

## برآورد کمی ریسک خطوط انتقال گاز با استفاده از تحلیل‌های مکانی در محیط GIS

فریده رضایی نوده<sup>۱\*</sup>، محمد کریمی<sup>۲</sup>، موسی جباری قره‌باغ<sup>۳</sup>

۱. کارشناسی ارشد GIS، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استادیار گروه GIS، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استادیار گروه ایمنی صنعتی، دانشکده سلامت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE)، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰

### چکیده

انتقال گاز از محل تولید به موقعیت مصرف‌کنندگان نیازمند شبکه توزیع گسترده‌ای است. رشد و توسعه مناطق مسکونی و صنعتی سبب افزایش مصرف گاز و متراکم‌تر شدن شبکه خطوط لوله گاز شده و خطرهای ناشی از خرابی خط لوله و نشت گاز رو به افزایش است. به‌منظور جلوگیری از خسارت مخاطرات احتمالی و کاهش آنها، مطرح کردن چارچوبی برای برآورد ریسک ضروری است. روش کمی یکی از دقیق‌ترین و پیچیده‌ترین روش‌های ارزیابی ریسک خط لوله به‌شمار می‌رود. در این روش، ریسک با استفاده از دو کمیت احتمال خرابی خط لوله و احتمال مرگ‌ومیر ناشی از پیامدهای حوادث نشت گاز محاسبه می‌شود. هدف اساسی این تحقیق عرضه چارچوبی مناسب برای برآورد کمی ریسک خط لوله گاز است. در بیشتر مطالعات در زمینه ریسک خطوط انتقال گاز، محاسبات فقط برای یک خط لوله انجام شده است. نوآوری این تحقیق ارتقای برآورد کمی ریسک در نقاط مجاور خط لوله، با به‌کارگیری تحلیل‌های مکانی در محیط GIS و بررسی آثار جمعی چندین خط بر ریسک در یک نقطه معین است. نتایج نهایی در قالب نقشه ریسک برای خط لوله و محیط اطراف آن تهیه شده است. بر طبق نقشه تولیدشده، محدوده‌ای از منطقه ریسک بالاتر از  $1E-05$  دارد که دلیل آن قرارگرفتن در راستای میانگین جهت وزش باد در منطقه و اثر جمعی چندین قسمت از خط لوله است. با استفاده از نقشه‌های تولیدشده می‌توان در جهت به‌حداقل‌رساندن سطح ریسک و مدیریت ایمنی خطوط لوله موجود اقدام کرد و بدین ترتیب پیاده‌سازی روش کمی برآورد ریسک در GIS، توانایی تشخیص و بصری‌سازی فواصل خطرناک، محدوده آسیب‌پذیری و مناطق پرخطر بر اثر پیامدهای گوناگون نشت گاز را فراهم آورد.

**کلیدواژه‌ها:** خط لوله انتقال گاز، روش کمی، احتمال خرابی، پیامدهای خرابی، سامانه اطلاعات جغرافیایی.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان انقلاب، خیابان شهید نامجو، کوچه افضلی، بن‌بست موحدی، پلاک ۷، طبقه اول، واحد ۱، کدپستی: ۱۶۱۴۹۳۶۴۱۱. تلفن:

## ۱- مقدمه

انتقال گاز از محل تولید به موقعیت مصرف‌کنندگان به شبکه توزیع گسترده‌ای نیاز دارد. رشد و توسعه مناطق مسکونی و صنعتی سبب افزایش مصرف گاز و تراکم ترشدن شبکه خطوط لوله گاز شده؛ بنابراین خطر و ریسک‌های ناشی از خرابی خط لوله و نشت گاز رو به افزایش است (Ma et al., 2013, B). به‌منظور جلوگیری از خسارت مخاطرات احتمالی روی خطوط لوله و کاهش آنها، مطرح کردن چارچوبی برای برآورد ریسک ضروری است (Ma et al., 2013, A). در سال‌های اخیر، روش‌ها و استانداردهای بسیاری برای ارزیابی ریسک خطوط لوله مطرح شده است. یکی از دقیق‌ترین و پیچیده‌ترین روش‌های ارزیابی ریسک روش کمی است که با استفاده از شبیه‌سازی عددی، شامل محاسبات کمی، احتمال وقوع حوادث مختلف روی خطوط لوله در قالب کمیت احتمال خرابی خط لوله و پیامدهای آن مقدار ریسک را برآورد می‌کند (Han and Weng, 2011).

با توجه به این موضوع که ریسک خط لوله تابعی از محیط اطراف آن است و ماهیت مکانی فاکتورهای مؤثر در ریسک مانند جابه‌جایی زمین، خوردگی، نقص ساختاری و مداخلات خارجی—در مقیاس ناحیه‌ای به‌نسبت مقیاس شهری متفاوت است، در این تحقیق برآورد کمی ریسک خطوط سراسری انتقال گاز مورد مطالعه قرار گرفت. سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۱</sup> یک فناوری با قابلیت ذخیره‌سازی تحلیل داده‌های مکانی و مدل‌سازی روابط فضایی است که به‌منظور نمایان کردن دنیای واقعی روی نقشه به‌کار می‌رود. بنابراین با یکپارچه‌سازی فرایند برآورد کمی ریسک خط لوله و GIS، امکان بررسی شیوه تغییرات مکانی فاکتورهای مؤثر در ریسک در طی مسیر خط لوله و پیاده‌سازی مراحل و محاسبات لازم به‌صورت شهودی و دقیق‌تر، در طی فواصل متفاوت از خط لوله، فراهم می‌شود. همچنین با استفاده از نقشه ریسک تولیدشده، امکان تشخیص مناطق پرخطر و مدیریت بهتر تأسیسات خط لوله پیش

می‌آید (Najafi and Ma, 2004; Ma et al., 2013, b). با توجه به وقوع حوادث گوناگون در خط لوله گاز و آسیب‌های ناشی از آن، در سال‌های اخیر تمرکز ویژه‌ای روی این مبحث صورت گرفته که در بخش بعدی، مطالعات انجام‌شده در این زمینه بررسی شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

