

شناسایی و ارزیابی کمی ریسک خطوط لوله گاز شهری و تعیین مناطق حساس با ارائه مدلی تلفیقی

محمدتقی قندهاری^{1*}، منصور مؤمنی²، محمدرضا مهرگان³

- 1- مری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، اقتصاد و حسابداری، دانشگاه پیام نور، اصفهان، ایران
- 2- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- 3- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: 1397/7/5

پذیرش: 1397/9/20

چکیده

امروزه، خطوط لوله گاز یکی از کانون‌های حادثه‌خیز است؛ به طوری که حوادث آن می‌تواند پیامدهای گوناگونی در ابعاد مختلف انسانی، اجتماعی، مالی، سیاسی یا زیست‌محیطی داشته باشد. به همین جهت، مدیریت و ارزیابی ریسک یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها برای شبکه‌های خطوط لوله گاز طبیعی مخصوصاً در شهرها است. این پژوهش یک برنامه جامع ارزیابی کمی ریسک برای خطوط لوله و شبکه توزیع گاز که از مناطق حساس و پرجمعیت می‌گذرند، پیشنهاد می‌کند. بدین منظور پس از بخش‌بندی شبکه‌ی خطوط در منطقه موردنظر با شاخص‌های مناسب، سناریوهای حوادث مختلف ممکن در رابطه با نشت گاز توسط فنون FMEA و ETA شناسایی شده و احتمالات و پیامدهای نهایی این سناریوها در ابعاد مختلف انسانی، مالی و اجتماعی به دست آورده می‌شوند. برای انجام این کار، نرم‌افزار شبیه‌ساز حوادث مرتبط با نشت مواد سمی جهت به دست آوردن پیامدهای انسانی استفاده شده است. سپس با استفاده از مفاهیم نظریه مطلوبیت، توابع مطلوبیت پیامدها استخراج شده و به وسیله آن‌ها و احتمالات محاسبه‌شده، ریسک بخش‌ها در رابطه با هر سناریو با واحد یکسان به دست می‌آید و بخش‌های مختلف منطقه موردنظر از لحاظ ریسک رتبه‌بندی می‌شوند. مراحل مدل ارائه‌شده برای شبکه توزیع گاز شهر

اصفهان، با تقسیم آن به 21 بخش، تشریح و بر اساس آن، ریسک بخش‌ها به صورت عددی محاسبه و از لحاظ ریسک رتبه‌بندی شده است.

واژگان کلیدی: ارزیابی کمی ریسک؛ شبکه خطوط لوله گاز؛ تحلیل درخت رویداد؛ نظریه مطلوبیت؛ حوادث نشست گاز.

1- مقدمه

به خاطر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گاز طبیعی و نیز ویژگی‌های خطوط لوله، حوادث خطوط لوله حمل‌کننده گاز از حوادث صنایع دیگر کاملاً متفاوت است. وقتی خطوط لوله دچار نقص و شکستگی می‌شوند، باعث حوادث و خرابی‌های بسیار و اثر دومینویی می‌شوند [1]. در سال‌های اخیر، مسئولان بیش‌ازپیش به مسائل ایمنی خطوط لوله انتقال گاز طبیعی، آگاه شده‌اند؛ به همین جهت، تجزیه و تحلیل ریسک خطوط لوله گاز مورد توجه قرار گرفته و رویکردهای مربوط به شناسایی و تعیین ریسک‌های خطوط لوله گاز طبیعی به خصوص ارزیابی و تجزیه و تحلیل کمی ریسک خطوط لوله گاز، بسیار به کار برده شده‌اند [2].

ما در این پژوهش در پی آنیم که مدیریت ریسک خطوط لوله گاز شهری را در مراحل شناسایی حوادث بالقوه و نیز پیامدهای آن‌ها به صورت کمی مورد بررسی قرار دهیم. همچنین از آنجاکه هر شرکت جهت اجرای اقدامات پیشگیرانه در رابطه با ریسک، دارای محدودیت منابع مالی، نیروی انسانی، تجهیزات و ... است، اولویت‌بندی ریسک‌ها ضروری است؛ این موضوع در پژوهش جاری مورد توجه قرار گرفته است. به علاوه، رویکرد کمی و مدلی که در اینجا جهت محاسبه ریسک و طبقه‌بندی استفاده شده است، همزمان جنبه‌های گوناگون پیامدهای حوادث، مانند ابعاد انسانی، مالی و اجتماعی را مدنظر قرار داده است. در ضمن از آنجاکه کسب نظر افراد خبره و تصمیم‌گیری گروهی، یکی از مهم‌ترین اقداماتی است که باعث ارتقای اعتبار تصمیم‌ها می‌شود [3]، در مراحل مختلف مدل ارائه شده، نظرات مدیران و مسئولان درگیر در نگهداری خطوط لوله مورد توجه جدی قرار گرفته است. جهت دستیابی به اهداف مذکور و نیز ارزیابی مدل ارائه شده، شبکه توزیع لوله گاز منطقه جنوب شهر اصفهان پس از جلسات با متخصصین این شرکت، برای انجام این پروژه انتخاب شد و بخش‌های مختلف این شبکه از لحاظ ریسک طبقه‌بندی شدند.

2- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ریسک و مفاهیم مرتبط با آن. ریسک، تأثیر منفی به کارگیری یک ضعف تعریف شده است که با در نظر گرفتن احتمال و تأثیر آن رویداد حاصل می‌شود. روش ایمنی صنعتی نیز ریسک را به عنوان «حاصل ضرب احتمال وقوع یک رویداد در یک دوره معین در پتانسیل خسارت در هنگام وقوع آن رویداد تعریف می‌کند» [4].

تمامی اشکال ریسک شامل عناصر مشترکی هستند که به ترتیب عبارت‌اند از: محتوا، فعالیت، شرایط و پیامدها. محتوا یعنی زمینه، وضعیت یا محیطی که ریسک در آن منظور شده و مشخص‌کننده فعالیت‌ها و شرایط مرتبط با آن وضعیت است. عنصر فعالیت یعنی عمل یا اتفاقی که باعث ریسک می‌شود. شرایط تعیین‌کننده وضعیت جاری یا یک مجموعه از اوضاع و احوال است که می‌تواند به ریسک منجر شود. پیامدها، به عنوان آخرین عنصر ریسک، نتایج یا اثرات بالقوه یک فعالیت در ترکیب با یک شرط یا شرایط خاص است [5].

برخی از روش‌هایی که به شناسایی ریسک‌های ناشی از حوادث مختلف در سیستم می‌پردازند، به ترتیب زیر هستند که در این پژوهش، برخی از این روش‌ها در مراحل اولیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند [6]:

چک‌لیست ایمنی، بازرسی در محل، تحلیل آماری خسارت‌های گذشته، مرور ایمنی، رتبه‌بندی نسبی تحلیل پرسش، روش What-If، تحلیل مقدماتی خطر (PHA)¹، مطالعه عملیات و خطر (HAZOP)²، ردیابی انرژی و تحلیل حفاظ‌ها (ETBA)³، تحلیل خطرات سیستم و زیرسیستم (SSHA & SHA)، حالات شکست و تحلیل اثرات آن (FMEA)⁴، تحلیل قابلیت اطمینان انسانی (HRA)⁵، تحلیل خطرات عملیات و پشتیبانی (OSHA)⁶، تحلیل خطرات کارکردی (FHA)⁷، تحلیل درخت خطا (FTA)⁸، تحلیل درخت رویداد (ETA)⁹ و تحلیل علت-پیامد (CCA)¹⁰.

1. Preliminary Hazard Analysis
2. Hazard and Operability Studies
3. Energy Trace & Barrier Analysis
4. Failure Mode Effect Analysis
5. Human Reliability Analysis
6. Operating and Support Hazard Analysis
7. Functional Hazard Assessment
8. Fault Tree Analysis
9. Event Tree Analysis
10. Cause-Consequence Analysis

مدیریت ریسک. مدیریت ریسک فرآیند شناسایی، ارزیابی و کم کردن ریسک به‌منظور رسیدن به سطح قابل‌قبول است [7]. در مرحله اول فرآیند مدیریت ریسک، کلیه ریسک‌های سازمان شناسایی می‌شوند و سپس در مرحله دوم فرآیند یعنی ارزیابی ریسک، تخمینی از فراوانی و شدت خسارت‌های توانمند، صورت می‌گیرد که به‌این‌ترتیب، مدیریت ریسک اطلاعاتی را در رابطه با تعیین اهمیت ریسک‌های شناسایی‌شده و انتخاب روش‌های خاص برای کارگردانی این ریسک‌ها به‌دست می‌آورد. انجام پژوهش حاضر در راستای اهداف همین مرحله است. برای مرحله ارزیابی ریسک باید سه عامل موردتوجه قرار گیرند: دفعات وقوع خسارت، حداکثر خسارت محتمل و حداکثر خسارت ممکن [3].

