

ارزیابی عوامل مؤثر بر انفجار ناشی از سوخت گاز دیگ‌های بخار لوله آتشی

دکتر حسن اصیلان*، امیر ولدخانی**، دکتر سید باقر مرتضوی*، محمد سالم***، دکتر علی خوانین*

Assessment of factors associated with explosion of gas-fuel in fire-tube boilers

H Asilian* A Valadkhani S.B Mortazavi M Salem A Khavanin

دریافت: ۸۴/۳/۳۰ پذیرش: ۸۵/۲/۲۰

*Abstract

Background: There are many factors with different degrees of importance in explosion of fire-tube boilers and hence, reorganization, assessment and ranking of such factors by an accurate analytical method could be used as a guideline for experts related to safety programs.

Objective: This study was planned to determine all effectual factors associated with explosion of oil fuel, the probability of occurrence in a specific area of industry, and also ranking of basic events.

Methods: Fault tree analysis method was used in studying four fire-tube boilers located in one of the factories of Alborz Industrial City (Qazvin, Iran) to determine the effective events for occurring expected explosion accident and also to show their association. All basic events were further ranked by qualitative method.

Findings: Developed fault tree showed 76 events which were connected through 42 logical gates. There were 36 basic events ranked in 11 levels according to their qualitative importance.

Conclusion: Ranking of basic events showed that the human error factor (in management planning level) has the highest order among the factors with potential to cause boiler explosion.

Keywords: Industrial Safety, Explosion, Boiler, Fault Tree Analysis

* چکیده

زمینه: عوامل متعددی در انفجار دیگ‌های بخار لوله آتشی مؤثرند که شناسایی، ارزیابی و رتبه‌بندی آنها با استفاده از یک روش تجزیه و تحلیل دقیق می‌تواند راهنمای کارشناسان مجری برنامه‌های ایمنی باشد.

هدف: مطالعه برای تعیین عوامل مؤثر در وقوع انفجار ناشی از سوخت، تعیین احتمال وقوع آن و رتبه‌بندی رویدادهای پایه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه با استفاده از روش تجزیه و تحلیل درخت خطا در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در شهر صنعتی البرز قزوین انجام شد. برای تعیین عوامل مؤثر بر وقوع انفجار در دیگ‌های بخار لوله آتشی و نمایش ارتباط این عوامل با یکدیگر، ۴ دستگاه دیگ بخار لوله آتشی در کارخانه‌های شرکت گلوکوزان مطالعه و تمام رویدادهای اولیه به روش کیفی رتبه‌بندی شدند.

یافته‌ها: بسط درخت خطا ۷۶ رویداد مرتبط را نشان داد که با ۴۲ دروازه منطقی به یکدیگر متصل می‌شدند، از این تعداد ۳۶ رویداد از نوع اولیه بودند که در ۱۱ سطح به ترتیب اهمیت به روش کیفی رتبه‌بندی شد.

نتیجه‌گیری: رتبه‌بندی رویدادهای اولیه نشان داد که عامل خطای انسانی (در سطح برنامه ریزی مدیریتی) بالاترین رتبه را در بین عوامل منجر به وقوع انفجار در دیگ‌های بخار دارد.

کلیدواژه‌ها: ایمنی صنعتی، انفجار، دیگ بخار، تجزیه و تحلیل درخت خطا

** کارشناس ارشد بهداشت حرفه‌ای

* استادیار گروه بهداشت حرفه‌ای دانشگاه تربیت مدرس

*** مربی بهداشت حرفه‌ای و عضو هیأت علمی دانشگاه بقیه‌الله

آدرس مکاتبه: تهران، بزرگراه جلال آل احمد، پل نصر (پل گیشا)، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، گروه بهداشت حرفه‌ای

✉E.mail: Asilianm@yahoo.com

*** مقدمه :**

امروزه دیگ‌های بخار (در نیروگاه‌ها، نوشابه‌سازی‌ها، مدارس یا منازل) از ضروریات زندگی روزمره محسوب می‌شوند. گسترش روز افزون دیگ‌های بخار در قرن گذشته و جای‌گزینی دیگ‌های کم فشار با دیگ‌های با فشار بسیار بالاتر با انفجارهای مصیبت‌باری همراه بوده که تلفات و ضایعه‌های شدیدی به بار آورده است.^(۱)

