

## ارزیابی ریسک خطوط لوله انتقال نفت و گاز بر مبنای روش Bow-tie فازی شده

پریسا حیرانی<sup>۱\*</sup> - علی بقایی<sup>۲</sup>

p\_heirany@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۸

### مکیده

**مقدمه:** امروزه ۶۰٪ از منابع انرژی در دنیا را نفت و گاز تشکیل می دهد. حمل و نقل نفت خام و محصولات آن به روش های مختلفی انجام می شود که از این میان بیش ترین سهم انتقال، بر عهده لوله های انتقال می باشد. با توجه به گستردگی خطوط در مناطق مختلف تاسیساتی و یا حتی مسکونی و همچنین پتانسیل بالای آسیب پذیری، ایمنی خطوط لوله و رعایت اصول مدیریت ریسک آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. یکی از روش های تعیین سطح ایمنی، ارزیابی ریسک به روش Bow-tie است. روش Bow-tie یک روش کیفی نیمه کمی است که داده های آن از طریق نظرسنجی از متخصصین اجراء می شود.

**روش کار:** در این تحقیق از روش Bow-tie در تلفیق با منطق فازی با به کارگیری روش مقیاسی لیکرت جهت کمی سازی داده های کیفی (زبانی) به منظور کاهش عدم قطعیت ارزیابی ریسک خطوط لوله شماره ۱۰ گاز آماک و ۱۲ نفت بنگستان استفاده شد، به طوری که ابتداء عوامل تأثیرگذار بر ایمنی خطوط انتقال از طریق تهیه چک لیست مشخص گردید و سپس با استفاده از روش ذکر شده اقدام به ارزیابی ریسک خطوط لوله مورد مطالعه شد.

**نتیجه گیری:** یافته های تحقیق نشان داد که عوامل آسیب شخص ثالث، نقص اولیه در مواد و ساخت خط لوله با احتمال شکست ۰/۰۴۸۴ دارای بالاترین درصد اهمیت (معادل ۱۲/۳۲٪) در تخریب خط لوله های انتقال گاز و نفت می باشند. افزون بر این، اثرات سمی و آسیب محیط زیست با احتمال رخداد ۰/۰۳۲۷، از بارزترین پیامدهای ناشی از نشت نفت و گاز از خطوط لوله های انتقال بر اساس روش درخت پیامد هستند. براین اساس و با لحاظ مهم ترین عوامل موثر شناسایی شده در تخریب خطوط انتقال گاز و نفت و اصلی ترین پیامد ناشی از آن ها، اقدام به ارایه دستورالعمل بهینه کاهش پیامدهای بالقوه و کنترل آن ها با تأکید بر حذف علل احتمالی آن ها شده است.

**کلمات کلیدی:** ایمنی خطوط لوله انتقال گاز و نفت، Bow-tie فازی، درخت خطا، درخت پیامد.

دستورالعمل کاهش پیامد ها

۱- کارشناس ارشد مدیریت HSE، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه مهندسی شیمی دانشگاه شهید با هنر کرمان

### مقدمه

نفت و گاز منبع اصلی سوخت مصرفی در جهان می باشد. انتقال مواد نفتی، گاز و پتروشیمی از طریق حمل زمینی، دریایی و هوایی نشان داده است که این روش های انتقال، علاوه بر موانع و مشکلات خاص خود و وجود خطرات مالی و جانی بسیار، از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نبوده و انتقال از طریق خطوط لوله راه حل مناسبی برای رفع این مشکل می باشد به همین دلیل استفاده از این روش انتقال در دهه های اخیر رشد قابل توجهی را نشان می دهد [1].

بر اساس آمارهای موجود در حال حاضر طول خطوط لوله کنونی کشور ۱۳۹۵۰ کیلومتر می باشد که با اتمام طرح های جدید، طول خطوط لوله انتقال به ۱۷۶۶۴ کیلومتر افزایش خواهد یافت [7].

گرچه روش های مختلفی جهت ارزیابی ریسک خطوط لوله ارایه شده اند، اما هریک از این روش ها کاستی های ویژه خود را دارند. به طور مثال در روش های کیفی علیرغم سرعت بالای انجام و نتیجه گیری، دقت پایین بوده و معمولا نتایج محافظه کارانه بوده و قابل اعتماد نمی باشند. روش های کمی نیز نیازمند محاسبات پیچیده و صرف زمان و هزینه های بالا می باشند. از آنجا که میزان شکست و سایر داده های فیزیکی متغیر هستند، جمع آوری آن ها بسیار مشکل است و یا در بسیاری موارد اطلاعات کافی وجود نداشته و در نتیجه مدل های مرسوم ارزیابی ریسک با ابهام همراهند. لذا جهت کاهش عدم قطعیت های موجود از منطق فازی استفاده می شود. منطق فازی راهکاری مناسب برای مدل کردن جنبه های کیفی و تقریبی استدلال و تصمیم گیری انسان در کنترل سیستم است.

### روش کار

روش ارزیابی ریسک Bow-tie یک روش احتمالاتی یکپارچه در مدیریت ریسک است که با یافتن علل بنیادین بروز یک حادثه و روابط منطقی حاکم بر آن ها، به تجزیه و تحلیل پیامدهای آن و ارزیابی احتمالات و مسیر رخداد سناریوهای مختلف جهت جلوگیری، کنترل و کاهش رویدادهای ناخواسته می پردازد [5].