در اکثر منابع به‌منظور ارزیابی (اندازه‌گیری) ریسک از دو معیار «میزان تأثیر» و «احتمال وقوع» ریسک استفاده شده است. هر دو معیار فوق را می‌توان به‌خوبی به‌صورت معیارهای کیفی یا کمی در ارزیابی ریسک‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها مورد استفاده قرار داد [8] که در این پژوهش نیز همین دو معیار برای ارزیابی ریسک مدنظر قرار گرفته است.

ارزیابی ریسک در خطوط انتقال و شبکه لوله‌گاز. اگرچه خطوط لوله یکی از ایمن‌ترین روش‌های انتقال مواد گازی است که فراوانی حوادث در آن از روش‌های انتقال جاده‌ای یا ریلی بسیار کمتر است، با این‌وجود خرابی‌هایی که گاهی در این خطوط ایجاد می‌شوند، منجر به پیامدهای گوناگون و بعضاً بسیار ناراحت‌کننده می‌گردند [9].

باید توجه داشت که میان خطوط انتقال گاز و شبکه‌گاز تفاوت وجود دارد. در این تحقیق، شبکه‌های گاز شهری مدنظر است. شبکه‌های گازرسانی به مجموعه‌ای از ایستگاه‌های تقلیل فشار شهری، ایستگاه‌های حفاظت از زنگ، ایستگاه‌های آزمون و شبکه گسترده‌ای از لوله‌های زیرزمینی که در سطح شهر پراکنده‌اند، اطلاق می‌شود.

در سال‌های اخیر در دنیا ارزیابی و تجزیه و تحلیل کمی، ریسک خطوط لوله گاز بسیار به‌کار برده شده است [2]، اما در ایران تحقیقات اندکی در شناسایی و ارزیابی ریسک خطوط لوله گاز صورت پذیرفته است. در این رابطه می‌توان به پژوهش‌های خارجی و داخلی زیر به‌عنوان نمونه اشاره کرد.

آلونسو در سال‌های 2000 و 2006 و 2008 به بررسی حوادث و پیامدهای خرابی خطوط لوله گاز به‌خصوص انفجارات آن پرداخته است [10، 11 و 12]. کروگر و اسمیت در سال 2003 با تجزیه و تحلیل کمی، خطرات و حوادث ناشی از آتش در خطوط لوله گاز را مورد کاوش قرار دادند [13]. همین‌طور لو و همکارانش در سال 2006 به‌صورت کمی

خطرات انتشار گاز از خطوط لوله را بررسی کردند [14]. اسکلاونس و ریگاس در همان سال علاوه بر بررسی سناریوهای حوادث خطوط لوله گاز، منطقه خطر و فاصله ایمن از این خطوط را تعیین نمودند [15]. همچنین در رابطه با ریسک و حوادث شبکه توزیع گاز شهری نیز پژوهش‌های مختلفی صورت پذیرفته است. مثلاً پارک و همکاران در سال 2004 با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای، فراوانی حوادث و پیامدهای هزینه‌ای خطوط لوله گاز شهری را مورد تحلیل قرار دادند [16].

علاوه بر این، فنون کمی تصمیم‌گیری برای ارزیابی ریسک‌های خطوط لوله گاز و رتبه‌بندی آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. پی.کی.دای در سال 2001 با استفاده از تکنیک AHP و نیز تالر و همکاران در سال 2004 با روش الگوریتم ژنتیک، ریسک‌های خطوط لوله گاز را ارزیابی کردند [17]. آلمیدا نیز در سال‌های 2010، 2015، 2016 و 2009 با روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره نظیر ELECTRE TRI به ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های خطوط لوله گاز پرداخت [18، 19 و 20]. ژئو و همکارانش در سال 2016 با روشی نوین مبتنی بر استنتاج ابری، ریسک‌های خطوط لوله گاز را ارزیابی کردند. آن‌ها عواملی مثل صدمات ناشی از عامل غیرطبیعی، معایب طراحی، فرسایش زیستی، عوامل مربوط به عمر تجهیزات و... را در مدل خود مدنظر قرار دادند. آن‌ها از مبدل ابر طبیعی و ابر مجازی برای ارزیابی خود از ریسک به همراه فنونی مثل AHP استفاده کردند [21].

در ایران نیز پژوهش‌هایی در رابطه با ریسک و مدیریت ریسک خطوط لوله گاز صورت پذیرفته است. به‌عنوان نمونه، جوزی و ایران‌خواهی در تحقیق خود به ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی خطوط لوله انتقال گاز با استفاده از روش تلفیقی AHP پرداختند [22]. در پژوهشی که میراج و همکاران انجام دادند با بررسی شاخص‌های تأثیرگذار در عوامل احتمال و شدت و نیز وزندهی به هر یک از این شاخص‌ها، ریسک‌های خطوط لوله را رتبه‌بندی کردند. باقری و همکاران با استفاده از ارزیابی کمی ریسک¹، حریم ایمن خطوط انتقال لوله گاز را تعیین نمودند [23]. همچنین حیرانی و بقایی در پژوهش خود به ارزیابی ریسک خطوط لوله انتقال نفت و گاز بر مبنای روش Bow-tie فازی شده پرداختند. آن‌ها با استفاده از این روش

که یک روش کیفی نیمه کمی است، دریافتند عوامل شخص ثالث، نقص اولیه در مواد و ساخت خط لوله دارای بالاترین اهمیت در تخریب خط لوله انتقال گاز و نفت است [24]. البته در ایران در رابطه با ریسک‌های شبکه گاز شهری تحقیقات اندکی صورت پذیرفته است که به‌عنوان نمونه می‌توان به پژوهش شهرخی و قریشی در سال 1390 اشاره کرد که به تحلیل ریسک حوادث در مهندسی هم‌زمان و اجرای آن برای یک ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری (به‌عنوان بخشی از شبکه توزیع گاز شهری) پرداخته است [25].

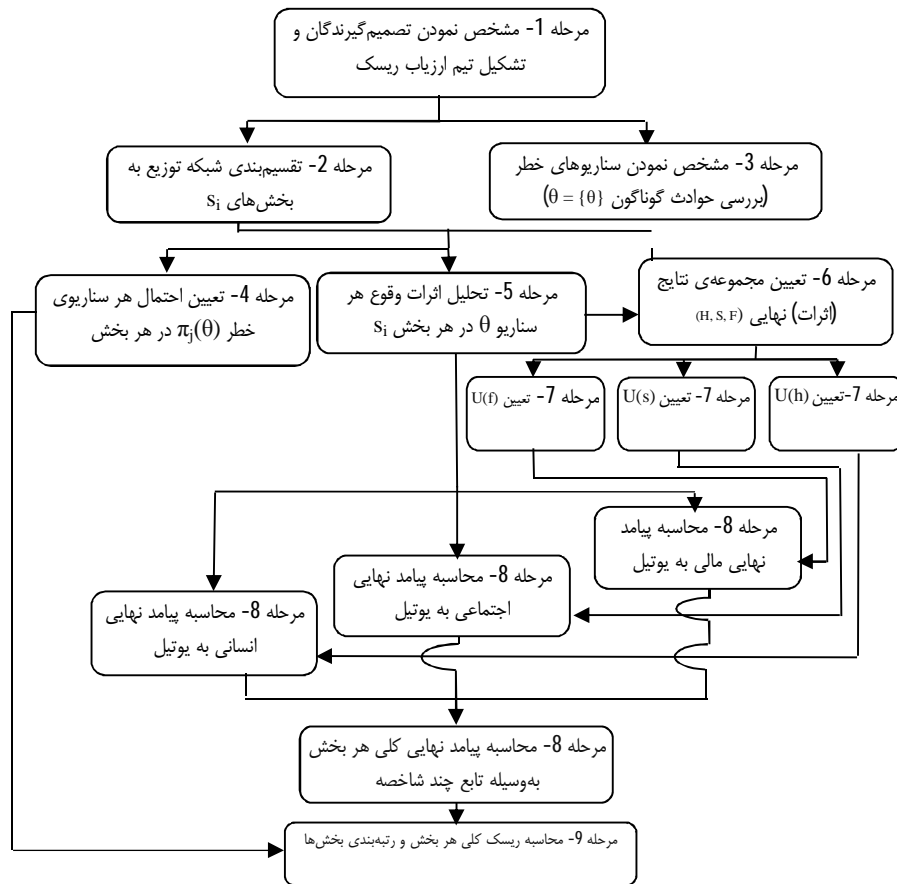
3- روش‌شناسی پژوهش

از آنجاکه این پژوهش در پی شناسایی حوادث مربوط به شبکه لوله گاز و محاسبه ریسک‌های مربوط به آن به‌صورت کمی است، از منظر هدف در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد. همچنین بر اساس ماهیت و روش گردآوری داده‌ها یک پژوهش توصیفی-پیمایشی است. به‌علاوه به دلیل این‌که مدل پیشنهادی در رابطه با شبکه‌های لوله توزیع گاز جنوب شهر اصفهان به‌کار گرفته و بررسی شد، پژوهش را می‌توان از نوع مطالعه موردی دانست. همچنین جهت گردآوری داده‌ها، از مطالعات کتابخانه‌ای، مستندات شرکت گاز، مصاحبه با خبرگان، مشارکت در پژوهش و مشاهده استفاده شده است.