در زمینه برآورد ریسک خطوط لوله انتقال گاز، مولباوئر<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) روشی مبتنی بر یک سیستم شاخص متشکل از بسیاری فاکتورهای مؤثر در ریسک مطرح کرد. جو و آن<sup>۳</sup> (۲۰۰۵) روشی ساده برای برآورد کمی ریسک خطوط لوله انتقال گاز، با استفاده از دو پارامتر طول مرگبار و طول مرگبار تجمعی، توسعه دادند. جباری و همکارانش در سال ۲۰۰۹ ریسک خطوط لوله منطقه ماهشهر را با استفاده از روش کمی برآورد کردند. در این مطالعه از امتیازات محاسبه‌شده، با استفاده از روش کیفی ارزیابی ریسک، برای تعدیل احتمال خرابی در روش کمی استفاده شده است (Gharabagh et al., 2009). هان و ونگ<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) روش یکپارچه تحلیل کمی ریسک را مطرح کردند که شامل سه فاز برآورد احتمالات خرابی، آنالیز پیامدهای داخل و خارج شبکه و برآورد ریسک است. این محققان همچنین، در سال ۲۰۱۱، روش‌های کمی و کیفی در شبکه خطوط لوله گاز شهری را مقایسه کردند.

در سال ۲۰۱۳ جمشیدی و همکارانش<sup>۵</sup> روشی براساس ترکیب روش‌های امتیاز نسبی خطر<sup>۶</sup> و سیستم استنتاج فازی، به‌منظور ایجاد مدلی مطمئن و دقیق تر برای کنترل ریسک خط لوله، عرضه داشتند (Jamshidi et al., 2013). ما و همکارانش<sup>۷</sup> یک روش جدید برآورد کمی ریسک برای شبکه خط لوله گاز

1. GIS
2. Muhlbauer
3. Jo and Ahn
4. Han and Weng
5. Jamshidi et al.
6. RRS
7. Ma et al.

ناشی از انفجار خط لوله در جمعیتی خاص شمرده می‌شود (Ma et al., 2013, a; Jonkman, 2003). مقدار ریسک فردی در هر موقعیت مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Zhou et al., 2014).

$$IR = \phi_i P_d \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه،  $\phi_i$  احتمال خرابی خط لوله و  $P_d$  احتمال مرگ‌ومیر فرد فرضی واقع در محل بر اثر عامل بروز خرابی است. در ادامه، روش محاسبه ریسک فردی در قالب شکل ۱ تشریح می‌شود. باید توضیح دهیم که محاسبه ریسک اجتماعی پیچیده‌تر از ریسک فردی است و در اولویت این تحقیق قرار نگرفته است.

### ۳-۱- شناسایی عوامل خرابی خط لوله

قدم نخست در برآورد ریسک شناسایی عواملی است که سبب بروز حادثه و خرابی خط لوله می‌شوند. منظور از خرابی انتشار غیرعادی محتویات درون خط لوله و از دست دادن یکپارچگی و تمامیت آن بر اثر ایجاد شکاف و حفره روی خط لوله است (Muhlbauer, 2004). اندازه سوراخ ایجادشده روی بدنه خط لوله به علت نشست، با توجه به قطر آن، به سه دسته حفره کوچک<sup>۱</sup>، متوسط<sup>۲</sup> و بزرگ<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود که در ادامه به ترتیب تشریح شده‌اند (EGIG, 2013):

- حفره کوچک حالتی است که قطر سوراخ ایجادشده کوچک‌تر و یا مساوی ۲ سانتی‌متر باشد.
- حفره متوسط حالتی است که قطر سوراخ ایجادشده بزرگ‌تر از ۲ سانتی‌متر و کوچک‌تر یا مساوی قطر خط لوله باشد.
- حفره بزرگ حالتی است که قطر سوراخ ایجادشده بزرگ‌تر از قطر خط لوله باشد.

در مطالعات گوناگون، با توجه به موقعیت و شرایط محیط اطراف و ویژگی‌های خط لوله، حوادث گوناگونی

شهری، بر مبنای تفاوت گرید در بخش‌های متفاوت خط لوله، مطرح کردند که در آن شبکه گاز شهری به صورت شبکه‌ای با تئوری گراف تعریف شده است. در این تحقیق میزان ریسک در هر نقطه از گرید با جمع‌زدن ریسک فردی به دست آمده از قسمت‌های گوناگون محاسبه و ریسک دیگر نقاط با درون‌یابی نقاط نمونه محاسبه می‌شود (Ma et al., 2013, b). آنها با استفاده از تکنولوژی GIS مدل‌های موجود را بهبود دادند و یک سیستم آنالیز کمی ریسک برای شبکه گاز شهری طراحی کردند. در بیشتر مطالعات گذشته، احتمال خرابی یک مقدار ثابت فرض شده است و یا با ضرایب استخراج شده از پایگاه داده حوادث خط لوله موجود بهبود یافته است.

