



کاربرد تحلیل درخت خطا در یک واحد تقویت فشار گاز

علی سخاوتی، حیدر رضا نوروزی، مدیران نظارت بر تولید نفت و گاز
امیر عباس شجاعی، شرکت Pincos

چکیده

تحلیل درخت خطا^۴ (FTA)، از روش‌های پر کاربرد در ارزیابی ریسک است. این روش به دلیل ماهیت منطقی خود، هر دو ارزیابی کیفی و کمی را پوشش داده و مکمل خوبی برای روش‌های کیفی محسوب می‌شود. شاید از این روش در نقص‌های فرآیندی کمتر استفاده شود، اما قابلیت فوق‌العاده تحلیل این روش به نحوی است که اگر توسط تیمی ماهر متشکل از متخصصان فرآیند، عملیات، HSE، بازرسی فنی و تعمیر و نگهداری استفاده شود، منجر به نتایج شگفت‌آوری خواهد شد. در این مقاله کاربرد روش FTA در یافتن علل ریشه‌ای (رویدادهای پایه) برای توقف ناگهانی یک ایستگاه تقویت فشار گاز تشریح شده است. بدین منظور درخت خطایی رسم شده که در آن هم خطای سیستم کنترلی و هم خطای انسانی تصویر شده است. توصیف خطاهای انسانی و کمی کردن آن، از مواردی است که به طور معمول در تحلیل درخت خطا نادیده گرفته می‌شود. اما در این مطالعه از روش‌های آنالیز خطاهای انسانی (TESEO) جهت متمایز کردن این گونه خطاها، استفاده شده است. در این تحقیق سطح ریسک موجود، محاسبه شده و با توجه به استانداردهای موجود، منطقه ریسک ارزیابی شده است. پیشنهادات ارائه شده در تحقیق، بر اساس ساعت‌ها مسیریابی خطوط لوله، تجزیه و تحلیل فرآیند، بررسی سوابق تعمیر و نگهداری تجهیزات و استفاده از تجربیات موجود بوده است. در پایان نیز پیشنهادها و اقدامات اصلاحی مؤثری ارائه شده است.

واژگان کلیدی: تحلیل درخت خطا، ارزیابی ریسک، واحد تقویت فشار گاز، خطاهای انسانی، نقص‌های فرآیندی

مقدمه

برای وقوع رویداد نامطلوب یا رویداد رأس، رسم می‌شود. نمادهای به کار رفته در یک درخت خطا (FT)، نوع رویدادها و نوع ارتباط آنها را با یکدیگر نشان می‌دهد. درخت خطا، مدلی کیفی است که اطلاعات مفید بسیاری از علل بروز یک رویداد نامطلوب ارائه می‌دهد. از سویی دیگر این مدل را می‌توان کمی کرده و اطلاعات بیشتری درباره احتمال وقوع رویداد رأس و میزان اهمیت تمامی علل و رویدادهای مدل شده در FT به دست آورد. هدف این نوشتار تشریح تحلیل درخت خطا و شرح و بسط نمادهای به کار رفته در آن نیست؛ بلکه بیشتر تمرکز بر اجرای آن در یک واحد فرآیندی و تشریح نتایج می‌باشد.

۱- شرح مختصر فرآیند

در ورودی ایستگاه تحت بررسی، گاز غنی تولیدی پس از ارسال از مراکز جمع‌آوری و تفکیک سه‌گانه (موسوم به سایت‌های ۱ و ۲ و ۳) به وسیله یک خط ۲۰ اینچ وارد یک هدر ۴۰ اینچ شده، سپس توسط دو خط ۳۲ اینچ به دو سرباره‌گیر^۲ وارد شده و میعانات جدا شده نیز توسط یک خط ۶ اینچ به خط اصلی ۸ اینچ ارسال می‌عانات به پالایشگاه گاز فرستاده می‌شود. گاز خروجی از این سرباره‌گیرها نیز توسط یک خط مشترک ۳۲ اینچ جهت فشارافزایی به سمت چهار مجموعه موازی و مشابه فشارافزایی فرستاده می‌شود:

