکی را فراهم می‌کند. این دو اقدام از ایجاد تخلیه الکتریسیته ساکن و جرقه‌های ناخواسته جلوگیری می‌کنند.

- درپوش دریچه دیپ‌زنی[4]

دریچه‌های اندازه‌گیری سطح مایع باید همواره مجهز به درپوش بوده و در حالت عادی کاملاً بسته باشند.

- شیر اطمینان فشار/خلأ

شیر PVRV خروج بخارات را کنترل میکند و درنتیجه احتمال ایجاد اتمسفر قابل اشتعال در اطراف مخزن و بازگشت شعله به داخل مخزن را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

۱-۵-۲- لایه‌های حفاظتی کاهنده پیامد

لایه‌های حفاظتی کاهنده پیامد، پس از وقوع رویداد مرکزی وارد عمل می‌شوند تا دامنه و شدت پیامدهایی مانند حریق، انفجار، آسیب به افراد و سرایت حادثه به تجهیزات مجاور را محدود کنند.

- شعله‌پوش

شعله‌پوش با جذب حرارت جبهه شعله و کاهش دمای آن، از انتقال شعله به فضای بخار داخل مخزن جلوگیری می‌کند.

- سیستم های آشکارسازی و اطفای حریق

این سیستم‌ها در صورتی که به موقع عمل کنند پیامدهای رویداد را تامیزان قابل توجهی کاهش می‌دهند.

۱-۶- ارتباط رویداد با عناصر مدیریت ایمنی فرآیند

با تحلیل لایه‌های حفاظتی درمی‌یابیم آنچه در این میان برجسته است، نبود یا ناکارآمدی همین لایه‌های حفاظتی در مخزن است؛ وضعیتی که ریشه آن را باید در سیستم مدیریت ایمنی فرایند جست‌وجو کرد .در واقع، ضعف‌های مدیریتی

[1] Air Terminal
[2] Down Conductors
[3] Grounding & Bonding
[4] Gauge Hatch Cover

و سازمانی، سال‌ها پیش از وقوع رویداد، شرایطی را ایجاد کرده‌اند که نهایتا به بروز آن منجر شده است. بر این اساس، مهم‌ترین ضعف‌های مدیریتی و سازمانی مرتبط با این رویداد، مطابق جدول (۱-۱)، تحلیل می‌شوند.

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

شماره	عنوان المان	توضیحات مربوط به حادثه
۲	انطباق با استانداردها[1]	ایمنی یک مخزن از زمان شروع بهره‌برداری آغاز نمی‌شود؛ بلکه از نخستین روز طراحی تجهیز شکل می‌گیرد. رعایت استانداردهای فنی و ایمنی، یکی از مهم‌ترین الزامات مدیریت ایمنی فرایند است. در این رویداد، نبود تجهیزات و سایر لایه‌های حفاظتی نشان می‌دهد که الزامات استانداردهایی نظیر API Std 2000 ، API RP 2003، NFPA 69 و NFPA 780 به طور کامل در طراحی یا بهره‌برداری این مخزن رعایت نشده بودند. در بسیاری از صنایع، مخازنی که سال‌ها قبل طراحی شده‌اند، با وجود تغییر استانداردها، تغییر شرایط بهره‌برداری و افزایش شناخت از مخاطرات، همچنان بدون بازنگری اساسی در سرویس باقی می‌مانند. در چنین شرایطی، فاصله میان وضعیت موجود و الزامات روز، به تدریج به یک ریسک پنهان تبدیل می‌شود. بنابراین، انطباق با استانداردها تنها به زمان طراحی اولیه محدود نیست و باید در تمام طول چرخه عمر تجهیز، از طریق بازنگری، ارزیابی و به‌روزرسانی مستمر حفظ شود.
۷	شناسایی مخاطرات و تحلیل ریسک[2]	هدف از HIRA، شناسایی سناریوهای بالقوه و تعیین اقدامات کنترلی پیش از وقوع رویداد است؛ روش‌هایی مانند HAZOP ، What-If و Bow-Tie نیز با همین رویکرد به‌کار می‌روند. در صورتی که این فرآیند به‌صورت مؤثر و کامل انجام می‌شد، به احتمال زیاد مجموعه‌ای از مخاطرات، ضعف‌های کنترلی و انحرافات عملیاتی شناسایی می‌گردید و در پی آن، اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه مشخصی پیشنهاد می‌شد. با این حال، صرف انجام مطالعه HIRA برای کاهش ریسک کافی نیست؛ اثربخشی واقعی آن زمانی محقق می‌شود که نتایج مطالعه به اقدام تبدیل شده، مسئولیت‌ها تعیین، پیشرفت اقدامات پیگیری و در نهایت بسته شدن آن‌ها تضمین شود. در بسیاری از رویدادهای صنعتی، اگرچه مخاطرات شناسایی شده‌اند، اما ضعف اصلی در سطح مدیریتی و سازمانی، عدم پیگیری، تأخیر در اجرا و ناتمام ماندن اقدامات اصلاحی بوده است.