دیگ بخار همانند سایر ظروف تحت فشار در معرض احتمال انفجار ناشی از فشار داخلی است و چون بعضی از اجزای آن در معرض حرارت شدید و در نتیجه افزایش تنش و خوردگی قرار دارند، کیفیت ساختاری آن (از لحاظ تاثیر و محاسبه سایر عوامل مؤثر در طراحی و نگه‌داری دیگ بخارها نسبت به سایر ظروف تحت فشار) پیچیده‌تر شده و ضوابط خاصی را می‌طلبد.^(۲) به علاوه احتمال دارد حادثه انفجار در دیگ بخارها در اثر تجمع سوخت در قسمت سوخت‌رسانی ایجاد شود.^(۳) در این حالت یک مخلوط سوخت و هوای قابل انفجار تجمع یافته به طور ناگهانی مشتعل شده و نیرویی ایجاد می‌کند که از توان مقاومت کوره، پوشش یا دودکش دیگ بخار تجاوز کرده و باعث آسیب ساختمانی آن می‌شود. در دیگ بخارهای گاز سوز به علت افزایش مراقبت‌های فنی اغلب با کاهش انفجار ناشی از فشار بخار داخلی، بیش‌تر شاهد انفجار ناشی از تجمع و احتراق ناگهانی سوخت هستیم.

با توجه به پی‌آمد و خسارت‌های مهم مالی و انسانی ناشی از انفجار در محیط‌های صنعتی، این مطالعه به منظور تعیین عوامل مؤثر بر وقوع انفجار ناشی از سوخت، تعیین احتمال وقوع و رتبه بندی رویدادهای پایه‌ای انجام شد.

*** مواد و روش‌ها :**

این تحقیق در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ انجام و از روش تجزیه و تحلیل درخت خطا (FTA) برای ارزیابی خطر انفجار در دیگ بخارهای کارخانه‌های شرکت گلوکوزان واقع در شهر صنعتی البرز قزوین استفاده شد.

روش درخت خطا به ویژه در سیستم‌های پیچیده و دقیق کاربرد داشته و نموداری منطقی از ترکیب وقایعی است که قبل از بروز حادثه وجود دارند.^(۴)

اهداف اصلی این روش در پنج مورد خلاصه می‌شود :

۱) فعالانه و به روش قیاسی (از کل به جزء) حالت‌های نقص را جستجو می‌کند،

۲) چگونگی نقص عملکرد سیستم را به صورت تصویری نمایش می‌دهد،

۳) جنبه‌های بحرانی سیستم را نشان می‌دهد،

۴) مرجعی برای ارزیابی اصلاحات سیستم فراهم می‌آورد،

۵. مبنایی سیستماتیک برای تجزیه و تحلیل‌های کمی ایجاد می‌کند.^(۵)

در این روش، رویداد اصلی (نقص یا حادثه‌ای که باید تجزیه و تحلیل شود) در بالای درخت خطا قرار می‌گیرد. درخت خطا شامل پی‌آمد رویدادهایی است که به نقص سیستم یا حادثه منجر می‌شوند. توالی رویدادها به وسیله دروازه‌های منطقی «و»، «یا» یا سایر انواع دروازه‌ها بیان می‌شود. رویدادهای بالای دروازه‌ها و تمام رویدادهایی که بیش از یک علت پایه دارند با یک مستطیل مشخص می‌شوند و رویداد مورد نظر در این مستطیل شرح داده می‌شود. در نهایت توالی رویدادها به یک علت اولیه ختم می‌شود که اطلاعات مربوط به نقص آن را می‌توان به دست آورد. این علل پایه‌ای با دایره نشان داده می‌شوند و بیان‌گر حد تفکیک درخت خطا هستند. در صورتی که بسط رویدادی خارج از اهداف مطالعه باشد یا اطلاعات لازم در دسترس نباشد تحت عنوان «رویداد بسط نیافته» با علامت لوزی نمایش داده می‌شود. رویدادهایی که نقص محسوب نمی‌شوند با علامت پنج ضلعی، با عنوان «رویداد خانه‌ای» و با احتمال صفر یا یک نمایش داده می‌شوند.^(۶)