نمایش گرافیکی این روش با ترکیب درخت خطا (FTA) و درخت رویداد (ETA) شکل می گیرد. از آنجا که روش Bow-tie روشی کیفی نیمه کمی و مبتنی بر استدلال های انسانی است، از این روش استفاده از منطق فازی در بهبود این روش و ایجاد یک روش نیمه کمی، بسیار مفید به نظر می رسد. در این مطالعه با استفاده از روش Bow-tie فازی اقدام به ارزیابی ریسک خطوط لوله انتقال گاز آماک و نفت بنگستان در خوزستان شده است که می توان با استفاده از نتایج به دست آمده نگرشی نو را در صنعت خطوط لوله انتقال گاز و نفت کشور ایجاد نمود. در این مقاله در بخش اول توضیحاتی در مورد دیاگرام Bow-tie، درخت خطا و درخت رویداد ارایه شده است. در بخش دوم به مجموعه های فازی و نحوه فازی سازی مجموعه های کیفی پرداخته شده و در بخش سوم با استفاده از روش ارزیابی ریسک کنت مولبایر [8] علل ایجاد شکست لوله های انتقال گاز و نفت مورد مطالعه همراه با تهیه چک لیست عوامل مؤثر در نشت گاز و نفت از لوله های انتقال مشخص شده اند. به طوری که نتایج نظر سنجی از کارشناسان با استفاده از روش یا مقیاس طیفی لیکرت و منطق فازی به اعداد کمی تبدیل گردیده اند و در نهایت

رویداد شروع کننده اصلی، درخت رویداد ET و رویداد خروجی.

درخت خطا در سمت چپ نمودار و درخت رویداد در سمت راست نمودار قرار دارد؛ در نهایت با ترکیب درخت خطا و رویداد، تمام علل و عواقب مربوط به یک رویداد مهم شناسایی شده و دیاگرام Bow-tie تشکیل می‌شود (شکل ۱).

#### درخت خطا

تجزیه و تحلیل درخت خطا نموداری است تصویری و متشکل از کلیه علت‌های منطقی که می‌تواند هر یک به تنهایی و یا در مجموع به یک حادثه‌ی نهایی گردد [12,3].

نشت لوله نفت و گاز بر اثر مکانیسم‌های مختلف رخ می‌دهد. میزان نشت به‌طور قابل توجهی وابسته به عوامل طراحی، شرایط ساخت و ساز، تأثیر عوامل خارجی، روش‌های تعمیر و نگهداری و وضعیت محیطی است. بر اساس مطالعات انجام شده عوامل شکست لوله‌ها شامل فاکتور شخص ثالث (تصادف، خراب‌کاری، جنگ و ...)، خوردگی (داخلی یا خارجی)، نقص ساختاری در هنگام ساخت و یا نصب، نقص عملیاتی (نارسایی سیستم)، خطای انسانی (بهره‌برداری و یا عدم نگهداری مناسب) و مخاطرات طبیعی (زمین لرزه، سیل و ...) می‌باشد [۱۲,۳].

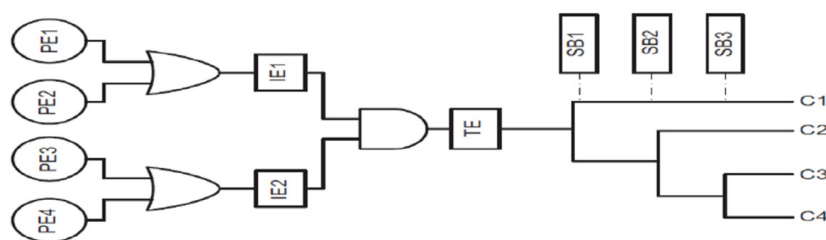
درخت خطا رسم شده است. در بخش چهارم به پیامدهای ناشی از نشت لوله‌های انتقال پرداخته و درخت رویداد حاصل از این مطالعات رسم گردیده است و سپس احتمال رویداد هر یک از پیامدها مشخص شدند. بالاخره در بخش پنجم مقاله اقدام به معرفی و ارایه اصلی‌ترین علل نشت گاز در این مطالعه و محتمل‌ترین پیامدهای ناشی از نشت و جمع‌بندی نتایج شده است.

#### مبانی نظری تحقیق

مبانی نظری تحقیق انجام شده به شرح زیر می‌باشند

#### دیاگرام Bow-tie

دیاگرام Bow-tie ریسک مورد بررسی را به صورتی ساده و قابل درک به تصویر می‌کشد. قدرت این روش در نمایش سناریوهای محتمل در ارزیابی یک ریسک و ارتباط منطقی بین علل و پیامدهای آن در یک نمودار می‌باشد سناریوهایی که به هر روش دیگری بسیار پیچیده‌تر به تصویر کشیده می‌شدند. به کمک این روش می‌توان مهم‌ترین سناریوها را تعیین نمود و به کنترل ریسک و کاهش رویدادهای ناخواسته پرداخت [4]. نمودار Bow-tie شامل پنج عنصر اصلی است: رویدادهای پایه‌ای BE، درخت خطا FT،