مراحل مدل پیشنهادی پژوهش. برای دستیابی به هدف پژوهش یعنی شناسایی حوادث و محاسبه ریسک مربوط به شبکه لوله گاز، مدلی شامل مراحل زیر، ارائه می‌شود. شکل 1 مراحل مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مرحله 1. مشخص کردن تیم تصمیم‌گیری. مدیر عملیات، مدیر نگهداری و ایمنی خطوط لوله گاز، کارشناسان واحد HSE، متخصصین واحد امداد و بهره‌برداری، کارشناس واحد نشت‌یابی و مهندسین واحد طراحی به‌عنوان اعضای تیم تصمیم‌گیری محسوب می‌شوند.

مرحله 2. بخش‌بندی شبکه لوله توزیع گاز. با تقسیم‌بندی شبکه توزیع گاز برای هر بخش می‌توان استراتژی‌های متناسب جهت کاهش ریسک را اتخاذ نمود؛ لذا یک مجموعه مجزا از بخش‌های خط لوله را متناسب با ویژگی‌های خاص هر بخش به‌دست خواهیم آورد و مجموع آن‌ها با شبکه منطقه موردنظر برابر است $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$.



شکل 1 مراحل شناسایی و تعیین ریسک بخش‌های شبکه لوله گاز

مرحله 3. تعریف سناریوهای خطر (θ_i) . در اینجا، حالات مختلف مخاطرات ممکن برای شبکه لوله گاز شناسایی می‌شوند. خطر به معنی حادثه، پیامد، پدیده یا علت خسارت است. استفاده از روش‌هایی مثل FMEA و روش تجزیه و تحلیل درخت رویداد (ETA)، برای دستیابی به این منظور، مفید هستند.

مرحله 4. تعیین احتمال هر سناریوی خطر در هر بخش. داده‌های تاریخی و گزارش‌های نشت و حوادث، دانش متخصصین، داده‌های استاندارد و بین‌المللی یا ترکیبی از این روش‌ها، در تعیین احتمال هر یک از سناریوهای خطر ما را یاری

می‌دهند. در این پژوهش، احتمالات هر سناریو که به‌عنوان معکوس فراوانی هر سناریو در هر بخش برآورد شدند، با $\pi_j(\theta)$ نشان داده می‌شود.

مرحله 5. تجزیه و تحلیل اثرات ناشی از وقوع سناریوها بر هر بخش. استفاده از روش‌ها و فرمول‌های ریاضی و نیز برنامه‌های شبیه‌سازی در تعیین پیامدهای حاصل از سناریوهای مختلف در بخش‌های گوناگون شبکه لوله گاز نقش اساسی دارند. محاسبه قدرت انفجار، تشعشعات آتش‌سوزی‌ها و میزان غلظت نشت گاز در قسمت‌های گوناگون تنها با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی امکان‌پذیر خواهد بود. در این پژوهش، نرم‌افزار شبیه‌ساز ALOHA برای انجام شبیه‌سازی وقوع هر سناریوی حادثه در هر بخش استفاده شده است.

مرحله 6. تعیین مجموعه پیامدهای نهایی (انسانی، اجتماعی، مالی). بعد از شبیه‌سازی حوادث باید پیامدهای آن در ابعاد صدمات انسانی (H)، خسارت‌های مالی (F) و اجتماعی (S) محاسبه شود. اهمیت بعد آسیب‌های انسانی بیشتر بوده که در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ALOHA و همچنین محاسبات تکمیلی با استفاده از فرمول‌های مربوط به تشعشعات و فشار ناشی از انفجار و میزان تأثیر گاز سمی، و با استفاده از جداول مربوطه (جدول PROBIT) با واحد احتمال آسیب‌دیدگی حداقل سوختگی درجه دو برای یک نفر در شعاع صد متری محل حادثه، حاصل شده‌اند.

مرحله 7. استخراج توابع مطلوبیت. با استفاده از نظریه مطلوبیت¹ و نیز نتایج حاصل از مرحله قبل و همچنین برگزاری قرعه‌های مختلف برای تیم تصمیم‌گیرنده، توابع مطلوبیت تک‌شاخصه در هر یک از ابعاد (هر بعد به‌عنوان یک شاخص مدنظر قرار گرفت) به دست می‌آید. با به دست آوردن مطلوبیت هر پیامد نقاطی با مختصات میزان پیامد و مطلوبیت آن به دست خواهد آمد که نرم‌افزار Curve Expert می‌تواند برای برازش بهترین تابع این نقاط، مورد استفاده قرار گیرد. سپس با استفاده از روش SMART، ضرایب مربوط به هر تابع تک‌شاخصه محاسبه و در نهایت، تابع مطلوبیت چند شاخصه حاصل می‌شود.

1. Utility theory

مرحله 8. محاسبه پیامدهای نهایی هر بخش با واحد یکسان (یوتیل). هر یک از ابعاد پیامدهای مختلف دارای واحد مختلفی هستند که جهت ترکیب، نیاز به ابزاری دارند. تابع مطلوبیت چند شاخصه حاصل شده در مرحله قبل به عنوان ابزاری جهت محاسبه و ترکیب پیامدهای مختلف به کار گرفته می شود. بدین ترتیب برای هر سناریو در هر بخش، یک پیامد نهایی با واحد یکسان یوتیل در اختیار خواهیم داشت.

مرحله 9. محاسبه ریسک. با ترکیب پیامد نهایی محاسبه شده در مرحله قبل برای هر سناریوی حادثه در هر بخش و احتمالات سناریوها (محاسبه شده در مرحله چهارم)، ریسک در هر بخش شبکه توزیع گاز محاسبه می شود. از آنجاکه ریسک به دست آمده به صورت کمی است، می توان بخش های مختلف را به ترتیب از لحاظ ریسک رتبه بندی کرد.

4- تحلیل داده ها و یافته های پژوهش

منطقه جنوب اصفهان به دلیل دارا بودن شرایط خاص همچون تنوع مناطق مانند وجود ادارات، دانشگاه ها، پادگان های نظامی، مراکز صنعتی و فضای سبز در این منطقه و نیز اهمیت ویژه امنیت شبکه لوله گاز به دلیل وجود مناطق توریستی و تاریخی در آن و دیگر موارد، برای انجام پژوهش مناسب تشخیص داده شد. همچنین تیم تصمیم گیرنده متشکل از هفت نفر از واحدهای HSE، امداد و بهره برداری، که در تمامی مراحل پروژه حضور فعال داشتند، تشکیل شد. مراحل کار مطابق با مدل ارائه شده به شرح زیر است:

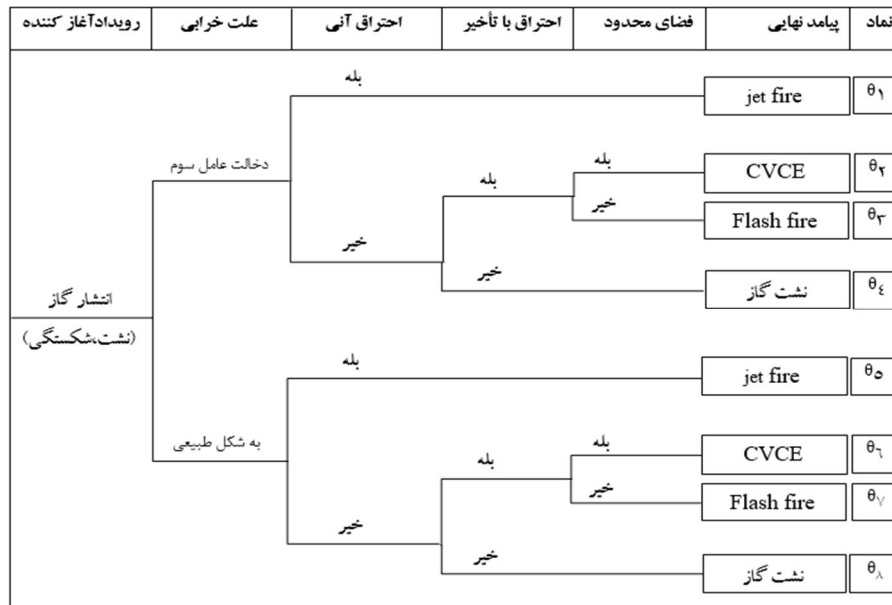
بخش بندی شبکه توزیع گاز. شاخص هایی مانند موقعیت جغرافیایی بخش، جنس لوله های شبکه گاز، سن شبکه گاز، نوع منطقه (مسکونی یا غیرمسکونی)، وضعیت حفاظت از زنگ، نوع پوشش شبکه لوله، انواع لوله در شبکه، وجود و تعداد ایستگاه های تقلیل فشار و ایستگاه های حفاظت از زنگ (CPS) و ایستگاه های تست (TP)، تعداد شیرها و حوضچه ها، و پمپ های گاز CNG در هر بخش، مبنای تقسیم بندی در این پروژه بوده اند که از مستندات شرکت گاز به خصوص نقشه های

شبکه توزیع گاز استخراج شده‌اند. نهایتاً، شبکه توزیع گاز از نظر موقعیت جغرافیایی به 21 بخش کوچک‌تر که از لحاظ مجموع شاخص‌ها همگن‌ترند، تقسیم شدند $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_{21}\}$.