این تحقیق در چهار مرحله انجام شد :

مرحله اول بسط منطقی درخت خطا بود که بر اساس اطلاعات سخت‌افزاری، کاربری، شرح وظایف، شرایط معمول کاری و شرایط ویژه انجام شد. سپس درخت خطای حاصله از نظر مستقل بودن رویدادهای اولیه و عدم هم‌پوشانی آنها، عدم تکرار و احتمال ارتقای

رویداد یک فرض شده و دوباره احتمال رویداد کل محاسبه می‌شود؛ تفاضل این دو عدد عامل Birnboum است. این عمل برای تمام رویدادها تکرار و اعداد حاصله بر حسب درصد به شکل نزولی مرتب می‌شوند. در این روش رویدادهایی که بالاتر قرار دارند از درجه اهمیت بیش‌تری برخوردارند.^(۴)

* یافته‌ها :

درخت خطای بسط یافته نهایی دارای ۷۶ رویداد (اعم از نهایی، میانی و اولیه) بود که با ۴۲ دروازه منطقی به یکدیگر متصل شدند. تعداد رویدادهای اولیه این درخت ۳۶ مورد بود.

تمام برش‌ها فاقد رویدادهای تکراری، بدون وجود برش‌های تکراری و فاقد برش‌های همانند بزرگ‌تر بوده و در نتیجه همه آنها برش حداقل بودند. کوتاه‌ترین برش‌ها با تعداد چهار رویداد (بدون احتساب رویداد خانه‌ای) مربوط به شاخه رویداد میانی «آزاد شدن ناگهانی مقادیر زیادی گاز در حین روشن کردن» بود که تعداد برش‌های این شاخه ۱۲ مورد بود. سایر برش‌ها مربوط به شاخه میانی «تجمع گاز در حین توقف» بود که هر یک از این برش‌ها شامل ۱۱ تا ۱۳ رویداد اولیه (بدون احتساب رویداد وجود اکسیژن کافی) بودند.

کمیت نمایی، وارد کردن احتمال‌های وقوع یا مقادیر نقص رویدادهای اولیه در برش‌ها و جمع تمام احتمال‌های مربوط نشان داد که احتمال انفجار مورد نظر طی یک سال $2/8 \times 10^{-2}$ مرتبه یا یک انفجار در هر ۳۵/۷ سال است.

با توجه به تأثیر زیادی که شاخه «آزاد شدن ناگهانی مقادیر زیادی گاز در حین روشن کردن» در احتمال وقوع کل دارد، امکان رتبه‌بندی کمی به روش عامل Birnboum برای تمام رویدادها وجود نداشت. این امر به علت ناتوانی رویدادهای شاخه دیگر در ایجاد تغییر محسوس در حین محاسبه بود، زیرا برش‌های مربوط به

رویدادهای تکراری به رویدادهای میانی کنترل و اصلاح شد.^(۴)

مرحله دوم تعیین برش‌های حداقل بود که بر مبنای شماره رویدادها از رویداد نهایی شروع و با رسیدن به رویدادهای اولیه خاتمه می‌یافت. بدین ترتیب تمام ترکیب‌های ممکن رویدادهای اولیه که وجود آنها برای وقوع رویداد نهایی لازم است شناسایی و سپس از نظر وجود برش‌های تکراری و برش‌های مشابه بزرگ‌تر (super cut set) کنترل شد.^(۴)

در مرحله سوم (کمیت نمایی) بر اساس سوابق موجود در کارخانه (مطالعه دفاتر و گزارش‌ها)، نظرات کارشناسی (مصاحبه با افراد دارای سابقه کار مرتبط شامل کاربرها، کارکنان فنی و سرپرستی) و اطلاعات عمومی موجود در منابع اطلاعاتی (کتب و پایگاه‌های نشان دهنده احتمال وقوع نقص اجزای سخت افزاری یا بروز خطای انسانی)، میزان نقص و احتمال وقوع رویدادهای اولیه تعیین شد. سپس با وارد کردن مقادیر حاصله در برش‌ها، احتمال وقوع آنها محاسبه و با جمع تمام احتمال‌های حاصله، احتمال وقوع رویداد نهایی محاسبه شد.^(۴و۶)