شکل ۱. دیاگرام Bow-tie [10]

ایجاد دو شاخه موفقیت و شکست به‌طور هم‌زمان به ارزیابی پیامدهای یک رویداد منفرد می‌پردازد. این تکنیک پاسخ‌های سیستم در برابر یک رویداد آغازگر را تشریح کرده و امکان ارزیابی احتمال یک پیامد مطلوب و یا نامطلوب را فراهم می‌کند [1]؛ به نحوی که پس از مشخص شدن رویداد رأس که در این تحقیق رها شدن سیال در داخل لوله (گاز و نفت) است، باید برای تشکیل درخت پیامد تعیین مسیر نمود. در این روش مسیر موفقیت در بالا و مسیر شکست در پایین هر دو شاخه به‌صورت قراردادی قرار می‌گیرد. سپس از طریق ضرب احتمال وقوع رویدادهای تشکیل دهنده هر مسیر، احتمال بروز مسیرهای بالقوه و در نهایت احتمال بروز هر پیامد مشخص می‌گردند.

#### روش شناسی تحقیق

این تحقیق به شرح گام‌های زیر به‌مورد اجرا در آمده است:

- روش و اصول محاسباتی: روش مورد استفاده در این تحقیق که از نوع تحقیقات توصیفی- استنباطی می‌باشد، مبتنی بر دیاگرام Bow-tie فازی با به‌کارگیری روش‌های درخت خطا، درخت رویداد در تلفیق با منطق و تئوری فازی مبتنی بر روش ارایه شده توسط ژانگ و

در صورت وجود میزان شکست رویدادهای پایه ( $\lambda$ )، احتمال بروز آن‌ها ( $P$ ) با استفاده از روابط ۱ و ۲، به شرح زیر محاسبه می‌شود و در محاسبات درخت خطا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$P_{avg} = \frac{\lambda T}{2} \quad (2)$$

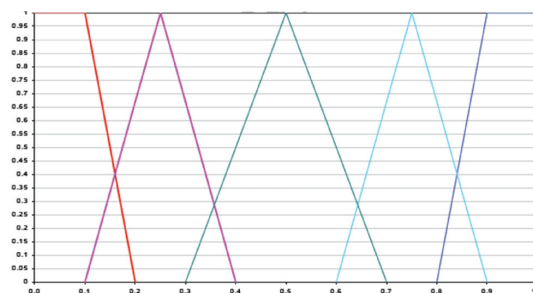
$t =$  زمان شکست رویداد پایه،  $e =$  عدد نپر اما مقادیر شکست همواره موجود نبوده و یا برای شرایط خاص مانند خطوط لوله انتقال گاز و یا نفت مشخص قابل استفاده نمی‌باشند.

#### درخت رویداد

روش تحلیل درخت رویداد یا پیامد (ETA) عبارت از یک تکنیک مدل سازی قیاسی است که با

جدول ۱. تعریف بازه‌های کیفی زبانی به مقادیر فازی مبتنی بر روش مثلث فازی [15]

مقادیر فازی	متغیرزبانی
(۰، ۰، ۰/۱، ۰/۲)	Very Low
(۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴)	Low
(۰/۳، ۰/۵، ۰/۷)	Medium
(۰/۶، ۰/۷۵، ۰/۹)	High
(۰/۸، ۰/۹، ۱، ۱)	Very High



شکل ۲: مقادیر زبانی در مقیاس فازی [15]

جدول ۳. تعیین شاخص‌های میانگین وزنی

شاخص‌ها	رتبه بندی	نمره
مقام سازمانی	مدیر عامل	۴
	مدیر	۳
	سرپرست	۲
	اپراتور	۱
تجربه	بیش‌تر از ۳۰ سال	۴
	۲۰-۳۰	۳
	۱۰-۲۰	۲
	۵-۱۰	۱
تحصیلات	دکتری	۵
	فوق لیسانس	۴
	لیسانس	۳
	فوق دیپلم	۲
	دیپلم	۱
سن	بالای ۵۰ سال	۴
	۴۰ تا ۵۰	۳
	۳۰ تا ۴۰	۲
	کمتر از ۳۰ سال	۱

سپس، به منظور یک پارچه سازی امکان خطا با میزان احتمالات خطا، با لحاظ نمودن اعداد امکان (CFP)، به احتمال شکست (FP) و با استفاده از رابطه ارایه شده توسط انیسواوا [13]، به شرح روابط ۵ و ۶، موارد زیر مد نظر قرار گرفت:

$$P = \sqrt[3]{\frac{1-E}{E}} \times 2.031 \quad (5)$$

$$P = \begin{cases} \frac{1}{P} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad (6)$$

تعیین مخاطرات لوله‌های نفت و گاز

عوامل ایجاد شکست در لوله (اصلی، میانی و پایه‌ای) براساس روش کنت مولبایر، مشخص شد. به نحوی که برای هر عامل ابتداء چک لیست تهیه