تعریف سناریوهای خطر. از آنجاکه یک تحلیل درخت رویداد (ETA) یک محصول قیاسی است که همه خروجی‌های ممکن ایجادشده از یک رویداد حادثه‌ای (راه‌انداز) را نشان می‌دهد، جهت تعریف سناریوهای حادثه بالقوه مورداستفاده قرار گرفت. بدین منظور باید ابتدا رویداد حادثه‌ای اولیه تعیین شود. در این پژوهش، براساس مطالعه‌ای که قبلاً توسط واحد HSE شرکت گاز با روش FMEA صورت پذیرفته بود، نشت گاز به عنوان رویداد اولیه راه‌انداز در نظر گرفته شد. FMEA به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل ایمنی و قابلیت اطمینان محصولات و فرآیندها است که در طیف گسترده‌ای از صنایع مورداستفاده قرار گرفته است، و روشی تحلیلی و متکی بر قانون «پیشگیری قبل از وقوع» است که برای شناسایی عوامل بالقوه خرابی به کار می‌رود [26].

برای ترسیم درخت رویداد، موانع مرتبط با یک رویداد حادثه‌ای به ترتیبی که فعال خواهند شد، باید فهرست شوند؛ مانند سیستم‌های محافظت خودکار و غیره. همچنین رخدادهای یا عوامل اضافی باید با یکدیگر و با موانع فهرست شوند و تا جایی که امکان دارد با توالی که ممکن است رخ دهند، باشند. در اینجا پس از بررسی درخت‌های رویداد ترسیمی برای رویداد اولیه نشت گاز توسط متخصصین در مجلات بین‌المللی [16، 17، 23] و همچنین نظرات کارشناسی متخصصین واحد HSE شرکت گاز اصفهان، درخت رویداد شکل (2) حاصل شد. سناریوهای نهایی عبارت‌اند از: آتش فورانی¹، انفجار ابر گازی²، آتش لحظه‌ای³ و خود نشت گاز بدون انفجار یا آتش که با در نظر گرفتن دو منبع متفاوت نشت اولیه، مجموعاً 8 سناریو شناسایی شد.

1. Jet fire
2. CVCE
3. Flash fire



شکل 2 درخت رویداد برای حوادث شبکه توزیع گاز (ETA)

تعیین احتمال وقوع هر سناریوی خطر در هر بخش ($\pi_j(\theta)$). احتمال هر سناریو باید برای هر بخش S_i محاسبه شود؛ بنابراین ما باید 168 احتمال مختلف را (8 سناریو برای 21 بخش مختلف) محاسبه کنیم. برای این کار ابتدا باید احتمال وقوع رویداد اولیه در درخت رویداد، یعنی نشت گاز به دست آید؛ بدین منظور، دو دسته داده بررسی شد. یکی داده‌های مربوط به نشت‌یابی‌های دوره‌ای صورت پذیرفته طی پنج سال گذشته و دیگری، داده‌های مربوط به حوادث ناشی و غیر ناشی که از دفاتر امداد شرکت گاز منطقه جنوب اصفهان، پس از بررسی بیش از 6000 مورد تماس اخیر مربوط به نشت گاز با واحد امداد استفاده شد. در هر مورد، پس از استخراج داده‌ها از مستندات مرتبط آن‌ها و مکان‌یابی هر ناشی با توجه به بخش‌بندی مدنظرمان، احتمال نشت از طریق تقسیم فراوانی نشت‌ها در هر بخش بر کل فراوانی نشت‌ها در کل منطقه محاسبه شد. نهایتاً، احتمال نشت با میانگین‌گیری از این دو احتمال نشت بدست آمد که در جدول 1 نشان داده شده است.

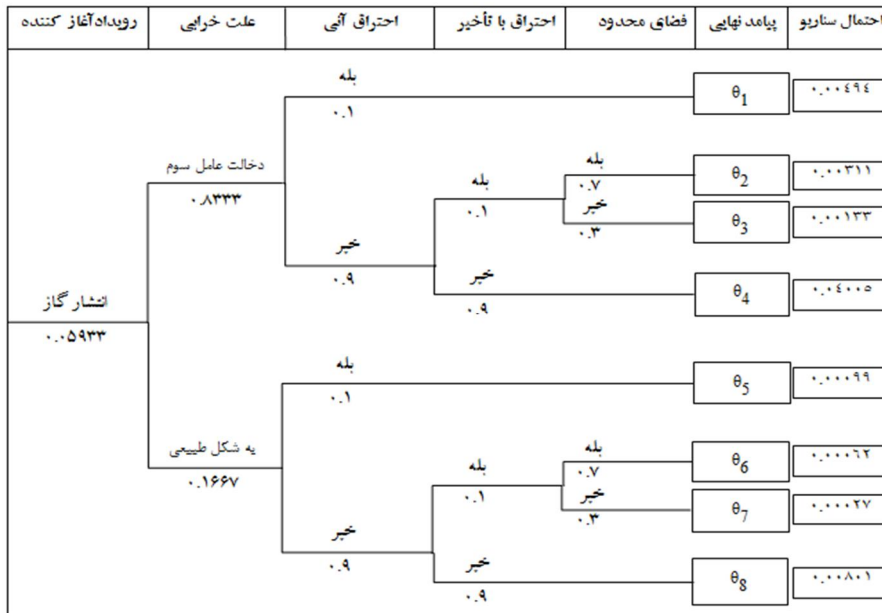
جدول 1 محاسبه احتمال نشت در هر بخش

شماره بخش	احتمال نشت (نشت‌یابی)	احتمال نشت (حوادث)	احتمال نشت (کلی)
بخش 1	0,09235	0,02632	0,05933
بخش 2	0,12554	0,14474	0,13514
بخش 3	0,13276	0,07895	0,10585
بخش 4	0,14719	0,01316	0,08017
بخش 5	0,03319	0,02632	0,02975
بخش 6	0,00433	0,03289	0,01861
بخش 7	0,09380	0,10526	0,09953
بخش 8	0,12266	0,10526	0,11396
بخش 9	0,07071	0,09868	0,08470
بخش 10	0,09380	0,10526	0,09953
بخش 11	0,00866	0,02632	0,01749
بخش 12	0,03319	0,13158	0,08238
بخش 13	0,00289	0,01974	0,01131
بخش 14	0,01443	0,03289	0,02366
بخش 15	0,00289	0,01316	0,00802
بخش 16	0,00289	0,00658	0,00473
بخش 17	0,00289	0,00658	0,00473
بخش 18	0,00722	0,00658	0,00690
بخش 19	0,00289	0,00658	0,00473
بخش 20	0,00289	0,00658	0,00473
بخش 21	0,00289	0,00658	0,00473
جمع	1	1	1

همچنین برای محاسبه احتمال هر سناریو از درخت رویداد استفاده شد. بدین ترتیب که بعد از تعیین احتمال نشت، باید تعیین شود نشت رخ داده در هر بخش، با چه احتمالی به وسیله دخالت عامل سوم (حفاری، بیل مکانیکی، برخورد با علمک و...) یا به وسیله عوامل

طبیعی (فرسایش، خورگی و...) بوده است. بدین منظور از داده‌های مربوط به حوادث نشست استفاده شده است. با تقسیم فراوانی حوادث مربوط به برخورد و ضربه و حفاری هر بخش به کل حوادث نشستی هر بخش، احتمال نشست بر اثر عامل سوم به دست آمده است و با تقسیم فراوانی حوادث مربوط به پوسیدگی و فرسایش و خرابی به کل حوادث نشستی هر بخش، احتمال نشست طبیعی برای هر بخش بدست آمده است.

پس از محاسبه احتمالات مربوط به رویداد اولیه (نشست گاز و نیز نوع آن)، در مرحله دوم پس از تحلیل منطقی وقایع درخت رویداد امکان محاسبات عددی احتمال برای هر سناریو وجود دارد. در محاسبات درخت رویداد ابتدا در اولین شاخه، احتمال مربوط به حادثه ابتدایی نوشته می‌شود. سپس احتمال شاخه بعدی با ضرب احتمال همان شاخه در این عدد به دست می‌آید و به همین ترتیب، احتمال شاخه‌های بعدی از ضرب احتمال آن در عدد به دست آمده از شاخه قبلی محاسبه می‌شود. در شکل (3)، محاسبات مربوط به درخت رویداد اولیه بخش اول به‌عنوان نمونه آورده شده است. برای کلیه بخش‌ها همین محاسبات را با جایگزینی احتمال نشست مربوطه انجام داده و احتمالات سناریوها را برای کلیه بخش‌ها محاسبه می‌کنیم.