در هر مجموعه، گاز خروجی سرباره‌گیرها وارد suction scrubber شده و ذرات جامد و میعانات احتمالی موجود پس از جداسازی به مخزن close drain

بیش از دو دهه است که تحلیل احتمالی ریسک^۵ (PRA) و روش‌های زیر مجموعه آن، از جمله روش تحلیل درخت خطا (FTA)، روش‌های قابل اعتمادی در ارزیابی ایمنی بوده‌اند. به دلیل نگرش جامع و سیستمی، PRA و FTA بارها قابلیت خود را در آشکار کردن نقاط ضعف طراحی و عملیاتی که حتی از چشم زنده‌ترین کارشناسان و مهندسان ایمنی به دور مانده اثبات کرده‌اند. این روش‌ها نه تنها لزوم بررسی رویدادهای منفرد با احتمال کم و شدت زیاد را نشان دادند، بلکه سناریوهای بد فرجامی که می‌توانند در نتیجه بروز رویدادهای کم خطر اما پر احتمال به وجود آیند را نیز لحاظ کرد. بر خلاف درک عموم، این رویدادهای به ظاهر کم خطر، اغلب زیان‌بارتر از رویدادهای نخست هستند. بارزترین نقطه قوت PRA و روش تحلیلی پایین دست آن FTA، این است که این روش‌ها پشتیبان نیرومندی در فرآیند تصمیم‌گیری هستند. در کاربری‌های ایمنی، این روش‌ها به مدیران و مهندسان کمک می‌کنند تا نقاط ضعف طراحی و عملیاتی را در سیستم‌های پیچیده پیدا کرده و به نحو مؤثری در جهت بهبود ایمنی سیستم تلاش کنند. روش FTA، نگرشی جزء گرا و مبتنی بر نقص است. جزء گرایی بدین معنی است که این روش با رویدادی نامطلوب شروع شده و سپس با استفاده از یک فرآیند سیستمی رو به عقب، علل وقوع این رویداد ناخواسته مشخص می‌شود. در تعیین علت‌ها، درخت خطایی جهت توصیف گرافیکی رویدادها و ارتباط آنها

است. این نمودار که به شکل منطقی دلایل توقف واحد را نشان می‌دهد، کمک خوبی برای شناسایی عوامل بازدارنده تولید است. البته بیشترین کاربرد این نمودار عیب‌یابی و رفع اشکالات ابزار دقیق است و به همین دلیل نمودار فوق در اندازه بزرگ و به عنوان نقشه راهنما در کارگاه ابزار دقیق واحد، نصب می‌شود.

با توجه به حساس بودن و نقش کلیدی ایستگاه تقویت فشار گاز در تولید گاز مصرفی کشور، توقف عملیات تقویت فشار گاز به عنوان رویداد رأس تعیین گردیده است.

۲-۲- رسم درخت خطا و تعیین معادله رویداد رأس

پس از رسم درخت خطا، علامت گذاری رویدادها و نوشتن معادله رویداد رأس بر حسب برش‌های حداقل انجام می‌شود. در واقع تمامی مقدمات ذکر شده برای رسیدن به این مرحله و نوشتن معادله جبری بولی رویداد رأس بود. روش‌های مختلفی جهت حصول برش‌ها وجود دارد که معروف‌ترین آنها عبارتند از:

- روش گیت (Gate Method)
- روش ماتریسی (Matrix Method)
- رسم نمودار تصمیم دودویی (BDD)
- استفاده از بلوک‌های قابلیت اطمینان (Reliability)

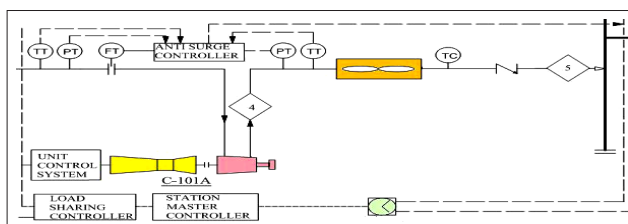
روش گیت معمول‌ترین روش مورد استفاده است. در این روش معادلات مربوط به برش‌ها با توجه به نوع گیت‌ها از پایین به بالا (از سمت رویدادهای پایه به طرف رویداد رأس) یا از بالا به پایین (از رویداد رأس به طرف رویدادهای پایه) نگاشته می‌شود. اما قبل از نوشتن معادلات بهتر است رویدادها به اختصار نام‌گذاری شوند.