همکاران [15]، بوده است (جدول ۱ و شکل ۲). با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات داده‌های فرکانس شکست، از نتایج نظر سنجی از کارشناسان از طریق پرسش‌نامه جهت محاسبه احتمال شکست رویدادها استفاده شد. در این مطالعه اعداد فازی متناظر با داده‌های کیفی ورودی و پیامدها با استفاده از روش زبانی تعیین گردیدند، به طوری که به هر یک از عبارات زبانی low، medium، high، very low و very high مطابق جدول ۱ اختصاص داده شد و مقادیر فازی متناظر نیز با استفاده از روش ژانگ و همکاران [15]، تعیین گردیدند؛ به گونه‌ای که پس از تعریف و مشخص نمودن بازه‌های مبتنی بر میانگین وزنی امتیازات (نمرات) داده شده توسط کارشناسان و فازی سازی آن‌ها با در نظر گرفتن شکل ۲ که به دو صورت مثلثی و دوزنقه ای می‌باشند، با استفاده از روابط ۳ و ۴، غیر فازی (Defazification) جهت تبدیل اعداد فازی به اعداد امکان (CFP) به شرح مندرج در جدول ۲:

$$CFP = \frac{1}{3} \times (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \quad (3)$$

رابطه دوزنقه‌ای: (۴)

$$CFP = \frac{1}{3} \times \frac{(a_4 + a_3)^2 - (a_4 \times a_3) + (a_1 \times a_2) - (a_1 + a_2)^2}{a_4 + a_3 - a_2 - a_1}$$

جدول ۲. تعیین سطوح کمی

Very low	$1.63 \times 10^{-5}$
low	$4.8 \times 10^{-4}$
medium	$5 \times 10^{-3}$
high	$2.54 \times 10^{-2}$
Very high	$1.06 \times 10^{-1}$

گردید سپس بر اساس چک لیست، درخت خطا محاسبه احتمال بروز رویدادهای پایه رسم گردید. احتمال بروز هر رویداد پایه از اجماع نظرات متخصصین و با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد.

$$M = \sum_{i=1}^n W_i A \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

که در آن  $W$  وزن داده شده توسط متخصصین،  $A$  ترمهای زبانی فازی و  $i$  تعداد متخصصین است. بر این اساس با استفاده از درخت خطا و لحاظ نمودن احتمال رویدادهای پایه، احتمال رخداد رویداد راس به دست محاسبه گردید. پس از محاسبه عدد احتمال رویدادهای پایه که به

تعیین میزان رویدادهای پایه

با استفاده از درخت خطا و تکمیل چک لیستهای مربوط به آن توسط متخصصان، نظرات هریک از آنها که به صورت واژه های زبانی و کیفی است با توجه به وزنشان و با استفاده از منطق فازی بصورت بازه کمی تبدیل شده است. شاخص وزنی نظرات متخصصین بر اساس شاخص های تعیین شده توسط کلمن [۲] و رنجیت [۱۱]، به شرح مندرج در جدول ۳ مشخص شدند.

جدول ۴. مشخصات فنی خط لوله گاز آماک

نام خط لوله	۱۰ اینچی گاز ترش آماک ۳ به آماک ۲
سال احداث	۱۳۸۳
محل عبور	روگذر از پل فلزی رودخانه کارون
مبدا خط لوله/فاصله	آماک ۳، ۷ کیلومتر (Km)
مقصد خط لوله/فاصله	آماک ۲، ۸ کیلومتر (Km)
قطر خط لوله	۱۰ اینچ
جنس خط لوله	۴۲LX۵API-
ضخامت خط لوله	۰.۳۰۷ اینچ
میزان $S_pH$	۲۴۰۰۰ ppm/wt
طول خط لوله	۱۵ km

جدول ۵. مشخصات فنی خط لوله نفت بنگستان

نام خط لوله	۱۲ اینچی نفت بنگستان اهواز ۳ به اهواز ۲
سال احداث	۱۳۵۲
محل عبور	روگذر از غرب رودخانه کارون و مرکز شهر اهواز
مبدا خط لوله	اهواز ۳
مقصد خط لوله	اهواز ۲
جنس خط لوله	۵۲API-X
ضخامت خط لوله	۷.۵ اینچ (In)
میزان $S_pH$	۲۴۰۰۰ ppm/wt
طول خط لوله	۱۲ km