مرحله چهارم رتبه‌بندی رویدادهای اولیه بود. در روش کیفی رتبه‌بندی رویدادهای اولیه، برشی که از رویدادهای کمتری تشکیل شده است، رویدادهای آن در رتبه بندی رویدادها جایگاه و اهمیت بالاتری دارند و در صورتی که برش‌هایی با تعداد رویدادهای برابر داشته باشیم، رویدادی که در برش‌های بیشتری وجود دارد دارای رتبه بالاتری است.^(۴و۶)

برای رتبه‌بندی کمی رویدادهای اولیه روش‌های متعددی وجود دارد که با وجود نتایج تقریباً مشابه هر کدام کاربرد خاصی دارند. در این تحقیق برای رتبه‌بندی کمی از روش عامل Birnboum استفاده شد که در موارد اخذ تصمیم‌های مربوط به نگهداری و تعیین تقدم برای چاره‌اندیشی پیش از وقوع مناسب است. در این روش ابتدا احتمال هر رویداد صفر فرض شده و بر اساس آن احتمال کل محاسبه می‌شود و سپس احتمال همان

هستند و با دروازه «یا» به هم مرتبط می‌شوند و مستقل بودن رویدادها باعث ایجاد برش‌های کوتاه‌تری می‌شود که احتمال وقوع آنها را بیش‌تر می‌کند این امر می‌تواند به علت عدم وجود ابزارهای کنترلی مکمل، عدم توجیح کارکنان فنی در حفظ ابزارهای کنترلی و اهمال مسؤولین در ایجاد یک برنامه دقیق کنترلی (PM) باشد. البته خطر انفجار ناشی از تحقق شاخه اول به خاطر خفیف‌تر بودن اثرات متعاقب انفجار، به مراتب کم‌تر و وقوع آن تدریجی است و با تعمیرات پیشگیرانه (PM) می‌توان از وقوع آن جلوگیری کرد. به نظر می‌رسد مهم‌ترین رویداد در تکمیل عوامل این شاخه، در مرحله اول عدم وجود برنامه تعمیرات پیشگیرانه باشد.

در شاخه رویداد میانی دوم «تجمع گاز در حین توقف» ابزارهای کنترلی به مراتب بیش‌تر هستند و به علت ارتباط این عوامل با یکدیگر، برش‌های طولانی‌تری ایجاد می‌کنند که احتمال وقوع آن را کاهش می‌دهد. عامل منبع گرمایی جهت تحقق انفجار در اثر وقوع هر دو رویداد یکسان است و می‌توان در بررسی علل انفجار فقط بر روی عوامل رها سازی گاز در محفظه کوره تمرکز نمود.

در این مطالعه رتبه‌بندی کیفی رویدادهای اولیه نشان داد که دو عامل در رتبه اول قرار دارند؛ یک عامل «ایجاد جرقه جهت روشن کردن پیلوت» که یک رویداد خانه‌ای است و در برنامه کنترلی نمی‌توان آن را منظور نمود و دیگری «نبود برنامه PM مناسب جهت سیستم تنظیم و کنترل گاز و هوا» که مهم‌ترین عامل بروز انفجار به شکل اول است. همین عامل در رتبه چهارم به بعد که مربوط به انفجار حالت دوم است، به چشم می‌خورد و عوامل ۲ و ۱۹ به ترتیب «عدم وجود برنامه PM مناسب جهت کنترل شیرهای برقی و ابزارهای کنترلی» و «عدم وجود برنامه PM مناسب جهت سیستم دمنده» هستند. ایجاد برنامه تعمیرات پیشگیرانه مناسب از وظایف مدیریتی هستند و نبود آن نوعی خطای انسانی محسوب می‌شود. رتبه دوم مربوط به یک عامل خطای