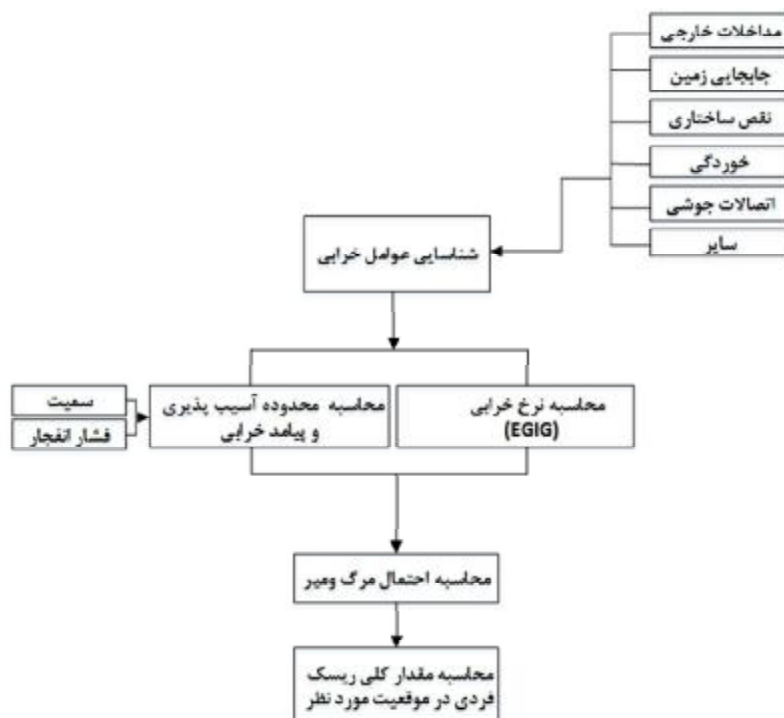
همان‌طور که گفته شد، یکی از روش‌های مورد توجه در ارزیابی ریسک خطوط لوله روش کمی است. با توجه به شرایط خاص منطقه و فرارگیری چندین خط انتقال گاز سراسری در مجاورت یکدیگر، نوآوری این تحقیق بررسی آثار تجمعی چندین خط بر میزان ریسک در یک نقطه معین است. نتایج نهایی در قالب نقشه ریسک برای هر یک از خطوط به صورت جداگانه و سپس با در نظر گرفتن آثار تجمعی کل خطوط تهیه شد. در این مقاله پس از پرداختن به ضرورت مسئله برآورد ریسک و پیشینه تحقیق، به مبانی نظری مرتبط با برآورد کمی ریسک خطوط لوله پرداخته‌ایم. سپس در بخش سوم، مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی را با جزئیات شرح داده‌ایم و در انتها، نتایج و پیشنهادات حاصل از مطالعه را بیان داشته‌ایم.

### ۳- مبانی نظری

معمولاً ریسک فردی و اجتماعی خروجی روش کمی ارزیابی ریسک محسوب می‌شود. منظور از ریسک فردی احتمال مرگ‌ومیر فرد حفاظت نشده، همیشه حاضر در محلی خاص، بر اثر حوادث ناشی از فعالیت‌های خطرناک است. ریسک اجتماعی متأثر از فرکانس حوادث پرخطر و تعداد مردم در معرض آسیب‌های

1. pinhole  
2. hole  
3. rupture

برآورد کمی ریسک خطوط انتقال گاز ...



شکل ۱. فلوجارت پیشنهادی روش کمی برآورد ریسک

محاسبه می‌شود (EGIG, 2015).

$$\Phi_{i,j,0} = \frac{\text{number of incident}}{\text{exposure time of pipeline (km \cdot year)}} \quad (2)$$

در رابطه بالا، منظور از exposure time of pipeline حاصل ضرب طول خط لوله در مدت زمانی است که خط لوله بهره‌برداری شده است. در این مورد مؤسسه حوادث خطوط لوله گاز اروپا<sup>۱</sup>، با استفاده از پایگاه داده حوادث خطوط لوله گاز در سراسر این قاره، احتمال خرابی خطوط لوله منتج از عوامل متفاوت را برآورد کرده است که محققان گوناگون معمولاً از آن بهره می‌برند. در این گزارش میزان احتمال خرابی کلی، به ازای هر ۱۰۰۰ کیلومتر خط در سال، ۰/۳۲۹ تعیین شده است. مقدار محاسبه شده برای احتمال خرابی کلی در نظر گرفته می‌شود و در طی خط لوله و با تغییر فاکتورهای مؤثر در هر عامل خرابی همچون قطر، ضخامت دیواره‌ها، عمق خاک، سال ساخت و ... متغیر است. اطلاعات هر عامل

به‌منزله عوامل خرابی در نظر گرفته می‌شوند (Han and Weng, 2010). معمولاً شناسایی این عوامل با کمک آنالیز حوادث دوره‌های گذشته و نظر کارشناسان و یا تحلیل‌های سلسله‌مراتبی انجام می‌شود (Montiel, 1996; Dziubiński et al., 2006). معمولاً فاکتورهای مداخلات خارجی، خوردگی، نقص ساختاری، اتصالات جوشی و جابه‌جایی زمین را عوامل خرابی در نظر می‌گیرند (EGIG, 2015).

### ۳-۲- محاسبه احتمال خرابی خط لوله

پس از شناسایی عوامل خرابی خط لوله، دفعات تکرار آن در هر سال در واحد طول خط لوله، در قالب کمیت احتمال خرابی خط لوله، برآورد می‌شود (Ma et al., 2013, b). یکی از روش‌های متداول محاسبه احتمال خرابی استفاده از فرمول‌های تجربی بر مبنای داده‌های گذشته است. در این روش، احتمال خرابی کلی  $\Phi_{i,j,0}$  برای عوامل خرابی با رابطه (۲)

1. EGIG

سناریوهای تعریف شده همچون اندازه حفره ایجاد شده در خط لوله، زمان، بزرگی آتش سوزی، شرایط هواشناسی، شرایط محیط زیستی و فاصله از نقطه خرابی وابسته است. بنابراین در ارزیابی ریسک، با توجه به تعریف سناریوهای گوناگون برای حوادث، پیامدهای متفاوتی نیز به دست می آید (Han and Weng, 2010).