جدول ۶. علل شکست لوله‌های انتقال نفت/گاز

عامل اصلی	علل میانی	علل ریشه ای	
نشت نفت / گاز از لوله‌های انتقال	N-16	نقص خطوط لوله	
	N-14	نقص اولیه	$X_{1-1}^1$ نقص مواد
			$X_{2-1}^1$ نقص ساختمانی
	N-15	نقص عملیاتی	$X_{2-1}^2$ نقص جوش کاری
			$X_{1-1}^1$ آسیب مکانیکی
	N-13	عملیات نادرست	$X_{1-1}^1$ کمبود تعمیر و نگهداری
			$X_{2-1}^2$ اطلاعات و کنترل ناکافی
			$X_{3-1}^3$ کمبود دانش اپراتور
	N-12	آسیب ناشی از شخص ثالث	$X_{1-1}^1$ نوع عملیات انجام شده در اطراف خطوط لوله
			$X_{2-1}^2$ خراب کاری
			$X_{3-1}^3$ عمق خاک روی لوله
			$X_{4-1}^4$ حمل و نقل ریلی و جاده ای اطراف خطوط لوله
			$X_{5-1}^5$ تراکم جمعیت اطراف لوله
			$X_{6-1}^6$ حیات وحش منطقه
	N-11	حوادث جغرافیایی	$X_{1-1}^1$ زلزله
			$X_{2-1}^2$ سیل
$X_{3-1}^3$ رانش زمین			
N-10	خوردگی		
N-9	ترک ناشی از خوردگی	$X_{2-9}^1$ تنش کششی در ترک خوردگی	
		$X_{1-9}^1$ حرکات کله قوچی	
N-8	خستگی ناشی از خوردگی		
N-7	خوردگی محیطی لوله		
N-6	خوردگی ناشی از محیط اسیدی	$X_{1-6}^1$ محیط حاوی دی اکسید کربن	
		$X_{2-6}^2$ محیط حاوی اکسیژن	
		$X_{1-7}^1$ خوردگی ناشی از محیط آبی	
N-5	خستگی ناشی از استرس متناوب	$X_{2-5}^1$ فشار زیاد داخلی لوله	
		$X_{1-5}^1$ سنگینی بار خارجی روی لوله	
N-4	نازک شدن لوله ها ناشی از خوردگی		
N-3	خوردگی داخلی	$X_{1-3}^1$ خوردگی سیال عبوری	
N-2	اقدامات حفاظتی	$X_{1-2}^1$ شکست پوشش داخلی لوله	
		$X_{2-2}^2$ شکست بازدارنده‌های داخلی Inhibitor	
		$X_{3-2}^3$ نقص مانیتورینگ داخلی	
N-1	خوردگی خارجی	$X_{3-1}^1$ کاهش ضخامت پوشش لوله	
		$X_{2-1}^2$ شکست پوشش خارجی لوله Coating	
		$X_{1-1}^1$ شکست حفاظت کاتدیک	
N-0	خوردگی خاک	$X_{1-0}^1$ دمای بالای خاک	
		$X_{2-0}^2$ مقاومت کم خاک	
		$X_{3-0}^3$ رطوبت بالای خاک	
		$X_{4-0}^4$ نمک بالای خاک	
		$X_{5-0}^5$ تداخل الکتریکی در خاک	
		$X_{6-0}^6$ اسیدی بودن خاک	
$X_{7-0}^7$ فعالیت بالای باکتری‌های خاک			

در رابطه فوق MCS برش کمینه می باشد. سپس براساس نتایج به دست آمده از رابطه ۷ با بگارگیری رابطه فاسل-وسلی (رابطه ۹) به ترتیب بحرانی ترین برش های کمینه مشخص شدند.

صورت کیفی بیان شده بودند، میزان بروز رویداد رأس که رهایش گاز یانفت می باشد، با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - MCS_i) \quad (8)$$

جدول ۷. پیامدها

پیامدها	عنوان
آتش سوزی محدود و خسارت کم	$E_1$
اثرات سمی و آسیب به محیط زیست	$E_2$
آتش سوزی گسترده و خسارت به تجهیزات	$E_3$
انفجار	$E_4$
آتش تویی	$E_5$
تشکیل ابر قابل انفجار با اثرات گسترده سمی و آسیب به محیط زیست	$E_6$

جدول ۸. شرایط ایجاد کننده و بازدارنده

شرایط	عنوان
توقف اضطراری	۱
آتش سوزی آبی	۲
آتش سوزی تاخیری	۳
محدودیت فضای اشتعال	۴

نفت به عنوان رخداد نامطلوب به شرح ارایه شده در جدول ۶ مؤثر می‌باشند. در شکل ۳ نیز نتیجه رسم درخت خطا براساس نتیجه شناسایی علل پایه در رهائش گاز و نفت (رخداد نا مطلوب) نمایش داده شده است.

۳- نتایج به دست آمده از محاسبه پیامدهای احتمالی ناشی از رهائش سیال از لوله‌های انتقال دهنده گاز و نفت [14] و شرایط ایجاد کننده و بازدارنده، به ترتیب در جداول ۷ و ۸ نشان آورده شده‌اند. بر این اساس درخت رویداد ترسیم شده است (شکل ۴). با توجه به بروز و یا عدم بروز شرایط ایجاد کننده و یا بازدارنده، احتمال رویداد پیامدها نیز طبق نظر متخصصین (جداول ۹ و ۱۰) محاسبه شده که نتیجه در جداول ۱۱ و ۱۲، ارایه گردیده است.