این شاخه طولانی‌تر بود (یکی از فواید ایجاد سیستم‌های کنترلی متعدد همان‌گونه که در این دیگ بخارها ملاحظه می‌شود ایجاد برش‌هایی با رویدادهای تشکیل دهنده بیش‌تر است که نتیجه آن احتمال وقوع کم‌تر این برش‌ها و به تبع آن احتمال وقوع کم‌تر وقوع رویداد اصلی است) و به عبارتی وقوع قطعی (احتمال نقص، یک فرض می‌شود) یا عدم وقوع قطعی (احتمال نقص، صفر فرض می‌شود) هر یک از آنها به تنهایی تأثیر محسوسی در وقوع رویداد اصلی نداشته و به همین علت، فقط رویدادهای همین شاخه که شامل رویدادهای ۲۸ تا ۳۶ بودند تجزیه و تحلیل شدند که از مدار خارج شدن حس‌گر توسط کارکنان فنی از اهمیت بیش‌تری برخوردار بود (جدول شماره ۱).

جدول ۱- رتبه‌بندی کمی رویدادهای ۲۸ تا ۳۶

رتبه	شماره رویداد	عنوان رویداد	عامل B	درصد اهمیت
۱	۳۴	از مدار خارج شدن حس‌گر توسط کارکنان فنی	۰،۱۶۹	۱۳،۷۵۰
۲	۳۱	کج شدن پرها	۰،۱۶۹	۱۳،۷۲۶
۲=	۳۶	شکستن یکی از میله‌های رابط	۰،۱۶۹	۱۳،۷۲۶
۳	۳۵	شل شدن اتصالات	۰،۱۶۹	۱۳،۷۰۱
۴	۳۲	خوردگی در پرها	۰،۱۶۸	۱۳،۶۸۵
۴=	۳۳	خرابی سنسور	۰،۱۶۸	۱۳،۶۸۵
۵	۲۹	خرابی سیستم‌های ابزار دقیق	۰،۰۸۲	۶،۶۳۱
۶	۲۸	اشتباه کاربر در راه‌اندازی (اصرار در روشن کردن)	۰،۰۸۲	۶،۶۲۸
۷	۳۰	نبود برنامه PM مناسب جهت سیستم تنظیم و کنترل گاز و هوا	۰،۰۵۵	۴،۴۶۹
		جمع	#####	۱۰۰/۰۰۰

* بحث و نتیجه‌گیری :

این مطالعه نشان داد که احتمال وقوع انفجار در شاخه «آزاد شدن ناگهانی مقادیر زیادی گاز در حین عملیات روشن کردن» بسیار بیش‌تر از شاخه «تجمع گاز در حین توقف» است. احتمال وقوع این رویداد بدین خاطر بیش‌تر است که عوامل به وجود آورنده آن از یکدیگر مستقل

شده که تا حدودی به جزئیات اشاره نموده گزارش‌های هیأت ملی بازرسان دیگ بخار و ظروف تحت فشار (National Board of Boiler and Pressure Vessels Inspectors) است که نشان می‌دهد طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۱ تعداد ۱۲۷ نفر به علت حوادث دیگ بخار و ظروف تحت فشار جان خود را از دست داده‌اند. طی این سال‌ها ۷۲۰ مورد جراحات به ثبت رسیده است که به طور متوسط ۷۲ مورد در سال است. تعداد حوادث گزارش شده در این دوره حداقل ۲۰۰۰ حادثه در سال بوده و ۲۳۳۳۸ مورد در کل بود. مطالعه‌های این مرکز نشان داد که ۸۳ درصد حوادث ناشی از اهمال افراد یا فقدان از قبیل وضعیت آب پایین، نصب نامناسب، تعمیر نامناسب، خطای کاربر یا نگهداری ضعیف بود. همچنین قصور افراد یا فقدان اطلاعات عامل ۶۹ درصد جراحات‌ها و ۶۰ درصد مرگ‌های ثبت شده می‌باشد. دیگ بخارهای تولید نیرو سبب ۲۵۰ مورد جراحات، دیگ بخارهای آب داغ ۹۲ مورد جراحات و دیگ بخارهای بخار گرمایشی ۸۹ مورد جراحات بود. دیگ بخارهای گرمایشی بیش‌ترین موارد حوادث را با ۹۵۸۸ مورد وقوع پوشش می‌دادند.^(۸)

بدین ترتیب در هنگام بهره‌برداری از دیگ بخارهای لوله آتشی، مهم‌ترین توصیه در پیشگیری از انفجار ناشی از سوخت گاز می‌تواند ایجاد یک برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه کارآمد باشد.