برای محاسبه پیامدهای خرابی خط لوله نیاز به محاسبه سرعت نشت گاز، غلظت گاز سمی و فشار بیش از حد انفجار است. پارامترهای اشاره شده معمولاً در نرم افزارهای تخصصی محاسبه می شود. در این تحقیق نرم افزار تخصصی ALOHA به کار رفت (U.S. EPA and NOAA, 2007). این نرم افزار را EPA<sup>1</sup> برای مدلسازی حوادث ناشی از رهایی مواد سمی، منفجره و یا آتش و انفجار بر اثر آن ها عرضه کرده است (Zhou Hu et al., 2014). محاسبات پراکنش گاز اغلب امکان برآورد مناطق تحت تأثیر حوادث و مقدار میانگین غلظت گاز در موقعیت های متفاوت را فراهم می آورند. میزان سرعت گاز رها شده با توجه به نوع حفره ایجاد شده روی خط لوله متفاوت است (CCPS, 1999; Han and Weng, 2010). پس از محاسبه سرعت نشت گاز، می توان میزان غلظت گاز سمی در محیط اطراف خط لوله را برآورد کرد. در نرم افزار ALOHA از مدل DEGADIS برای محاسبه پراکنش گاز ترش در محیط استفاده می شود (Spicer et al., 1989). با تعیین میزان غلظت گاز در موقعیت مورد نظر، می توان آثار این گاز در افراد تحت تأثیر را بررسی کرد (Frequencies, 2010). آثار قرارگرفتن در معرض غلظت های گوناگون گاز ترش در جدول ۲ بیان شده است. یکی از استانداردهای متداول بررسی غلظت گاز سمی و تعیین محدوده آسیب پذیری آن ERPG<sup>2</sup> است که برای گاز ترش غلظت های 100 ppm، ۳۰ ppm و ۰/۱ ppm را در نظر گرفته است

خرابی از گزارش EGIG استخراج شده و در جدول ۱ آورده شده است (EGIG, 2015).

جدول ۱. احتمال خرابی هر عامل به تفکیک اندازه سوراخ در هر ۱۰۰۰ کیلومتر (EGIG, 2015)

عامل	اندازه	کوچک	متوسط	بزرگ	ناشناخته	کل
مداخلات خارجی	۰/۰۴۳۵	۰/۰۸۱۵	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۱۵۶	
خوردگی	۰/۰۵۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۸	۰/۰۵۵	
نقص ساختاری	۰/۰۳۹	۰/۰۱۱۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۵۵	
اتصالات جوشی	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰	۰	۰/۰۱۵	
جابه جایی زمین	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۰۱	۰/۰۰۱۹	۰/۰۲۶	

برخی محققان میزان احتمال خرابی برآورد شده با EGIG را، براساس تغییر ویژگی های خط لوله و همچنین منطقه مورد مطالعه در طی مسیر خط لوله، بهبود داده و ویژه سازی کرده اند (Ma et al., 2013, b; Han and Weng, 2010). احتمال خرابی تصحیح شده برای هر عامل بروز خرابی مطابق رابطه (۳) به دست می آید (Jo and Ahn, 2005).

رابطه (۳)  $\phi_i = \sum_j \phi_{i,j,0} K_j (a_1, a_2, a_3 \dots)$   
 در این رابطه،  $\phi_i$  احتمال خرابی مورد انتظار در سال در واحد طول خط لوله،  $\phi_{i,j,0}$  احتمال خرابی اولیه در رابطه با خط لوله،  $K_j$  تابع تصحیح مرتبط با دلیل خرابی،  $a_k$  متغیرهای تابع تصحیح و  $i$  بیانگر نوع حادثه از نظر اندازه حفره ایجاد شده است.

### ۳-۳- محاسبه محدوده آسیب پذیری و میزان پیامدهای خرابی خط لوله

معمولاً آثار فیزیکی همانند پخش گازهای سمی، آتش سوزی و فشار انفجار از پیامدهای ناشی از خرابی خط لوله به شمار می رود. پیامدهای حوادث به مشخصات

1. Environmental Protection Agency  
 2. Emergency Response Planning Guidelines

(Zhou Hu et al., 2014).

می‌شود (CCPS, 1999).

$$d_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (4)$$

در این رابطه،  $Y$  متغیر احتمالاتی و  $u$  متغیر انتگرال است. متغیر احتمالاتی  $Y$  از توزیع نرمال پیروی می‌کند و مقصدار میانگین آن ۵ و انحراف معیار ۱ است. در محاسبات با حجم بالا رابطه (۵) بیشتر کاربرد دارد (CCPS, 1999).

$$P = 50 \left[ 1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \operatorname{erf}\left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (5)$$

در این رابطه،  $erf$  تابع خطا به‌شمار می‌رود (CCPS, 1999; Zhou Hu et al., 2014). برای محاسبه متغیر احتمالاتی  $Y$  مدل آسیب‌پذیری انسان<sup>۳</sup> به‌کار می‌رود. پیامدهای ایجادشده بر اثر نشت گاز که ممکن است سبب مرگ‌ومیر نیز شوند از طریق مدل‌های تجربی و آزمایشگاهی انتشار مواد در محیط به‌دست می‌آیند و آثار آن‌ها در جمعیت در قالب مدل آسیب‌پذیری بررسی می‌شود. در زمان وقوع حادثه، چندین عامل در بزرگی میزان آسیب وارد بر انسان نقش دارند. به رابطه‌ای که ترکیب این عوامل را مشخص می‌کند، در اصطلاح، «دوز» می‌گویند (CCPS, 1999). دوز، در رابطه با انتشار گاز سمی، ترکیبی از غلظت گاز و مدت زمان قرارگرفتن در معرض آن است که با رابطه (۶) به‌دست می‌آید (CCPS, 1999).

$$D = C^n t_e \quad (6)$$

در این رابطه  $D$  دوز کشنده،  $C$  غلظت گاز به ppm و  $t_e$  مدت زمان قرارگرفتن در معرض آن است. مقدار  $n$  برای گاز ترش ۱/۴۳ است. سپس مقدار دوز محاسبه‌شده با استفاده از رابطه Probit تبدیل به احتمال مرگ‌ومیر می‌شود. این معادله در قالب رابطه (۷) نشان داده شده که ضرایب آن، با توجه به نوع سناریو، تعریف می‌شود (CCPS, 1999).