$$FVI = \frac{MCS_i}{E} \quad (9)$$

تعیین پیامدهای احتمالی

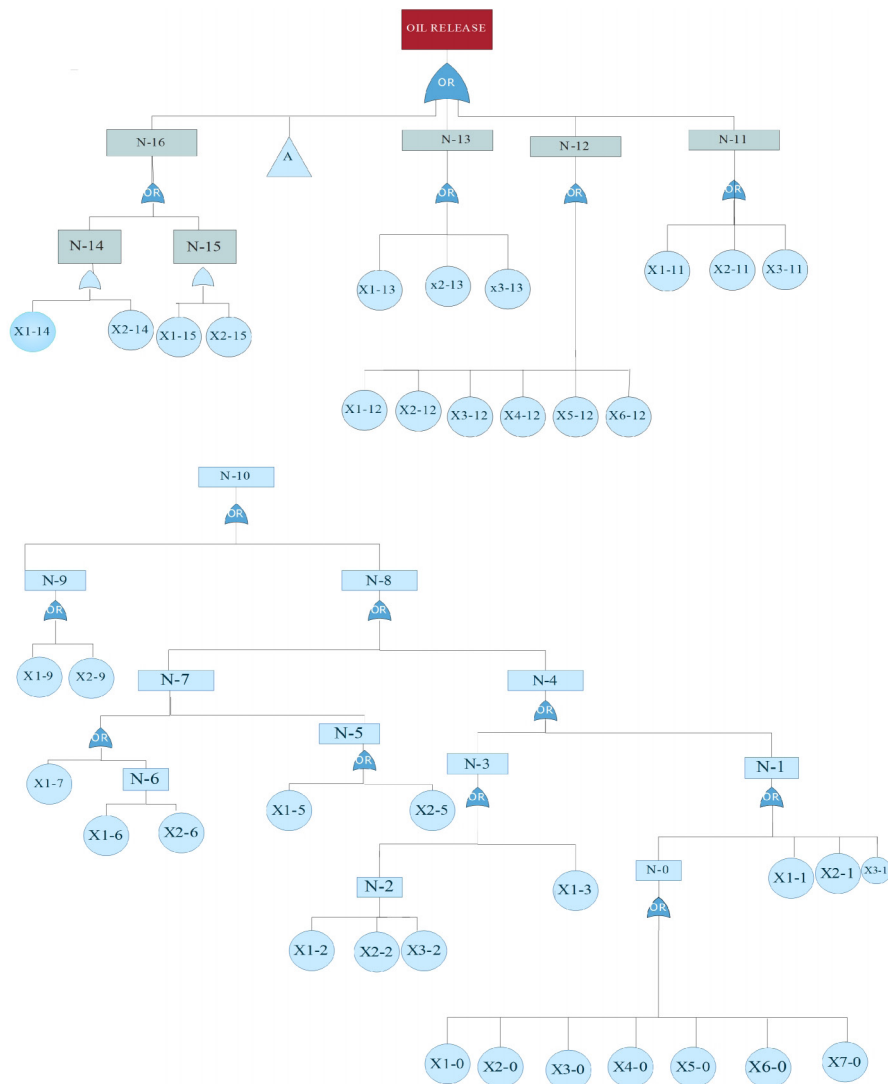
پیامدهای احتمالی ناشی از رهائش سیال از لوله‌های انتقال دهنده نفت/گاز و همچنین شرایط ایجاد کننده و بازدارنده موجود در این مطالعه، به ترتیب در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند [14]. بر این اساس درخت رویداد ترسیم شده است (شکل ۴). سپس با توجه به بروز و یا عدم بروز شرایط ایجاد کننده و یا بازدارنده، احتمال رویداد پیامدها طبق نظر متخصصین محاسبه شد.

### یافته‌ها

نتایج بررسی‌ها مربوط به ارزیابی ریسک خطوط لوله گاز آماک و نفت بنگستان با کاربرد روش Bow-tie فازی به شرح زیر است:

- ۱- نتیجه بررسی مشخصات خطوط لوله مورد مطالعه شامل خط لوله گاز آماک و خط لوله نفت بنگستان در جداول ۴ و ۵ ارایه شده است.
- ۲- نتیجه بررسی علل پایه بر اساس تهیه چک لیست و نظرسنجی از متخصصین مشتمل بر ۳۱ علت پایه مشخص شده در رهائش گاز و



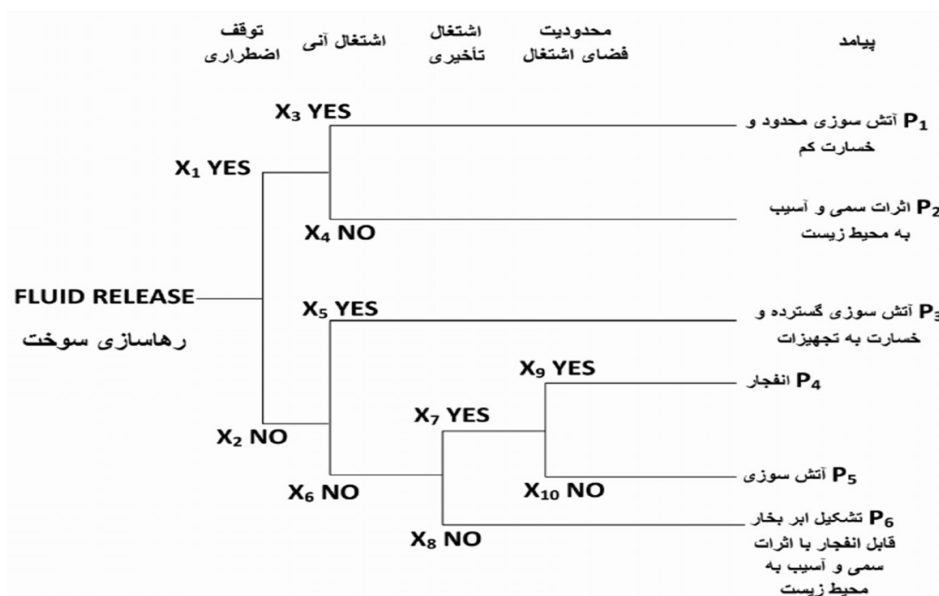


شکل ۳. درخت خطا علل پایه در رهائش گاز و نفت

### بحث و نتیجه گیری

می‌باشند. به طوری که موارد مزبور دارای بیشترین اثر در ایجاد رویداد راسی هستند. به این ترتیب مشخص گردید که احتمال وقوع رویداد رأس برابر با  $0/327$  و احتمال عدم وقوع آن  $0/672$  می‌باشد. همچنین حذف بحرانی ترین برش‌های کمینه موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم شدند، به طوری که با حذف  $(X_{2-1}^1)$  قابلیت اطمینان به  $0/951$  رسید. با توجه به برابر بودن احتمال شکست هر ۳ برش کمینه (معادل  $0/484$ )، حذف