[1] Compliance with Standards
[2] Hazard Identification and Risk Analysis - HIRA

شماره و عنوان المان		توضیحات مربوط به حادثه
۸	دستورالعمل‌های بهره‌برداری[1]	یکی از نکات کلیدی این رویداد، باز بودن دریچه دیپ‌زنی بود؛ مسیری که امکان خروج بخارات قابل اشتعال را فراهم کرد. اگر دستورالعمل‌های بهره‌برداری، شرایط استفاده از این دریچه، نحوه اندازه‌گیری سطح مخزن و ممنوعیت باز ماندن آن را به‌صورت شفاف تعریف و کنترل می‌کردند، احتمال شکل‌گیری ابر بخار قابل اشتعال به میزان قابل توجهی کاهش می‌یافت.
۱۲	آموزش	وجود دستورالعمل، بدون آموزش مؤثر، تضمینی برای اجرای صحیح آن نیست. کارکنان باید بدانند که باز ماندن دریچه دیپ‌زنی صرفاً یک تخلف عملیاتی نیست؛ بلکه می‌تواند آغازگر زنجیره‌ای از رویدادها باشد که در نهایت به انفجار و آتش‌سوزی منجر شود. آموزش اثربخش زمانی محقق می‌شود که کارکنان علاوه بر نحوه انجام کار، علت وجود الزامات ایمنی و پیامدهای ناشی از عدم رعایت آن‌ها را نیز درک کنند.

[1] Operating Procedures

۱-۷- مراجع و منابع تخصصی ایمنی فرایند

سناریوی انفجار و آتش‌سوزی یک خط لوله انتقال گاز از جنبه‌های مختلف بررسی شد. تمامی مباحث مطرح‌شده بر پایه استانداردهای معتبر حوزه ایمنی فرایند، یکپارچگی خطوط لوله و کنترل خوردگی تدوین شده‌اند.

در جدول (۱-۲) ، مهم‌ترین منابع مورد استفاده ذکر شده‌است.

جدول (۱-۲) مهم‌ترین منابع مورد استفاده در تحلیل رویداد اول

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
API Std 2000 [1]	Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks	این استاندارد الزامات طراحی و ظرفیت‌گذاری سیستم‌های ونت، شیرهای فشار/خلأ و همچنین الزامات به‌کارگیری شعله‌پوش در کاربردهای مرتبط را برای مخازن اتمسفریک و کم‌فشار ارائه می‌کند. در این هفته، هنگام بررسی عملکردPVRV ، کنترل فشار فضای بخار و نقش شعله‌پوش در جلوگیری از بازگشت شعله، به این استاندارد استناد شده‌است
ISO 16852 [2]	Flame Arresters — Performance Requirements, Test Methods and Limits for Use	این استاندارد بین‌المللی الزامات عملکرد، روش‌های آزمون و محدوده کاربرد شعله‌پوش را تشریح می‌کند. در کنار API Std 2000، این استاندارد مبنای توضیح عملکرد شعله‌پوش و نقش آن در جلوگیری از فلش‌بک[1] و انتقال شعله به فضای بخار داخل مخزن بود.
API RP 2003 [3]	Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents	این استاندارد راهکارهای جلوگیری از ایجاد منابع اشتعال ناشی از صاعقه، الکتریسیته ساکن، جریان‌های سرگردان، هم‌بندی و اتصال به زمین تجهیزات را ارائه می‌کند. در تحلیل لایه‌های حفاظتی، طراحی و عملکرد سیستم حفاظت در برابر صاعقه و اتصال به زمین و هم‌بندی بر اساس الزامات این استاندارد بررسی شده‌است.