1. vapor cloud explosion model
2. TNT
3. human vulnerability model

$$Y = a + b \ln D \quad (7)$$

جدول ۲. آثار قرارگرفتن در معرض غلظت‌های گوناگون گاز (HSE, 2013)

غلظت	اثر در انسان
۳۰	سوزش چشم
۵۰	اشک، حساسیت به نور پس از چهار ساعت
۱۵۰-۲۰۰	حساسیت به نور، تحریک غشای مخاطی، سردرد
۲۰۰-۴۰۰	علائم خفیف مسمومیت پس از چند ساعت
۲۵۰-۶۰۰	ورم و التهاب ریبوی پس از قرارگرفتن در معرض آن به‌مدت طولانی
۵۰۰-۱۰۰۰	التهاب دردناک چشم و حالت تهوع
۱۰۰۰	خفگی شدید
۱۰۰۰-۲۰۰۰	مرگ‌ومیر پس از ۳۰ تا ۶۰ دقیقه
بالتر از ۲۰۰۰	مرگ فوری

یکی دیگر از پیامدهای خرابی خط لوله زمانی است که گاز نشت‌یافته به‌شدت با هوا ترکیب می‌شود و به ایجاد آتش‌ناگهانی یا انفجار ابر بخار غیرقابل کنترل می‌انجامد. فشار بیش از حد بر اثر انفجار خط لوله را می‌توان با استفاده از مدل انفجار ابر بخار<sup>۱</sup> محاسبه کرد. برای آسانی محاسبات، روش وزن‌تی‌ان‌تی<sup>۲</sup> معادل استفاده می‌شود (Han and Weng, 2010). برای تعیین محدوده آسیب‌پذیری بر اثر شوک فشار ناشی از انفجار خط لوله معمولاً از مقادیر مرزی ۸ psi، ۳/۵ psi و ۱-۱/۵ psi به‌ترتیب برای محدوده تخریب کامل و مرگ‌ومیر، محدوده آسیب جدی و محدوده شکستن و به‌لرزه درآمدن شیشه‌ها استفاده شده است (Zhou et al., 2014).

### ۳-۴- محاسبه احتمال مرگ‌ومیر فردی

پس از محاسبه انواع پیامدها در موقعیت  $(x,y)$ ، می‌توان اثر پیامدهای حوادث گوناگون را در واحد احتمال روی افراد برآورد کرد. احتمال مرگ‌ومیر افراد به‌علت پیامدهایی همچون فشار و سمی‌بودن با استفاده از تابع احتمال محاسبه می‌شود. مقدار متغیر احتمالاتی  $Y$  و احتمال یا درصد مرگ‌ومیر  $d_i$  با رابطه (۴) محاسبه

مطالعه برای انجام دادن محاسبات ریسک فردی در موقعیت معلوم  $(x,y)$ ، بیشترین آسیب ناشی از سناریوهای گوناگون در آن موقعیت در نظر گرفته شد.

### ۳-۶- معیار مقدار ریسک قابل پذیرش

پس از محاسبه ریسک، مقدار آن با مقادیر استاندارد مورد پذیرش مقایسه می شود و بر مبنای آنالیز ریسک و میزان پیامدهای حوادث، برای مدیریت و تصمیم گیری مناسب اقدام می کنیم. معیار پذیرش ریسک، بر اساس جوامع گوناگون، متفاوت است و در بیشتر موارد تحت تأثیر حوادث فاجعه بار رخ داده در گذشته قرار دارد (Zhou et al., 2013). به طور کلی در نواحی اطراف خطوط لوله<sup>۱</sup> پرفشار، مقدار  $IR \leq 1E-05$  به منزله مقدار ریسک قابل پذیرش و مقدار  $1E-05 \leq IR \leq 1E-04$  در ناحیه<sup>۱</sup> ALARP قرار دارد (Kirchhoff & Doberstein, 2006). منظور از ناحیه<sup>۱</sup> ALARP منطقه ای است که باید اقدامات برای کاهش ریسک به سطح پایین تر انجام پذیرد.

### ۴- پیاده سازی

#### ۴-۱- منطقه مورد مطالعه

این مطالعه روی بخشی به طول یازده کیلومتر از خط لوله پنجم سراسری، در مقام بزرگترین خط لوله انتقال گاز ترش ایران، انجام شده است که از شهرهای برازجان، آبادان، کنگان، خورموج و اهرم می گذرد. این خط دارای دو شیر قطع اتوماتیک در این محدوده است. بخش دیگری از تحقیق بر روی قسمتی از خط لوله<sup>۱</sup> ششم سراسری گاز شیرین در راستای شرقی به غرب و به موازات و فاصله ۱۵ متر از خط لوله<sup>۱</sup> گاز ترش و قسمت دیگری با طول ۱۰ کیلومتر در راستای جنوب به شمال انجام شده است. شکل ۲ منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. با توجه به قرار گرفتن دو خط در مجاورت یکدیگر با فاصله بسیار اندک، امکان تشخیص آن ها روی نقشه های خروجی دشوار است. بدین منظور این خطوط مطابق جدول ۳ شماره گذاری شده اند.

در این رابطه، Y مقدار Probit و a و b ثابت های تجربی اند که با توجه به اطلاعات حوادث و آزمایش های انجام شده روی حیوانات محاسبه می شوند. معادله Probit برای آثار سمی گاز ترش در رابطه (۸) آورده شده است (James, M., 2014).

$$Y = -31.42 + 3.008 \ln D \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این رابطه، D دوز کشنده است. همچنین برای برآورد احتمال مرگومیر بر اثر فشار انفجار، رابطه (۹) به کار می رود.

$$Y = 1.47 + 1.35 \ln D \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، D مقدار حداکثر فشار در واحد psi است. پس از محاسبه احتمال خرابی و احتمال مرگومیر فردی بر اثر هر پیامد در موقعیت معلوم، میزان ریسک فردی را می توان اندازه گرفت.