با توجه به نتایج تحقیق و درخت خطای رسم شده و با در نظر گرفتن مقادیر کمی احتمال خطا و احتمال رویدادهای پایه (جدول ۱۱ و ۱۲)، مبتنی بر رویداد اصلی و نتایج محاسبات انجام شده از رابطه فاسل-وسلی، ملاحظه می‌شود که برش‌های کمینه، سه برش کمینه بحرانی یعنی آسیب عمدی یا غیر عمدی افراد به خطوط، نقص مواد اولیه سازنده خطوط و نقص مکانیکی لوله‌ها



شکل ۴. درخت رویداد

جدول ۹. وزن کارشناسان انتخابی

مجموع	ضریب وزنی متخصص	شاخص	مقام سازمانی	شاخص	تحصیلات	شاخص	تجربه	شاخص	سن	متخصصان
۰/۳۷۱	۱۳/۳۵	۲	سرپرست	۳	لیسانس	۴	۳۱	۴	۵۵	متخصص اول
۰/۳۴۳	۱۲/۳۵	۲	سرپرست	۴	فوق لیسانس	۳	۲۷	۳	۵۰	متخصص دوم
۰/۲۸۶	۱۰/۳۵	۱	اپراتور	۴	فوق لیسانس	۲	۱۷	۳	۴۲	متخصص سوم

جدول ۱۰. اجماع نظر متخصصان با اعداد فازی

متخصصان	V <sub>L</sub>	L	M	H	V <sub>H</sub>
متخصص اول	$6.04 \times 10^{-6}$	$1.78 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-3}$	$9.42 \times 10^{-3}$	$3.93 \times 10^{-2}$
متخصص دوم	$5.60 \times 10^{-6}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$1.71 \times 10^{-3}$	$8.71 \times 10^{-3}$	$3.63 \times 10^{-2}$
متخصص سوم	$4.66 \times 10^{-6}$	$1.37 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-3}$	$7.26 \times 10^{-3}$	$3.03 \times 10^{-2}$

نتایج تحقیق همچنین مبین این است که اثرات سمی و آسیب به محیط زیست که در صورت رهاسازی نفت/گاز و عمل کردن سیستم توقف اضطراری روی می دهد، محتمل ترین پیامد بوده و

هر یک از آن ها باعث افزایش قابلیت اطمینان رویداد رأس تا میزان ۹۵۱٪ بود و این در حالی است که تأثیر دیگر برش های کمینه فاقد اهمیت در این رابطه بودند.

جدول ۱۱: قابلیت اطمینان رویداد رأس، احتمال بروز آن قبل و بعد از حذف برش های کمینه بحرانی

MCS	احتمال شکست TE	قابلیت اطمینان TE	درصد اهمیت	
TE	۰/۳۲۷۹۴۶۲	۰/۶۷۲۰۵۳۸		
$X_1 -2-1$	$۴/۸۴ \times 10^{-2}$	۰/۹۵۱۶	۱۲.۳۲٪	۱
$X_1 -1-1$	$۴/۸۴ \times 10^{-2}$	۰/۹۵۱۶	۱۲.۳۲٪	۲
$X_1 -1-1$	$۴/۸۴ \times 10^{-2}$	۰/۹۵۱۶	۱۲.۳۲٪	۳

جدول ۱۲: احتمال بروز پیامدها

پیامدها	احتمالات
آتش سوزی محدود و خسارت کم $P_1$	$۳/۷۶۹ \times 10^{-3}$
اثرات سمی و آسیب به محیط زیست $P_2$	۰/۳۶۷۷۴
آتش سوزی گسترده و خسارت به تجهیزات $P_3$	$۳/۳۶۵ \times 10^{-5}$
انفجار $P_4$	$۱۰^{-4} \times ۱/۲۴۹$
آتش تویی $P_5$	$۱۰^{-5} \times ۷/۰۴۶۸$
تشکیل ابر قابل انفجار با اثرات گسترده سمی و آسیب به محیط زیست $P_6$	$۱۰^{-3} \times ۳/۲۷۶۴$

و یا فاقد اطمینان می باشند. این در حالی است که استفاده از مدل Bow-tie در تلفیق با منطق فازی (F.Bow-tie)، منجر به رفع نقیصه یا ضعف یاد شده در استفاده از روش های درخت خطا و درخت واقعه می شود. در این باره پدرونی و همکارانش [9] براساس بررسی انجام شده پیشنهاد استفاده از درخت خطای پویا (دینامیک) و قانون بیز را ارایه نموده اند.