شکل 3 درخت رویداد برای محاسبه احتمالات سناریوها در بخش اول

تجزیه و تحلیل اثرات ناشی از وقوع سناریوها در هر بخش. در اینجا ما برخی از بررسی‌های خود را با انجام شبیه‌سازی انفجارها و آتش‌سوزی و نشت گاز به وسیله نرم‌افزار ALOHA نسخه 4/5 انجام دادیم. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی حوادث ناشی از رهایی مواد سمی، منفجره یا آتش و انفجار، و پیامد آن‌ها عرضه شده است. همان‌طور که بیان شد سه دسته پیامدهای انسانی، مالی و اجتماعی در این پژوهش مدنظر قرار گرفت که به ترتیب تشریح می‌شوند.

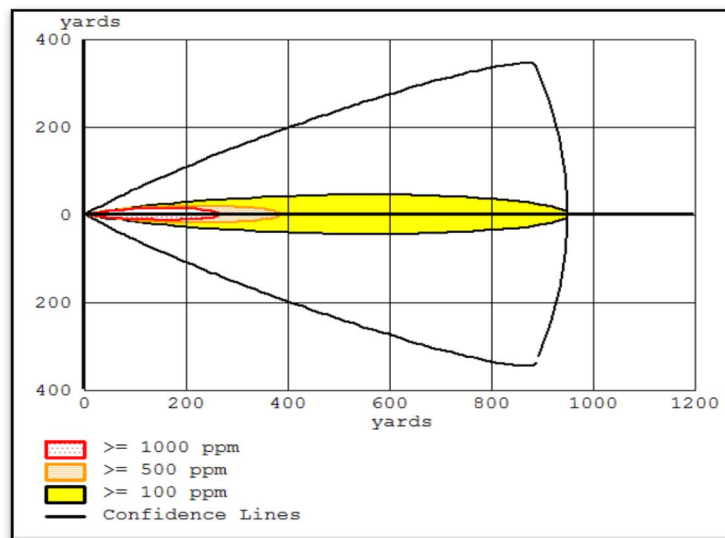
پیامدهای انسانی. برای بررسی پیامد انسانی با توجه به داده‌های در دسترس، واحد احتمال وقوع مرگ یا آسیب با حداقل سوختگی درجه دو برای یک نفر تا شعاع 100 یاردی از محل وقوع حادثه در نظر گرفته شد. برای محاسبه پیامد هر یک از سناریوها اقدامات زیر صورت پذیرفت.

الف) سناریوهای 4 و 8 (انتشار گاز سمی). برای محاسبه پیامد این سناریوها از مفهوم Probit استفاده شد. این مفهوم بیان‌کننده عکس‌العمل متفاوت افراد مختلف در برابر قرار گرفتن مدت معینی در شرایط وجود گاز سمی است. فرمول‌ها و منحنی Probit، استاندارد و از قبل تعیین شده و در دسترس است. منحنی Probit بیان‌کننده دوزهای مختلف یک ماده سمی و احتمال مرگ یا صدمه به فردی است که در محل حادثه حضور دارد؛ لذا با استفاده از معادله زیر برای محاسبه Probit و نیز منحنی آماده مربوطه می‌توان پیامد انسانی را برای انتشار گاز سمی به دست آورد:

$$Y = k_1 + k_2 \ln(C^n \cdot t) \quad \text{رابطه 1}$$

در این معادله، Y مقدار Probit است که با به دست آوردن آن و مکان‌یابی آن در منحنی استاندارد مربوطه می‌توان پیامد انسانی را از لحاظ احتمال مرگ یا صدمه جدی برای یک نفر تا شعاع 100 یاردی محل وقوع حادثه محاسبه کرد. k_1 و k_2 و n نیز ضرایب ثابتی هستند که برای گازهای مختلف، متفاوت هستند. از آنجاکه ماده اصلی تشکیل دهنده گاز طبیعی، متان است، ضرایب مربوط به این گاز در فرمول جایگذاری شد. همچنین C در این فرمول بیان‌کننده غلظت ماده سمی متان تا شعاع 100 یاردی محل وقوع حادثه است که برای محاسبه آن از نرم‌افزار شبیه‌ساز Aloha استفاده شد. برای این کار، شرایط جغرافیایی هر بخش از قبیل سرعت باد، جهت باد،

زبری سطح زمین، ساختمان‌ها و تراکم بخش، دما و رطوبت، کلاس و پایداری هوا و ... به نرم‌افزار داده شد. البته برخی از این خصوصیات در تمام بخش‌ها یکسان است. به علاوه داده‌های مربوط به لوله‌ها از قبیل قطر لوله، فشار گاز، طول لوله، زبری سطح لوله و ... که برای هر بخش اختصاصی است، به نرم‌افزار داده شد. خروجی این نرم‌افزار برای غلظت گاز در نشت گاز بخش 3 در شکل (4) به‌عنوان نمونه ارائه شده است.



شکل 4 خروجی نرم‌افزار Aloha برای غلظت گاز طبیعی پس از نشت در بخش 3

ب) سناریوهای 1 و 5 (جت آتش). محاسبات مربوط به این سناریوها تنها برای خطوط تغذیه گاز بخش‌ها که دارای فشار 250 psi هستند صورت پذیرفته است. برای محاسبه پیامدهای این حادثه‌ها نیز از مفهوم Probit استفاده شده است. فرمول مربوط به Probit در این‌گونه حوادث به‌صورت زیر است:

$$Y = -14.9 + 2.56 \ln \left(\frac{I^{4/3} \cdot t}{10^4} \right) \quad \text{رابطه 2}$$

معمولاً در ارزیابی ریسک، زمان در معرض قرار گرفتن در تشعشع ناشی از جت آتش، 20 ثانیه در نظر گرفته می‌شود. I نیز بیانگر سطوح مختلف تشعشع است که برای محاسبه آن، ناشی از جت آتش در محدوده 100 یاردی از محل وقوع حادثه از نرم‌افزار Aloha، پس از وارد کردن داده‌های مربوط به خطوط لوله تغذیه و خصوصیات جغرافیایی هر بخش، استفاده شده است. نتیجه پیامد انسانی برای جت آتش پس از جایگذاری میزان تشعشع در فرمول و استفاده از منحنی Probit به دست می‌آید.

ج) سناریوهای 2 و 6 (انفجار ابر گازی). برای محاسبه پیامدهای انسانی این دو سناریو نیز تنها خطوط لوله تغذیه مدنظر قرار گرفتند. در اینجا نیز مفهوم Probit با فرمول زیر به کار می‌رود:

$$Y = -77.1 + 6.9 \ln(p^0) \quad \text{رابطه 3}$$

p^0 در این فرمول حداکثر افزایش فشار ایجاد شده ناشی از موج انفجار در یک فاصله خاص است که برای محاسبه آن نیز در هر بخش از نرم‌افزار Aloha استفاده شد.

د) سناریوهای 3 و 7 (آتش ناگهانی). مدت زمان این آتش اندک است، ولی معمولاً شدت تشعشع آن زیاد است. به همین جهت در ارزیابی پیامدهای این نوع آتش‌سوزی فرض می‌شود که اگر افرادی در محدوده تشعشع این آتش باشند، به احتمال بسیار زیاد صدمه جدی می‌بینند و افراد خارج از محدوده کمتر آسیب خواهند دید؛ لذا برای محاسبه پیامد این‌گونه از حوادث تنها به دست آوردن محدوده تشعشع کفایت می‌کند. برای این منظور از نرم‌افزار Aloha استفاده شده است. در ضمن در این حادثه نیز تفاوتی میان محاسبات سناریوهای 3 و 7 وجود ندارد.

سطر دوم جدول 2، میزان پیامدهای انسانی برای بخش 1 را در سناریوهای مختلف (که با روش مذکور بدست آمده)، به عنوان نمونه نشان داده است.

پیامدهای مالی. زیان‌های مالی حوادث شبکه گاز را می‌توان به دلایل آسیب به تجهیزات و مواد اولیه مربوط به لوله‌ها و تجهیزات و تأسیسات، زیان‌های مربوط به فروش کمتر گاز یا سود از دست رفته، پرداخت غرامت به مصرف‌کنندگان بابت قطعی گاز، هزینه نیروی انسانی امداد، غرامت‌های پرداختی بابت آسیب‌های جانی و زیست‌محیطی و... دانست. به دلیل تنوع و گستردگی انواع زیان مالی، در این پژوهش

از برآوردهای کارشناسان مربوطه و همین‌طور نظر اصلاحی تیم تصمیم‌گیری استفاده شده است. به جهت وجود تعداد زیاد برآوردها، تصمیم گرفته شد که برای هر بخش یک پیامد مالی کلی برآورد شده و همین‌طور برای هر سناریو یک وزن خاص در نظر گرفته شود. بدین ترتیب با ضرب وزن در پیامد مالی هر بخش پیامدهای مالی هر سناریو در هر بخش به دست خواهد آمد. به‌طور مثال، سطر چهارم جدول 2 میزان پیامد مالی را برای بخش 1 نشان می‌دهد.