در جدول ۱، شرح علائم و حروف اختصاری رویدادهای درخت رسم شده در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است (T رویداد رأس است)

$$T = KHL + OGHP + OGH + FGHP + SCHL + FGHL + IAF + PWF + HE \quad (1)$$

۲-۳- به دست آوردن مجموعه برش‌های حداقل^۶ (MCSs)

پس از رسم درخت خطا و نام‌گذاری رویدادها، باید مجموعه برش‌های حداقل درخت را تعیین نمود. مجموعه برش‌ها در یک درخت خطا رشته‌ای از رویدادهاست که با وقوع آنها، رویداد رأس به وقوع خواهد پیوست. مجموعه برش‌های حداقل، کوتاه‌ترین مسیر این توالی از رویدادها را مشخص می‌کنند. برای به دست آوردن MCS ها، روش‌های مختلفی وجود دارد که سنتی‌ترین



ارسال می‌شود. گاز خروجی نیز توسط یک خط ۲۰ اینچ به توربو کمپرسور (که قسمت اصلی ایستگاه جهت فشارافزایی است) ارسال شده و با فشار تقریبی ۸۴ bar و دمای حدود ۸۲ درجه سانتیگراد از آن خارج شده و به وسیله یک خط ۱۸ اینچ به قسمت سردکننده فرستاده می‌شود. در این قسمت ۴ دستگاه Air gas cooler (که بنا بر نیاز از یک تا هر چهار عدد ممکن است در سرویس قرار گیرند) با خنک کردن گاز، میعاناتی که احتمالاً در این فرآیند ایجاد شده را به مخزن close drain ارسال کرده، گاز خشک را با دمای ۵۵ درجه سانتیگراد و فشار تقریبی ۸۴ bar تحویل می‌دهد. گاز خروجی هر کدام از مجموعه‌های فوق پس از جمع شدن در یک هدر ۲۸ اینچ، توسط دو خط جداگانه ۲۴ و ۳۰ اینچ به خطوط اصلی ارسال گاز با اندازه مشابه هر کدام از این خطوط متصل شده و از آن طریق به سمت پالایشگاه گاز ارسال می‌شود. میعانات گازی جمع شده در close drain نیز بوسیله دو پمپ به خط اصلی ۸ اینچ ارسال میعانات به پالایشگاه گاز فرستاده می‌شود. (شکل‌های ۱-۲)

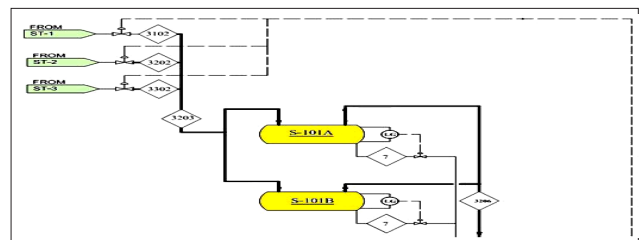
۲-۲- مراحل تحلیل درخت خطا برای ایستگاه تقویت فشار

در این بخش، مراحل اجرای FTA در ایستگاه تقویت فشار گاز تشریح می‌شود. نتیجه استفاده از این روش کاهش خسارات و هزینه‌های کارخانه در اثر توقف تولید، کاهش تعداد دفعات توقف کمپرسور به دلیل نفوذ مایع، ارتقاء بهره‌وری و ایمنی سیستم، یافتن نقش خطاهای انسانی در وقوع رویداد رأس، افزایش چرخه عمر سیستم، ارزیابی ریسک یکی از رویدادهای مخاطره‌آمیز شناسایی شده، شناسایی نقاط ضعف کارخانه، پیش‌گیری از آسیب‌دیدگی تجهیزات حیاتی کارخانه و کاهش تعداد و هزینه تعمیرات است.