### تشکر و قدردانی

لازم می دانم از استاد محترم جناب آقای دکتر قدوسی به دلیل راهنمایی های ارزشمند و در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز تحقیق، قدر دانی و تشکر نمایم.

در عین حال پیامد انفجار که در صورت عمل نکردن سیستم توقف اضطراری، محدودیت فضای انتشار مواد سوختی و تاخیر زمانی در اشتعال ممکن است روی دهد، دارای کمترین احتمال است.

نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از این می باشد که به دلیل یکسان بودن احتمال تمامی رویدادهای پایه در درخت خطا، امکان محاسبه میزان احتمال رویداد راسی با استفاده از مدل میسر می گردد. بنابراین می توان نتیجه گیری نمود که در صنعت نفت و گاز به دلیل این که بسیاری از رویدادهای پایه، دارای میزان شکست معینی نمی باشند و یا داده های کافی جهت محاسبه آنها موجود نیست، در نتیجه استفاده از درخت خطا و درخت واقعه غیر ممکن بوده و یا نتایج حاصل از استفاده از آنها دارای دقت کافی نبوده

## ☰ REFERENCES

- [1]. Brito AJ, DeAlmeida AT. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering and System Safety*. 2009;94:187-198.
- [2]. Clemen RT, Winkler RL. Combining probability distribution from experts in risk analysis. *Risk Analysis*. 1999;19:187-203.
- [3]. Dawotola AW, Vrijling JK. Decision Analysis Framework for Risk Management of Crude Oil Pipeline System. *Decision Sciences*. 2011;17:456-824.
- [4]. DianousV, Fiévez C. a more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 130(3):220-233.
- [5]. Duijm NJ. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. *Reliability Engineering and System Safety*. 2009;94(2):332-341.
- [6]. Miri Lavasani, Wang Z, Yang J. Application of Fuzzy Fault Tree Analysis on Oil and Gas Offshore Pipelines. *Liverpool Logistics, Offshore and Marine(LOOM) Research Institute*. 2011: L3 3AF.
- [7]. Motamedzadeh M, Mohamadfam I, Hamidi Y. Health, safety and environment risk assessment in gas pipelines by indexing method: case of Kermanshah Sanandaj oil pipeline. *Iran Occupational Health Journal*. 2009;6(3):58-66(in Persian)
- [8]. Muhlbauer K. Pipeline Risk Management Manual Ideas, Techniques and Resources. Elsevier Inc. 2004.
- [9]. Pedroni N, Zio E. Uncertainty analysis in fault tree models with dependent basic events. *Risk Analysis*. 2013;33(6):1146-1173
- [10]. Rausand M. Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications: 56-57
- [11]. Renjith VRG, MadhuVLG, Nayagam, Bhasi. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 183:103-110.
- [12]. Restrepo CE, Simonoff JS, Zimmerman R. Cost consequences and risk implications of accidents in US hazardous liquid pipeline infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructure protection*. 2009;2:38-50.
- [13]. Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 1988;27:87-89.
- [14]. Sklavounos S, Rigas F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2006;19:24-31.
- [15]. Zhang X, Liue p. Method for aggregating triangular fuzzy intuitionist fuzzy information and its application to decision making. *Baltic Journal on Sustainability*. 2010; 16(2): 280-290.

## Risk assessment in gas and oil pipelines based on the fuzzy Bow-tie technique

P. Heyrani<sup>1\*</sup>, A. Baghaei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Health, Safety and Environmental Management, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Chemical Engineering Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

### Abstract

**Introduction:** Nowadays, gas and oil account for 60 percent of world energy resources. Transporting crude oil and its products are accomplished through a number of ways among which pipelines are of the utmost significance. Considering the extent of pipelines in installation and residential areas and also high potential for damage, the safety of these pipes and application of risk management principles have undeniable importance. Bow-tie risk assessment method is one of the ways to determine safety level. The tool is a qualitative and semi-quantitative method the data of which are implemented by specialists and experts via conducting surveys.

**Material and Method:** In the present study, Bow-tie technique was employed having been combined with fuzzy logic in which Likert Scale was applied to quantify the qualitative (verbal) data to reduce the uncertainty of risk evaluation of Amaak No.10 gas pipeline and Bongestan No.12 petroleum pipeline. In this way, factors affecting the pipeline safety were at first, recognized through the checklists. Then, the risk evaluation of pipelines was conducted using the mentioned method.

**Result:** The results of the study showed that third party damages, initial defects in materials, and constructing pipeline with failure possibility of 0.0484 stood at the highest in terms of importance (equivalent to 12.32%) in destroying oil and gas pipelines. In addition, the toxic impacts and environmental damages with occurrence possibility of 0.00327 were the most striking consequences of gas and oil leakage based on event tree analysis.

**Conclusion:** Considering the recognized factors leading to destruction of pipelines and their most notable outcomes, instructions on how to control and reduce the potential consequences were suggested, with emphasis on the removal of the most probable causes.

**Keywords:** Gas and Oil Pipelines Safety, Fuzzy Bow-Tie, Fault Tree, Event Tree, Instructions on Reducing Consequences

\* Corresponding Author Email: [p\\_heirany@yahoo.com](mailto:p_heirany@yahoo.com)