گفتنی است وزن‌های اختصاص داده‌شده به هر سناریو با روش اسمارت به دست آمده‌اند. این روش در سال 1977 توسط Edward توسعه یافت. در اینجا با روش اسمارت برای هر سناریو از لحاظ پیامد مالی به ترتیب اوزان 0/8، 0/6، 0/3، 0/6، 0/8، 0/4 و 0/1 به دست آمد.

پیامدهای اجتماعی. در این پژوهش جهت پیش‌بینی اثرات سناریوهای حوادث در بخش‌های مختلف، از روش مشورت با متخصصین استفاده شد. به دلیل تنوع فرهنگی و میزان درآمد و ثروت مردم بخش‌های مختلف منطقه جنوب اصفهان از یک‌طرف و تأثیرات اجتماعی-روانی متفاوت حوادث مختلف از طرف دیگر، میزان پیامدهای اجتماعی متفاوت خواهد شد. برای سنجش کمی پیامدهای اجتماعی یک طیف 100 واحدی (از صفر یعنی کمترین میزان پیامد اجتماعی تا 100 به معنای بیشترین پیامدهای اجتماعی) با توجه به شاخص‌های بیان‌شده در نظر گرفته شد. تیم تصمیم‌گیری به همراه کارشناسان واحد روابط عمومی و بهره‌برداری و امداد، به هر بخش نمره‌ای را اختصاص دادند. همچنین برای هر یک از سناریوها با توجه به میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر روی شاخص‌های مذکور، وزنی توسط تیم تصمیم‌گیری با روش اسمارت به دست آمد که به ترتیب از سناریوی اول تا هشتم برابر 0/95، 0/9، 0/8، 0/9، 0/95، 0/85 و 0/75 هستند. سطر ششم جدول 2 نتایج مربوط به پیامد اجتماعی را در هر سناریو برای بخش 1 نشان می‌دهد.

استخراج توابع مطلوبیت. برای محاسبه ریسک نیاز است که پیامدهای مختلف با هم ترکیب شوند، اما از آنجا که واحد هر یک از آن‌ها متفاوت است، انجام چنین کاری بدون تبدیل و یکسان‌سازی واحد آن‌ها میسر نیست. برای رفع این مشکل، در این پژوهش از مفهوم نظریه مطلوبیت استفاده شده است. اگر مجموعه‌ای از قبل تعیین شده شامل چند شاخص عملکردی داشته باشیم، می‌توان برای تمام خروجی‌های ممکن از تک‌تک این شاخص‌ها با توجه به سطح مطلوبیت تصمیم‌گیرنده یک تابع

ریاضی نسبت به هرکدام از آن‌ها بسط دهیم. چنین تابعی را با عنوان تابع مطلوبیت معرفی می‌کنند [27]. در اینجا هر گروه از پیامدها به‌عنوان یک شاخص در نظر گرفته شد، لذا برای هر یک از پیامدهای انسانی، مالی و اجتماعی یک تابع مطلوبیت استخراج می‌شود. در نهایت پس از جایگذاری پیامدها در توابع به‌دست‌آمده، کلیه پیامدها واحد یکسان یوتیل خواهند داشت. البته مطلوبیت در اینجا به معنای رضایت از رخ ندادن حادثه نیست، بلکه مفهومی برعکس دارد؛ بدان مفهوم که هر چه پیامد یک حادثه در هر بُعد بزرگ‌تر باشد، مطلوبیت آن بیشتر خواهد بود.

بدین منظور، در هر بُعد، کمترین و بیشترین میزان آن پیامد استخراج‌شده و به ترتیب مطلوبیت صفر و یک به آن‌ها اختصاص می‌یابد. سپس با برگزاری چند قرعه برای پیامدهای میان آن دو حد، مطلوبیت هر عدد محاسبه می‌شود. بدین ترتیب در فضایی دو بعدی چند نقطه از هر پیامد و مطلوبیت آن خواهیم داشت که با برآزش بهترین خط برای آن‌ها تابع مطلوبیت تک‌شاخصه در هر بُعد به‌دست می‌آید. در این پژوهش برای برآزش بهترین خط از نرم‌افزار CurveExpert استفاده شده است.

استخراج تابع مطلوبیت پیامد انسانی (h). کمترین میزان برای پیامد انسانی مقدار صفر و بیشترین آن 36 بود که در بخش قبل محاسبه شد. لذا قرعه‌هایی به شکل زیر برگزار کردیم؛ به این ترتیب که از تصمیم‌گیرندگان خواسته شد بیان کنند بین قرعه چه عددی با احتمال یک و قرعه دو عدد کمترین و بیشترین میزان، هرکدام با احتمال مساوی 0/5، بی‌تفاوت (~) است. به همین ترتیب با برگزاری قرعه‌های دیگر با اعداد متفاوت، چند عدد زیر حاصل شد.

$$\begin{array}{l}
 L_1 \xrightarrow{1} 5 \quad \sim \quad L'_1 \begin{cases} \frac{1}{2} & 36 \\ \frac{1}{2} & 0 \end{cases} \\
 \\
 L_2 \xrightarrow{1} 11 \quad \sim \quad L'_2 \begin{cases} \frac{1}{2} & 36 \\ \frac{1}{2} & 5 \end{cases} \\
 \\
 L_3 \xrightarrow{1} 17 \quad \sim \quad L'_3 \begin{cases} \frac{1}{2} & 36 \\ \frac{1}{2} & 11 \end{cases}
 \end{array}$$

$$U(x) = u_i$$

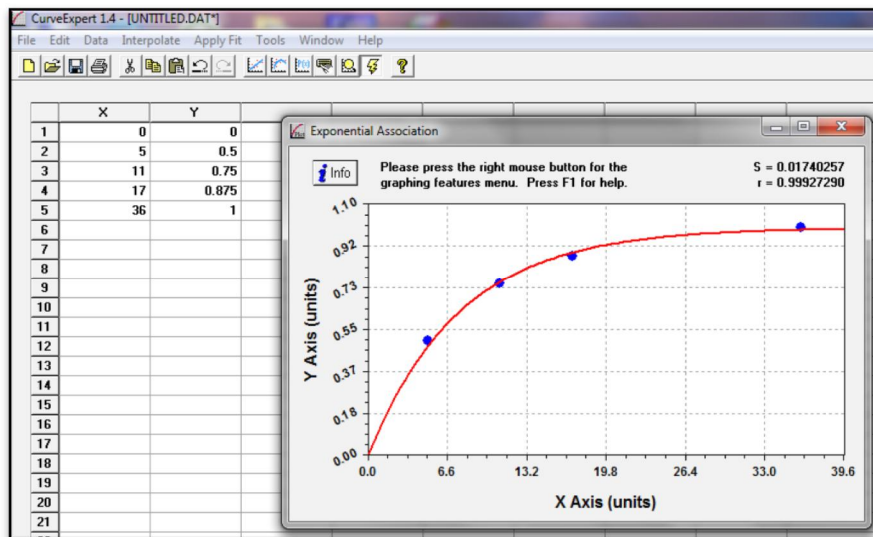
$$U(0) = 0 \quad \text{و} \quad U(36) = 1$$

$$U(5) = \frac{1}{2} \times U(0) + \frac{1}{2} \times U(36) = \frac{1}{2} \times 0 + \frac{1}{2} \times 1 = 0.5$$

$$U(11) = \frac{1}{2} \times U(5) + \frac{1}{2} \times U(36) = \frac{1}{2} \times 0.5 + \frac{1}{2} \times 1 = 0.75$$

$$U(17) = \frac{1}{2} \times U(11) + \frac{1}{2} \times U(36) = \frac{1}{2} \times 0.75 + \frac{1}{2} \times 1 = 0.875$$

به این ترتیب با مکان‌یابی این اعداد و مطلوبیت هر یک در فضای دوبعدی، می‌توان بهترین خط را برای آن‌ها به عنوان تابع مطلوبیت برازش کرد. خروجی نرم‌افزار CurveExpert در شکل (5) آورده شده است.