* مراجع :

۱. گان د، هورتن ر. تکنولوژی دیگ‌های بخار صنعتی. مترجم ح رفیعی پورعلوی، تهران، نشر طراح، ۱۳۸۰
۲. پرت ر، دوهاروی‌ام ه. راهنمای تجزیه و تحلیل از کار افتادگی دیگ‌های بخار، مترجم م نفری، تهران، نشر سرسبز، ۱۳۸۰

3. The National Safety Council. Accident Prevention manual for Industrial operations, engineering and Technology. 10th ed; USA; 1992 Boilers and Unfired Pressure Vessels

انسانی و یک نقص سخت‌افزاری است. این عامل انسانی مربوط به کاربر بوده و می‌تواند ناشی از عدم آگاهی فرد یا فشار کاری برای تأمین بخار لازم به هر شکل ممکن باشد. در رتبه پنجم رویدادهای «خرابی شیرهای برقی» که نقصی سخت‌افزاری است قرار دارد. ردیف هفتم مربوط به ابزارهای کنترلی برقی است. کم‌اهمیت‌ترین عامل در این رتبه‌بندی در ردیف ۱۱ مربوط به اشکال در صافی سوخت گاز ورودی است.

رتبه‌بندی کمی رویدادهای ۲۸ تا ۳۶ که می‌توانند به انفجار خفیف‌تر اما رایج‌تری منجر شوند نشان داد که «از مدار خارج شدن حس‌گر توسط کارکنان فنی» که یک عمل غیر مسؤولانه جهت راه‌اندازی سریع دیگ، بدون رفع ایراد اصلی است در رتبه اول قرار دارد. سایر ایرادهای سخت‌افزاری که در رتبه‌های بعدی قرار داشتند مربوط به شیر پروانه‌ای کنترل‌کننده گاز ورودی به مشعل، حس‌گر کنترلی و رابط میله‌ای بین آن دو بودند. به طور کلی با توجه به سیستم‌های کنترلی نصب شده بر روی دیگ بخارهای تحت مطالعه، احتمال تجمع گاز در حین توقف و عدم تخلیه کافی آن قبل از احتراق بسیار کم بود و با اطمینان یافتن از صحت کارکرد آنها وقوع انفجار به نحو مطلوبی قابل پیشگیری بود. بالا بودن احتمال وقوع انفجار به علت آزاد شدن ناگهانی مقادیر زیادی گاز در حین عملیات روشن کردن، می‌تواند به علت نبود برنامه کنترلی پیشگیرانه مناسب و مسؤولانه باشد که متأسفانه در بسیاری از صنایع به چشم می‌خورد. همچنین لزوم بازنگری در طراحی و ساخت این نوع دیگ بخارها را نشان می‌دهد.

در بررسی مطالعه‌های گذشته، هیچ تحقیق یا مقاله‌ای در خصوص ارزیابی خطر انفجار گاز سوخت در محفظه احتراق دیگ بخار به روش FTA یا سایر روش‌های ارزیابی خطر یافت نشد. فقط توصیه‌های عمومی جهت آگاهی یا پیشگیری از وقوع آنها در جزوه‌های سازندگان و مانند آن ارائه شده است. تنها گزارش تحلیلی منتشر

Washington DC; NASA Office of Safety and Mission Assurance; 2002, 1-69

6. Raafat Hani. Fault tree analysis (FTA), risk assessment methodologies. RT Booth 2002, 1-10

7. Taylor J.R. Risk analysis for process plant. pipelines and transport; London; E and FN Spon; 1994; 78-146, 181-211

8. Ten years of incident Reports underscore human error as primary cause of accidents. National Board Bulletin. 2002; 57(2): 10

4. Sutton Ian S. Process reliability and risk management. New York; Van Nostrand Reinhold, 1992; 31-136

5. Vesely W et al. Fault tree handbook with aerospace applications version 1.1.