[1] Flashback

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
NFPA 780 [4]	Standard for the Installation of Lightning Protection Systems	این استاندارد الزامات طراحی، نصب، بازرسی و نگهداری سامانه‌های حفاظت در برابر صاعقه را تشریح می‌کند. در کنارAPI RP 2003 از این استاندارد برای تبیین اصول حفاظت مخازن در برابر صاعقه استفاده شده است.
NFPA 69 [5]	Standard on Explosion Prevention Systems	این استاندارد روش‌های جلوگیری از تشکیل اتمسفر قابل اشتعال و پیشگیری از انفجار را معرفی می‌کند. در این رویداد، هنگام بررسی سیستم پتوی گاز بی‌اثر توضیح داده شد که چگونه استفاده از گاز بی‌اثر(معمولاً نیتروژن) با کاهش غلظت اکسیژن، از تشکیل مخلوط قابل اشتعال در فضای بخار مخزن جلوگیری می‌کند.
ISO 31010 [6]	Risk Management-Risk Assessment Techniques	این استاندارد مجموعه‌ای از تکنیک‌های ارزیابی ریسک را معرفی می‌کند. در تحلیل روز چهارم، از روش Bow-Tie که یکی از تکنیک‌های معرفی‌شده در این استاندارد است، برای نمایش تهدیدها، رویداد مرکزی، لایه‌های حفاظتی و پیامدها استفاده شد.
Guidelines for Risk Based Process Safety (RBPS – CCPS) [7]	-	این کتاب یکی از معتبرترین مراجع مدیریت ایمنی فرایند در جهان به شمار می‌رود و چارچوب RBPS را بر پایه چهار رکن و بیست عنصر مدیریتی ارائه می‌کند. در تحلیل مدیریتی و سازمانی این هفته، عناصری مانند انطباق با استانداردها شناسایی مخاطرات و تحلیل ریسک، دستورالعمل‌های بهره‌برداری و آموزش در مبنای مفاهیم این کتاب بررسی شده‌اند تا نشان داده شود چگونه ضعف در سیستم مدیریت ایمنی فرایند، سال‌ها پیش از وقوع رویداد، زمینه شکل‌گیری آن را فراهم می‌کند.

۱-۸- 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 حادثه، کدام مشاهده بیش از همه نشان می‌دهد که خطر، مدت‌ها قبل از برخورد صاعقه ایجاد شده بود؟

الف) وقوع حریق روی سقف مخزن
ب) جدا شدن سقف مخزن پس از انفجار
ج) وجود بخارات هیدروکربنی در اطراف مخزن
د) ادامه حریق به صورت آتش استخری

۲- اگر مشخص شود مطالعه HIRA چند سال قبل انجام شده و خطر باز ماندن دریچه دیپ‌زنی نیز در آن شناسایی شده بود، محتمل‌ترین ضعف مدیریتی کدام است؟

الف) آموزش کارکنان انجام نشده است.
ب) استاندارد طراحی مخزن مناسب نبوده است.
ج) ظرفیت PVRV کمتر از مقدار موردنیاز بوده است.
د) اقدامات اصلاحی ناشی از HIRA به‌طور مؤثر اجرا و پیگیری نشده‌اند.

۳-فرض کنید قرار است فقط یک لایه حفاظتی پیشگیرانه به این مخزن اضافه شود. کدام انتخاب، وابستگی حادثه به وجود منبع اشتعال را از اساس کاهش می‌دهد؟

الف) نصب سیستم پتوی گاز بی‌اثر
ب) نصب صاعقه گیر
ج) نصب سیستم اطفای حریق خودکار
د) نصب شعله‌پوش

۴- در این رویداد اگر شعله‌پوش وجود داشت اما دریچه دیپ‌زنی همچنان باز می‌ماند، کدام تحلیل منطقی‌تر است؟

الف) رویدادی رخ نمیداد، زیرا شعله‌پوش از تمام مسیرهای انتقال شعله جلوگیری می‌کند.
ب) باز بودن دریچه دیپ‌زنی تنها بر فشار داخل مخزن اثر دارد.
ج) شعله از مسیر ونت وارد مخزن نمی‌شود، اما احتمال ورود از طریق دریچه باز و انفجار داخلی وجود دارد.
د) وجود شعله‌پوش باعث بی‌نیاز شدن مخزن از سایر لایه‌های حفاظتی می‌شود.

۵- کدام جمله، ریشه این حادثه را دقیق‌تر توصیف می‌کند؟ کدام جمله، ریشه این حادثه را دقیق‌تر توصیف می‌کند؟

الف) پایین بودن سطح مایع در مخزن و ایجاد فضای بخار عامل وقوع حادثه بود.

ب) نبود چند تجهیز ایمنی علت اصلی حادثه بود.

ج) شدت بالای انرژی صاعقه علت اصلی حادثه بود.

د) حادثه نتیجه هم‌زمان ضعف در طراحی، بهره‌برداری و مدیریت لایه‌های حفاظتی بود.

References:

[1] American Petroleum Institute. 2014. *Venting atmospheric and low-pressure storage tanks* (API Standard 2000, 7th edition).

[2] International Organization for Standardization. 2016. *Flame arresters – Performance requirements, test methods and limits for use* (ISO 16852, 2nd edition).

[3] International Electrotechnical Commission. 2019. *Risk management - Risk assessment techniques* (IEC 31010, 2nd edition).

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

[5] National Fire Protection Association. 2020. *Standard for the Installation of Lightning Protection Systems* (NFPA 780).

[6] American Petroleum Institute. 2015. *Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents* (API Recommended Practice 2003, 8th edition).

[7] Center for Chemical Process Safety, CCPS. (2007). *Guidelines for Risk Based Process Safety*. John Wiley & Sons