۲-۱- تعیین رویداد رأس

اصلی‌ترین بخش ارزیابی ریسک به روش درخت خطا، انتخاب رویداد رأس است. در واقع این رویداد سمت و سو و هدف تحلیل را مشخص کرده و به آن اعتبار می‌بخشد. رویداد رأس، رویدادی است ناخوشایند که به نوعی سیستم را تهدید کرده، سبب آسیب آن می‌شود. این سیستم می‌تواند تنها یک عنصر یا تجهیز ساده باشد یا بخشی از یک کارخانه و یا حتی کل کارخانه. اما مسئله بسیار مهم در صنایع فرآیندی که هدف و فلسفه وجودی آنها تلقی می‌شود، تداوم تولید است. ایستگاه تقویت فشار گاز مورد بررسی، در مسیر تولید بخش عمده‌ای از گاز کشور قرار گرفته و هر نوع اشکال و توقف آن باعث توقف قسمتی از زنجیره تولید می‌شود. بنابراین باید تلاش کرد که تا حد ممکن این کارخانه متوقف نشود.

یکی از هوشمندانه‌ترین راه‌های یافتن علل توقف عملیات در واحدهای فرآیندی که شاید کمتر مورد توجه قرار گرفته، بررسی نمودار توقف واحد^۷





حاصل ضرب ضرایب K1 تا K5 را محاسبه کرد:

$$P1 = 0.01 \times 0.1 \times 3 \times 3 \times 0.7 = 0.063 \quad (3)$$

در مورد اپراتور آموزش ندیده یا تازه وارد:

$$P2 = 0.01 \times 0.5 \times 1 \times 1 \times 0.7 = 0.035 = \text{OPFO} \quad (4)$$

در مورد فراموشی در باز کردن شیرهای تخلیه:

$$P3 = 0.01 \times 0.1 \times 1 \times 3 \times 0.7 = 0.021 \quad (5)$$

برای عکس العمل کند اپراتور:

$$HE = 0.063 + 0.035 + 0.021 = 0.119 \quad (6)$$

داده‌های نقص رویدادهای پایه در جدول ۲-ارائه شده است.

۲-۵- احتمال وقوع رویداد رأس

با استفاده از جدول داده‌های نقص و معادله ارائه شده برای T (معادله ۱)، احتمال

وقوع رویداد رأس محاسبه می‌شود:

آنها استفاده از جبر بولی است. در این مقاله نیز از همین روش برای محاسبه MCS ها استفاده شده است:

OPFO × MFV1, OPFO × PFTP, RND, CSF, MFV2 × MFV3, CCFE, MFE × EFE, MFE × FDV, EFE × FDV, CCFP, MFC, EFC, CCFCM, VSF1 × VSF2, PVF1 × PVF2, PWF, HE

لازم به ذکر است برای داده‌های مربوط به نرخ نقص ادوات ابزار دقیق مرجع OREDA و برای محاسبه خطاهای انسانی روش TESEO استفاده شده است.

۲-۴- محاسبه خطاهای انسانی با استفاده از روش TESEO

در روش TESEO، خطای اپراتور به صورت تابعی با پنج پارامتر، تعریف می‌شود:

$$P = K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5 \quad (2)$$

P= احتمال وقوع خطای اپراتور

K1= نوع کاری که انجام می‌شود

K2= زمانی که اپراتور لازم دارد تا کار را انجام دهد.

K3= ویژگی‌های فردی اپراتور، میزان تجربه یا مهارت اپراتور

K4= عوامل روانی موثر در عکس‌العمل اپراتور

K5= شرایط محیطی و عوامل ارگونومیکی محل کار

با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از وقوع رویداد رأس به دلیل عکس‌العمل نامناسب و خطای اپراتور است، لذا این پارامتر با دقت بیشتری بررسی شده است. ضرایب در نظر گرفته شده برای خطای اپراتور در حالت‌های مختلف به شرح زیر است: [۷ و ۶]