شکل 5 خروجی نرم‌افزار CurveExpert برای برازش بهترین تابع پیامد انسانی

تابع برازش شده برای نقاط توسط نرم‌افزار به صورت زیر ارائه شده است:

$$y = 0.996(1 - e^{-0.13x}) \quad \text{رابطه 4}$$

پس از جایگذاری تمام پیامدهای انسانی در تابع به دست آمده، پیامدهای انسانی به یوتیل محاسبه می‌شود. استخراج توابع مطلوبیت مربوط به پیامدهای مالی و اجتماعی نیز شبیه پیامد انسانی است که نهایتاً، به ترتیب، به صورت رابطه‌های (5) و (6) به دست آمدند. در جدول 2 مقدار مطلوبیت هر پیامد به واحد یوتیل نیز برای بخش 1 به عنوان نمونه آورده شده است.

$$y = -0.00035 + 2.86 * 10^{-9}x + 1.21 * 10^{-16}x^2 - 0.5 * 10^{-24}x^3 \quad \text{رابطه 5}$$

$$y = 1.45(0.722 - e^{-0.0326x}) \quad \text{رابطه 6}$$

محاسبه پیامد نهایی کلی هر بخش. هنگامی که بیش از یک شاخص در ترجیحات مؤثر باشد، تابع مطلوبیت تصمیم‌گیرنده، تابع مطلوبیت چندشاخصه نام می‌گیرد. در این پژوهش نیز برای ترکیب توابع مطلوبیت مربوط به هر پیامد، جهت استخراج پیامد نهایی کلی هر بخش از مفاهیم توابع مطلوبیت چندشاخصه استفاده می‌شود. سه شکل جمع‌پذیر، حاصل ضرب و ترکیب‌های خطی چندگانه به عنوان فرم‌های معمول توابع مطلوبیت چندشاخصه هستند که هر کدام مفروضات خاص خود را دارند. در اینجا از شکل جمع‌پذیر استفاده شده است.

برای استفاده از شکل جمع‌پذیر باید استقلال مطلوبیت جمع‌پذیر برقرار باشد؛ یعنی درجه ترجیح برای پیشامدهای تصادفی تنها به توزیع حاشیه‌ای آن‌ها بستگی داشته باشد و به توزیع‌های احتمال مشترک وابسته نباشد. در اینجا با برگزاری قرعه‌هایی این مورد بررسی شد؛ به همین جهت می‌توانیم برای سه شاخص خود از شکل جمع‌پذیر به صورت زیر استفاده کنیم:

$$U(x) = W_h * U_h(x) + W_s * U_s(x) + W_f * U_f(x) \quad \text{رابطه 7}$$

همان طور که در رابطه (7) مشاهده می شود باید برای هر تابع مطلوبیت، وزنی تعیین شود که بیانگر اهمیت آن شاخص است. در اینجا نیز از روش اسمارت استفاده شد؛ بدین ترتیب، وزن پیامدهای مختلف به ترتیب زیر تعیین شد:

$$W_h = 0.45 \quad , \quad W_s = 0.4 \quad , \quad W_f = 0.15$$

در نتیجه، تابع مطلوبیت نهایی چند شاخصه به صورت زیر حاصل می شود:

$$U(x) = 0.448(1 - e^{-0.13x}) + 0.58(0.722 - e^{-0.0326x}) \quad \text{رابطه 8}$$

$$+ 0.15(-0.00035 + 2.86 * 10^{-9}x + 1.21 * 10^{-16}x^2 - 0.5 * 10^{-24}x^3)$$

به طور مثال، جدول 2 مطلوبیت نهایی بخش 1 از نظر هر سناریوی حادثه را پس از جایگذاری پیامدها در تابع به دست آمده نشان می دهد. به دست آوردن ریسک بخش ها (r_i). برای محاسبه ریسک هر سناریو در هر بخش باید احتمال وقوع هر سناریو در هر بخش را با پیامد نهایی محاسبه شده در هر بخش، مطابق رابطه (9) ترکیب کنیم [2، 3، 16 و 28]. بدین ترتیب، در اینجا 168 ریسک محاسبه می شود (21 ضرب در 8) که اعداد به دست آمده برای بخش 1 به عنوان نمونه در جدول 2 آورده شده است.

$$r_{ij} = \pi_{ij} * U(x_{ij}) \quad \text{و } i = 1 \dots 21 \text{ و } j = 1 \dots 8 \quad \text{رابطه 9}$$

جدول 2 اعداد محاسبه‌شده برای بخش 1 جهت محاسبه ریسک هر سناریو در این بخش

سناریو θ_8	سناریو θ_7	سناریو θ_6	سناریو θ_5	سناریو θ_4	سناریو θ_3	سناریو θ_2	سناریو θ_1		
0,00801	0,00027	0,00062	0,00099	0,04005	0,00134	0,00312	0,00494	احتمال وقوع هر سناریو	
23	6.25	4.5	4	30	6.25	4.6	4	مقدار اصلی	پیامد انسانی
0,9497	0,5563	0,4429	0,4055	0,9798	0,5563	0,4501	0,4055	به یوتیل	
4000	8000	6000	3000	6000	10000	80000	10000	مقدار اصلی	پیامد مالی
0,0026	0,0130	0,0300	0,0211	0,0093	0,0211	0,0399	0,0300	به یوتیل	
46.75	52.25	49.5	44	49.5	55	52.25	55	مقدار اصلی	پیامد اجتماعی
0,6690	0,7310	0,7829	0,7681	0,7014	0,7581	0,8055	0,7829	به یوتیل	
0.6954	0.5447	0.5170	0.4889	0.7229	0.5567	0.5307	0.5001	به یوتیل	پیامد کلی
0,00557	0,00015	0,00032	0,00048	0,02895	0,00074	0,00165	0,00247	ریسک هر سناریو	

نهایتاً برای محاسبه ریسک هر بخش باید ریسک‌های سناریوهای مختلف را در بخش موردنظر با هم جمع کرد (رابطه 10).

$$r_i = \sum_{j=1}^8 r_{ij} \quad \text{رابطه 10}$$

به‌عنوان مثال برای بخش 1 داریم (+) $r_i = 0.00247 + 0.00165 + 0.00074 + 0.02895 + 0.00048 + 0.00032 + 0.00015 + 0.00557 = 0.04034$. در جدول 3، نتیجه نهایی محاسبه ریسک برای همه بخش‌ها نشان داده شده است.

جدول 3 ریسک هر بخش

بخش	1	2	3	4	5	6	7
ریسک	0,04034	0,06707	0,4770	0,05626	0,01755	0,01049	0,07170

بخش	8	9	10	11	12	13	14
ریسک	0,08598	0,06810	0,07985	0,01372	0,05913	0,00658	0,01768

بخش	15	16	17	18	19	20	21
ریسک	0,00546	0,00281	0,00303	0,00539	0,00308	0,00244	0,00341

5- بحث و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر شناسایی حوادث شبکه لوله گاز شهری، بررسی پیامدهای حوادث از منظر ابعاد مختلف و محاسبه کمی احتمال آن‌ها و نیز محاسبه ریسک هر بخش با ارائه یک مدل چندمعیاره به صورت کمی بود که در بخش قبل ارائه و محقق شد. همچنین با مشورت تیم تصمیم‌گیرنده، تصمیم گرفته شد بخش‌ها با توجه به مقدار ریسکشان در سه دسته با ریسک بالا، متوسط و پایین طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، بخش‌های با ریسک بیش از 0/04 را در دسته بخش‌های با ریسک بالا، بخش‌های با ریسک بین 0/04 و 0/01 در دسته ریسک متوسط، و بخش‌های دارای ریسک کمتر از 0/01 را در دسته بخش‌های با ریسک پایین طبقه‌بندی کردیم. نتایج مربوط به این طبقه‌بندی در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 4 دسته‌بندی بخش‌ها از لحاظ ریسک

شماره بخش شبکه گاز	طبقه ریسک
1 و 2 و 3 و 4 و 7 و 8 و 9 و 10 و 12	بخش‌های با ریسک بالا
5 و 6 و 11 و 14	بخش‌های با ریسک متوسط
13 و 15 و 16 و 17 و 18 و 19 و 20 و 21	بخش‌های با ریسک پایین

بدین ترتیب، هدف دیگر پژوهش یعنی شناسایی بخش‌هایی که از لحاظ ریسک در وضعیت بحرانی‌تری قرار دارند، تحقق یافت. این یافته مدیران و برنامه‌ریزان را یاری

می‌دهد تا اولویت خود را برای اطمینان از ایمنی شبکه و نیز اجرای برنامه‌های پیشگیری از حوادث در بخش‌هایی از شبکه لوله گاز شهری با ریسک بالاتر متمرکز نمایند.

کار عمده‌ی این مقاله را می‌توان تلفیق نظریه مطلوبیت جهت محاسبه کمی پیامدهای حوادث مختلف، با احتمالات حوادث و نیز استفاده از روش‌هایی مثل تحلیل درخت رویداد (ETA) یا اسمارت، به منظور ارزیابی و رتبه‌بندی بخش‌های مختلف شبکه لوله گاز شهری، با یک نگاه چندوجهی به اثرات حوادث، دانست که در هیچ‌یک از پژوهش‌های قبلی، بدین صورت تحلیل و بررسی نشده است. به‌طور کلی می‌توان تمایز این تحقیق را نسبت به پژوهش‌های دیگر در این حوزه، به‌جز ارائه مدلی تلفیقی با تمرکز بر نظریه مطلوبیت، در موارد ذیل خلاصه نمود:

1. انواع مختلف سناریوهای حوادث شبکه لوله گاز شهری بررسی شدند. در غالب پژوهش‌های قبلی، یک یا چند نوع محدود از نقص در خطوط لوله مورد مذاقه قرار گرفته است؛

2. ابعاد گوناگون پیامدها (انسانی، مالی و اجتماعی-روانی) بررسی شدند. این نگاه چندوجهی موجب توجه تصمیم‌گیرندگان به ابعاد مختلف و افزایش وسعت دید آنان می‌شود.