### ۳-۵- محاسبه میزان ریسک فردی

با توجه به وضعیت شبکه ای خط لوله مورد مطالعه، برخی نقاط در سطح منطقه تحت تأثیر خرابی چندین قسمت از خط لوله قرار دارند؛ بنابراین برای محاسبه مقدار تجمعی ریسک بر اثر n نوع عامل خرابی و در موقعیت  $(x,y)$  متأثر از m قسمت مؤثر در ریسک نقطه مورد نظر، رابطه (۱۰) پیشنهاد شده است.

$$IR(x,y) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \Phi_i P_{ij}(x,y) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

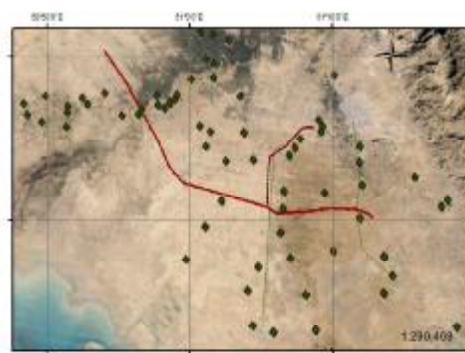
در این رابطه،  $IR(x,y)$  مقدار کلی ریسک فردی در موقعیت  $(x,y)$  متأثر از چندین سناریو به شمار می رود،  $\Phi_i$  احتمال خرابی ناشی از عامل خطر i و  $P_{ij}$  احتمال مرگومیر فردی در موقعیت  $(x,y)$  به دلیل حادثه ای اتفاق افتاده روی m قسمت از خطوط لوله است.

همان طور که از رابطه (۱۰) مشخص است، برای ارزیابی ریسک فردی در یک نقطه به محاسبه سناریوهای بسیاری نیاز است. برای تسهیل پیچیدگی ارزیابی ریسک فردی، فرایند محاسبات در محیط GIS پیاده سازی شد. الگوریتم های جست و جوی مکانی در محیط GIS امکان شناسایی و انتخاب نقاط تحت تأثیر چند قسمت از خطوط لوله برای هریک از سناریوها را فراهم آوردند. در این

1. As Low As Reasonably Practicable

**جدول ۴.** مقادیر احتمال خرابی بهبودیافته برای خط لوله ۵۶ اینچ

عامل خرابی	کوچک	متوسط	بزرگ
جابه‌جایی زمین	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۶
اتصالات جوشی	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۲۸	۰
نقص بهره‌برداری	۰/۰۰۰۳۰۵	۰/۰۰۰۴۵۱	۰/۰۰۰۰۶۶
خوردگی	۰/۰۰۰۰۱۳۰۷	۰/۰۱۱۲۲۴	۰/۰۰۰۷
مداخلات خارجی	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۵۶۹	۰/۰۰۰۰۴۰۶



شکل ۲. موقعیت خطوط لوله مورد مطالعه در استان بوشهر

**جدول ۵.** مقادیر احتمال خرابی بهبودیافته برای خط لوله ۱۲ اینچ

عامل خرابی	کوچک	متوسط	بزرگ
جابه‌جایی زمین	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۹۷	۰/۰۱۵۳
اتصالات جوشی	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۲۸	۰
نقص بهره‌برداری	۰/۰۰۰۳۰۵	۰/۰۰۰۴۵۱	۰/۰۰۰۰۶۶
خوردگی	۰/۰۰۰۱۰۹۸	۰/۰۱۹۴۵۵	۰/۰۰۰۷
مداخلات خارجی	۰/۰۶۷	۰/۱۱۳۴۳۷	۰/۰۰۰۴۸۵

**جدول ۳.** پارامترهای خطوط لوله مورد مطالعه

شماره خط	قطر (inch)	فشار (psig)	ماده	مقدار باد	جهت باد	وضعیت پایداری هوا
۱	۱۲	۱۳۰۵	شیرین	m/s ۱۰	جنوب غربی	D
۲	۵۶	۱۳۰۵	شیرین	m/s ۱۰	جنوب غربی	D
۳	۵۶	۱۳۰۵	ترش	m/s ۱۰	جنوب غربی	D

#### ۴-۳- محاسبه محدوده آسیب پذیری و پیامدهای خرابی خط لوله

همان‌طور که در بخش ۳-۴ اشاره داشتیم، برای محاسبه میزان آسیب وارد بر فرد حاضر در موقعیت معلوم بر اثر هر سناریو، به محاسبه بزرگی پیامد در آن نقطه و مدت زمان قرارگرفتن در معرض آن نیاز است. در این مطالعه، پیامدهای فشار ناشی از انفجار و پخش شدن گاز سمی برای نقاط نمونه با استفاده از نرم‌افزار ALOHA، با فرض قرارگرفتن نقطه نشستی در وسط هر قسمت از خط لوله، شبیه‌سازی شد. روند محاسبات پیامدهای خرابی خط لوله برای تمامی نقاط در منطقه مورد مطالعه تکرار می‌شود و لازم است، برای ایجاد نقاط نمونه در سطح منطقه، چارچوبی وجود داشته باشد. بنابراین یک گرید متشکل از تعدادی نقاط نمونه، با مختصات معلوم و دارای شناسه‌های یکتا برای شناسایی آن‌ها و با فاصله‌های ۲۰۰ متری، به منطقه مورد مطالعه برازش داده شد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، با استفاده از گرید ساختاریافته، محدوده مورد مطالعه به شبکه‌ای با فضاهای یکسان در