• در مورد اپراتور آموزش ندیده یا تازه وارد:

$$K1=0.01, K2=0.1, K3=3, K4=3, K5=0.7$$

• در مورد فراموشی در باز کردن شیرهای تخلیه:

$$K1=0.01, K2=0.5, K3=1, K4=1, K5=0.7$$

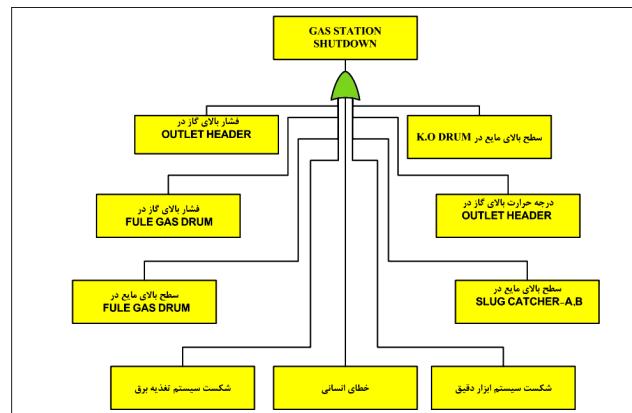
• برای عکس‌العمل کند اپراتور:

$$K1=0.1, K2=0.1, K3=1, K4=3, K5=0.7$$

برای محاسبه احتمال خطای انسانی (HE) همان گونه که در بالا اشاره شد، باید

شرح علائم و اختصارات مورد استفاده در معادله نهایی رویداد رأس (رابطه ۱)

رویدادهای اصلی منجر به رویداد رأس	رویدادهای فرعی منجر به رویداد رأس
KHL = سطح بالای مایع در مخزن K.o Drum	OPFO = خطای اپراتور در باز کردن بموقع شیر تخلیه
OGHP = فشار بالای گاز خروجی	MFV = خرابی یا اشکال مکانیکی شیر
OGHT = دمای بالای گاز خروجی	PFTP = از کار افتادن پمپ close drain
FGHP = فشار بالا در مخزن Fuel gas	RND = عدم تقاضا از طرف پالایشگاه
FGHL = سطح بالای مایع در مخزن Fuel gas	CSF = نقص سیستم کنترل
SCHL = سطح بالای مایع در لخته‌گیرها	MFC = نقص مکانیکی کمپرسور هوا
IAF = نقص هوای ابزار دقیق	CCFCM = نقص علت مشترک کمپرسورها
HE = خطای انسانی	PVF = خرابی شیر کنترل فشار
PWF = قطع تغذیه برقی	VSF = نقص مخزن
	CCFE = نقص علت مشترک مبدل‌ها
	MFE = نقص مکانیکی مبدل
	EFE = نقص الکتریکی مبدل
	FDV = نقص به دلیل ارتعاش بیش از حد
	CCFP = نقص مشترک شیرهای کنترل فشار
	EFC = نقص الکتریکی کمپرسور هوا



درخت خطای توقف عملیات در ایستگاه تقویت فشار

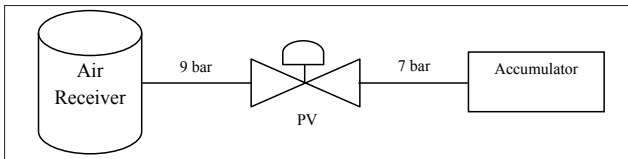


دقیق و جلوگیری از ورود رطوبت به داخل توربو کمپرسور که باعث زنگ زدگی و آسیب دیدن یا تاقان‌های می‌شود.

- بازمینی و تعمیرات دوره‌ای تجهیزات کنترل و اندازه‌گیری.
- بالا بردن ظرفیت کمپرسور تا حد بیشتر از میزان مصرف (لازم به ذکر است در شرایط فعلی ظرفیت کمپرسور ۴۲۰ متر مکعب در ساعت است که با میزان مصرف هم‌پوشانی دارد).