3. شبکه لوله گاز شهری به‌صورت جامع مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات قبلی یا خطوط لوله گاز را فقط بررسی کرده‌اند یا بخشی از شبکه مانند یک ایستگاه تقلیل فشار را تحلیل نموده‌اند؛

4. پیامدهای انسانی، به‌صورت جزئی و دقیق، به‌عنوان مهم‌ترین نوع اثرات مورد توجه ویژه قرار گرفت؛

5. بخش‌بندی شبکه لوله گاز که در این مقاله ارائه شد، اجازه می‌دهد تا هر بخش از شبکه را به یک گروه از ریسک‌ها اختصاص داده و تصمیمات و اقدامات ایمنی متناسب با هر بخش بر اساس اولویت، صورت پذیرد (مانند برنامه‌های نشت‌یابی، شبیه‌سازی رایانه‌ای، بازرسی‌های پیشگیری، تعمیر و نگهداری و...).

6. استفاده از نظرات خبرگان ایمنی درگیر در مسائل شبکه گاز شهری و دخالت دادن آنان در مراحل مختلف پژوهش، مدنظر قرار گرفته است و صرفاً به داده‌ها و مستندات مکتوب توجه نشده است. این امر علاوه بر کاربردی‌تر نمودن پژوهش، منجر به جلب نظر این افراد به مسائل مغفول می‌شود؛

7. عملیاتی و کاربردی بودن تحقیق به همراه پیاده‌سازی بومی آن به صورت وسیع، نه فقط اکتفا نمودن به ارائه مدل و یک مثال، وجه تمایز این پژوهش از پژوهش‌های دیگر است؛

نتایج حاصل از این پژوهش با مشاهدات عینی و تجربیات تیم خبرگان و تصمیم‌گیری در این پژوهش همخوانی داشته و به زعم آنان مناطق شناسایی شده با ریسک بالا، علاوه بر دارا بودن حوادث بیشتر، همواره دغدغه مسئولان ایمنی شرکت نیز بوده است.

همچنین با بررسی بیشتر می‌توان موضوعاتی از قبیل این موارد را برای پژوهش‌های آتی توصیه کرد: اولویت‌بندی فعالیت‌هایی که باید روی بخش‌های شبکه گاز با ریسک بالا به منظور کاهش پیامدهای حوادث نامطلوب، انجام شود؛ بررسی اثرات زیست‌محیطی حوادث و محاسبه ریسک بر مبنای این‌گونه از پیامدها؛ بررسی جنبه‌های کیفی مدیریت ریسک در شبکه لوله گاز مانند برنامه‌ریزی و کنترل ریسک. مهم‌ترین محدودیتی که در این پژوهش با آن مواجه بودیم، استخراج دشوار و زمان‌بر داده‌های لازم بود. مثلاً حوادث شرکت گاز در جایی مجزا ثبت نبودند و تنها راه دسترسی به آن‌ها بررسی دفاتر ثبت دستی کلیه تماس‌های گرفته شده با واحد امداد بود. این مسئله علاوه بر مشکل کردن کار استخراج حوادث، امکان اشتباه را دوچندان می‌کرد.

6- منابع

- [1] Almeida, A.T., (2010) "Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method", *Computers and Operations Research* 34 (12): 3569-3574.
- [2] Han, Z. Y., Weng, W. G., (2009) "An overview of quantitative risk analysis methods for natural gas pipelines", *Journal of China Safety Science Journal*, 19: 154-164.
- [3] Ghasemi, A., (2017). Pluralism in Management Multiple Criteria Decision Making Methods. *Modern Research in Decision Making*, 2(3), 241-266 (in Persian).

- [4] Darreh Shouri, M., Dalvi Esfahani, M. R., Abedpour, M., (2005) "risk management" Isfahan: Barin Scholar Scientific Institute Publications, Arkan Publications, (in Persian).
- [5] Babaei, M. A., Vazir Zanjani, H. R., (2013) "Risk Management A New Approach to Promote Organizational Effectiveness", *Jahangostar Magazine* 109: 72-77, (in Persian).
- [6] Abdolhamidzadeh, B., Badri, N., (2010) "quantitative and qualitative risk assessment in process industries", Tehran: AndisheSara publications (in Persian).
- [7] Burner, G., S., Gauguin, A., Fringa, A., (2006) "Risk Management in Information Technology Systems", Kamran Yeganegi, Maryam Mohebbi: Translators. Qazvin: Saye gostar Publications (in Persian).
- [8] Rezaeifar A., Jabal Ameli, M. S., (2006) "Risk assessment of project using multi-criteria decision-making models", *International Project Management Conference* (in Persian).
- [9] Papadakis, G. A. (2000) "Assessment of requirements on safety management systems in EU regulations for the control of major hazard pipelines", *Journal of Hazardous Materials*, 78(1-3): 63–89.
- [10] Alonso, F. D., Ferradas, E. G., Pérez, J. F. S., (2006) "Characteristic overpressure-impulse-distance curves for vapour cloud explosions using the TNO multi-energy model", *Journal of Hazardous Materials*, 137: 734-741.
- [11] Alonso, F. D., Ferrada_s, E. G., Minarro, M. D., (2008) "Consequence analysis by means of characteristic curves to determine the damage to buildings from the detonation of explosive substances as a function of TNT equivalence", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21: 74-81.
- [12] Alonso, F. D., Ferradas, E. G., Pérez, J. F. S., (2008) "Consequence analysis to determine damage to buildings from vapour cloud explosions using characteristic curves", *Journal of Hazardous Materials*, 159: 264-270.
- [13] Krueger, J., Smith, D., (2003) "A practical approach to fire hazard analysis for offshore structures", *Journal of Hazardous Materials*, 104: 107-122.

- [14] Luo, J. H., Zheng, M., Zhao, X. W., Huo, C. Y., Yang, L., (2006) "Simplified expression for estimating release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19: 362-366.
- [15] Sklavounos, S., Rigas, F., (2006), "Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19: 24-31.
- [16] Park, K. S., Lee, J. H., Jo, Y. D., (2004), "An Approach to Risk Management of City Gas Pipeline", *Process Safety and Environmental Protection*, 82(6): 446-452.
- [17] Thaler, M., Grabec, I., Poredoš, A., (2005), "Prediction of energy consumption and risk of excess demand in a distribution system", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 355(1): 46-53.
- [18] Almeida, A. T., Medeiros, C. P., Alencar, M. H., (2016) "Hydrogen pipelines: Enhancing information visualization and statistical tests for global sensitivity analysis when evaluating multidimensional risks to support decision-making", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(47): 22192-22205.
- [19] Almeida, A.T., (2001) "A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTER TRI integrating Utility Theory", *European Journal of Operational Research*, 200: 812-821.
- [20] Almeida, A.T., (2009), "Multicriteria decision making on maintenance: Spares and contracts planning", *European Journal of Operational Research*, 129 (2): 235-241.
- [21] Guo, Y., Meng, X., Meng, T., Wang, D., Liu, S., (2016) "A novel method of risk assessment based on cloud inference for natural gas pipelines", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30: 421-429.
- [22] Jouzi, S. A., Irankhahi, M., (2010) "Environmental risk assessment of gas pipelines with integrated AHP". *Journal of Ecology*, 36(53): 107-120 (in Persian).

- [23] Bagheri, M., Badri, N., Rashtchian, D., (2013) "Determining the safe safety of sour gas pipelines by quantitative evaluation method", *Chemical and Chemical Engineering Journal of Iran*, 32(2): 57-71(in Persian).
- [24] Heirani, P., Baqaee, A., (2016) "Risk assessment of oil and gas transmission lines based on Fuzzy Bow-tie method", *Quarterly Journal of Health and Safety*, 6(1): 59-71(in Persian).
- [25] Shahrakhi, M., Qoreyshi, M., (2011) "Development of a new method for analysis accident risk in simultaneous engineering and its implementation for a city gas pressure relief station", *Gas and Energy Monthly*, 2(8): 43-49 (in Persian).
- [26] Mahboob Ghodsi, m., Khatami Firoozabadi, M. A., (2016). An approach to human reliability assessment based on FMEA technique and fuzzy sets theory. *Management Research in Iran*, 20 (1), 33-60.
- [27] Mehregan, M. R., (2007) "Decision making with several goals", Tehran: Tehran University Faculty of Management publications (in Persian).
- [28] Brito, A. J., de Almeida, A. T., (2009) "Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines", *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2): 187-198.