#### ۴-۲- محاسبات احتمال خرابی

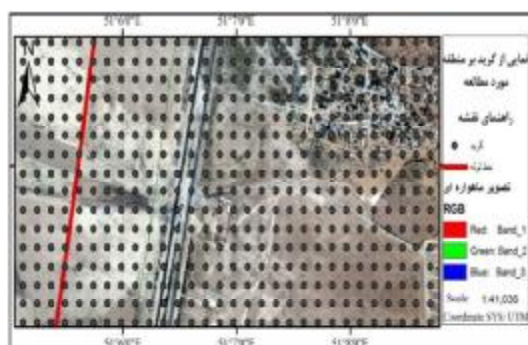
به‌منظور بررسی شیوه تغییرات مکانی احتمال خرابی با تغییر ویژگی‌های خط لوله و محیط اطراف آن، به قسمت‌بندی خط لوله نیاز است. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، خط لوله مورد نظر به قسمت‌های یک کیلومتری تقسیم شد و فرایند برآورد ریسک برای هر قسمت از خط لوله تکرار شده است. از آنجاکه در ایران پایگاه داده معتبری در زمینه آمار و حوادث نشت گاز درون خط لوله وجود ندارد، در این مطالعه عوامل خرابی مطابق گزارش EGIG در نظر گرفته شدند و احتمال خرابی هر بخش از خط لوله با توجه به اطلاعات موجود در پایگاه داده منطقه مورد مطالعه، با استفاده از رابطه (۳)، بهبود داده شد. مقادیر احتمال خرابی بهبودیافته در هر ۱۰۰۰ کیلومتر در سال، برای خط لوله با قطر ۵۶ و ۱۲ اینچ، به ترتیب در جدول ۴ و ۵ آورده شده است.



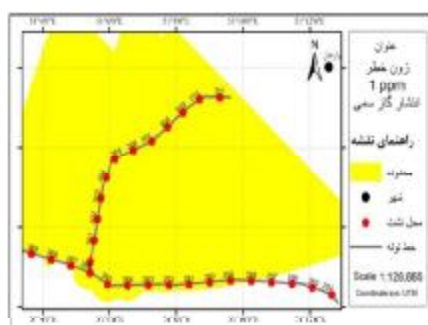
## فریده رضایی نوده و همکاران

در محاسبه محدوده آسیب پذیری پیامدها، باید در نظر داشت که نوع منبع احتراق و نشت در خط لوله تأثیر بزرگی در شدت انفجار دارد. در این مطالعه، محاسبات با فرض بدترین سناریو انجام شده است. در ادامه، نخست نتایج مربوط به شبیه سازی سناریوی پخش شدن گاز سمی و سپس سناریوی انفجار آورده شده است. بدین ترتیب، فواصل خطر و محدوده آسیب پذیری تحت تأثیر مقادیر مرزی ۱۰۰ ppm، ۳۰ ppm و ۰/۱ ppm محاسبه شده است. شکل ۴- الف) محدوده آسیب ۱۰۰ ppm را برای دو قسمت از خط لوله و ناحیه متأثر از نشت هر دو قسمت از خط لوله را نشان می دهد. این فرایند برای نقاط نشستی فرضی روی هر قسمت از خط لوله انجام شده است. شکل های ۴- ب)، ج) و د) محدوده آسیب برای مقادیر مرزی ناشی از نشت گاز سمی را نشان می دهند.

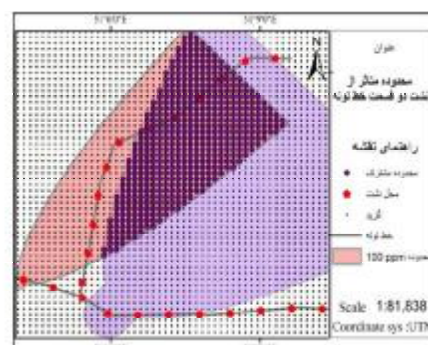
سیستم مختصات کارتیزین تقسیم شد و برای هر نقطه از گرید، فاصله از محل نشت از قسمت های مؤثر در ریسک در آن نقطه محاسبه شد. بدین ترتیب برای پیامدهای گوناگون، میزان آسیب و خطرهای ناشی از آنها در هر محدوده براساس فواصل خطر، در قالب نقشه آسیب پذیری نمایش داده شد.



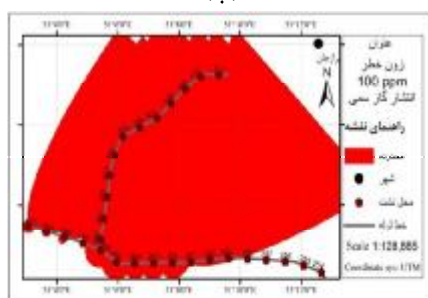
شکل ۳. نمایی از گرید برازش داده شده بر منطقه مورد مطالعه



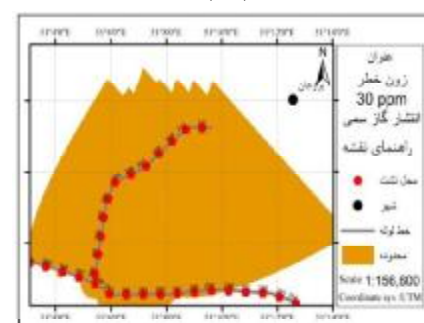
ب)



الف)



د)



ج)

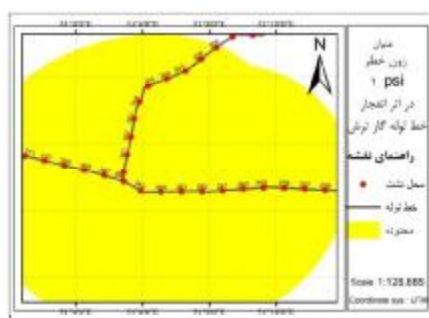
شکل ۴. محدوده آسیب پذیری با غلظت ۱۰۰ ppm برای دو قسمت از خط لوله (الف)؛ محدوده آسیب پذیری با غلظت به ترتیب ppm ۱۰۰، ۳۰ ppm و ۰/۱ ppm (ب)، ج) و د)

سنجش از دور و GIS ایران  
سال هشتم = شماره چهارم = زمستان ۱۳۹۵

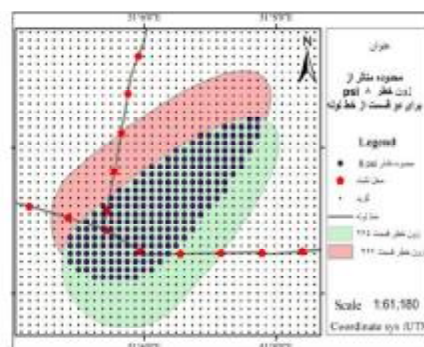
#### برآورد کمی ریسک خطوط انتقال گاز ...