نتیجه‌گیری

معمولاً برای ارزیابی ریسک واحدهای فرآیندی از روش متداول HAZOP استفاده می‌شود. این روش کاملاً کیفی است و در مورد پیامدهایی که در کاربرگ‌ها شدت زیادی دارند، تحلیل دقیقی از مقدار احتمال وقوع این پیامد نداریم. در این مواقع بهترین ابزار کمکی، تحلیل درخت خطاست. این تحلیل با منطقی که در خلاف جهت HAZOP است (منطق برگشت به عقب^{۱۶} یا رسیدن از کل به جزء)، علل ریشه‌ای وقوع پیامد از جمله عللی که ممکن است در روش HAZOP از چشم تحلیل‌گر دور مانده باشد را یافته و به معالجه^{۱۷} مشکل می‌پردازد. با شناسایی تجهیزاتی که بیشترین نقش را در بروز رویداد یا پیامد نامطلوب دارند، برنامه‌های کاهش ریسک در مدیریت ایمنی، هدف‌مند شده و تخصیص منابع به شکلی صحیح انجام خواهد گرفت.



۴ | تمایی از طرح پیشنهادی تعبیه یک انبارش‌گر بعد از شیر کنترل سیستم هوای ابزار دقیق

جزئیات شده و به طور هدف‌مند سیر منطقی خطا را در سیستم دنبال می‌کند. در ادامه اقدامات و پیشنهادهای مؤثر جهت کاهش نرخ نقص رویدادهای پایه فوق تشریح می‌شود. مسئله بسیار مهم در انجام و اجرای پیشنهادها، داشتن سیستمی مدون در زمینه مدیریت تغییرات در واحد است. این سیستم اجرای صحیح پیشنهادها را تضمین می‌کند. جهت بهینه‌سازی و ارتقای سیستم هوای ابزار دقیق می‌توان پیشنهادهای زیر را ارائه داد:

- بزرگ‌تر کردن مخزن receiver
- تعبیه یک مخزن انبارش‌گر ۱۲ بعد از شیر کنترل خروجی دریافت‌کننده ۱۳ جهت گرفتن نوسانات فشاری و مانع شدن از توقف اضطراری (ESD) ۱۴ (شکل-۵)
- بالا بردن بازده خشک‌کننده‌ها ۱۵ جهت خشک کردن کامل هوای ابزار

۳ | رتبه‌بندی رویدادهای فرعی

رتبه (بر حسب درصد)	رویداد فرعی
۳۴/۱۹	IAF
۳۱/۴۵	PWF
۱۷/۹۲	OGHP
۷/۹۷	FGHP
۴/۸۵	HE
۳/۵۶	OGHT
۰/۰۴	KHL
۰/۰۱۴	SCHL
۰/۰۱۴	FGHL

پانویس‌ها

^۱ a.sekhavati@nioc.ir

^۲ hamidreza_noruzi@yahoo.com

^۳ a.shojaei@shojaei.com

^۴ Fault Tree Analysis

^۵ Probabilistic Risk Assessment

^۶ slug catcher

^۷ ESD block diagram

^۸ Minimal Cut Sets

^۹ risk level

^{۱۰} sub events

^{۱۱} ranking

^{۱۲} accumulator

^{۱۳} receiver

^{۱۴} Emergency Shutdown Valve

^{۱۵} dryer

^{۱۶} backwards logic

^{۱۷} treatment

منابع

- [۱] نظامنامه مدیریت ریسک شرکت ملی نفت ایران
- [۲] ارزیابی ریسک با روش تحلیل درخت خطا، مهندس سید حسن اصفهانی، انتشارات کالج برتر چاپ اول ۹۸۳۱
- [۳] آنالیز خطر و ارزیابی ریسک دکتر تیمور الهیاری-۴۸۳۱
- [۴] مهندسی ایمنی سیستم و ارزیابی ریسک مهندس حجت اله رضا زاده- دانشگاه صنعتی امیرکبیر-۲۸۳۱
- [۵] Vesely, William; et. al. (2002). Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. National Aeronautics

- and Space Administration.
- [6] Bello, G.C. & Colombari, C. (1980) The human factors in risk analyses of process plants: the control room operator model, TESEO. Reliability Engineering. 13-14.
 - [7] a b Humphreys, P. (1995) Human Reliability Assessor's Guide. Human Factors in Reliability Group.
 - [8] OREDA (2002), Offshore Reliability Data Handbook. 4nd edition, Hovik, Norway: Det Norske Veritas.