شدند و سپس با استفاده از رابطه (۵)، درصد مرگ‌ومیر در هر نقطه محاسبه شد. سپس تمامی نقاط نمونه متأثر از نقطه نشستی در هر قسمت از خط لوله بر اثر هر پیامد بررسی شدند و براساس شناسه واحد متناسب به نقاط بدترین پیامد، در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، با

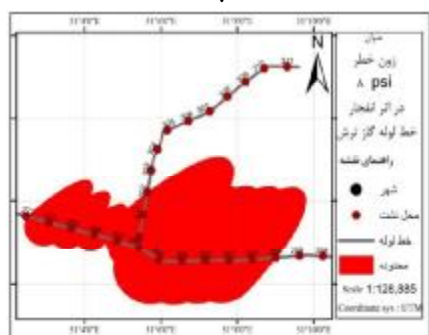
همچنین در حالت دوم محاسبات فشار بیش از حد انفجار برای مقادیر ۸ psi، ۳/۵ psi و ۱ psi انجام شده است. نقشه محدوده خطر، برای مقادیر مرزی فشار ناشی از انفجار در سناریوی بدترین حالت، در شکل ۵ آورده شده است.



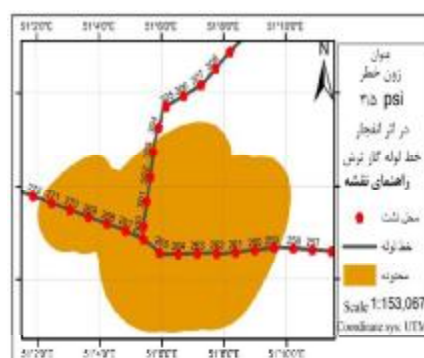
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

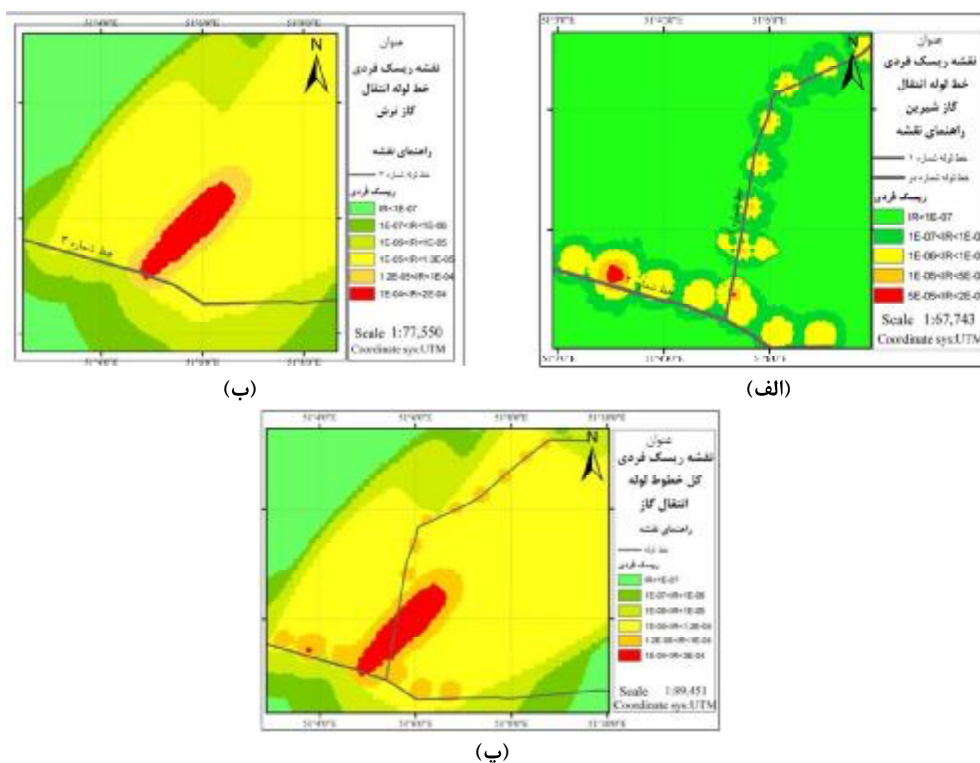
شکل ۵. محدوده آسیب‌پذیری با فشار ۸ psi برای دو قسمت از خط لوله (الف)؛ محدوده آسیب‌پذیری با فشار به ترتیب ۸ psi، ۳/۵ psi و ۱ psi (ب)، (پ) و (ت)

#### ۴-۴- برآورد ریسک فردی

در مرحله بعد، باید نقاط گریز متأثر از نشت را در هر قسمت از خط لوله شناسایی کرد. با این هدف، از الگوریتم‌های جست‌وجوی مکانی مناسب با توجه به فواصل آسیب‌پذیری استفاده شد و نقاط واقع در محدوده‌های آسیب‌پذیری مورد نظر متأثر از قسمت‌های خط لوله انتخاب شدند. پس از محاسبه میزان غلظت گاز سمی و فشار ناشی از انفجار در نقاط مذکور، مقادیر محاسبه‌شده با استفاده از مدل آسیب‌پذیری برای هر پیامد به مقدار احتمالاتی تبدیل

استفاده از ابزار درون‌یابی مقدار ریسک فردی برای تمامی نقاط اطراف خط لوله محاسبه شد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، برای امکان نمایش تغییرات ریسک با توجه به تغییرات مشخصات خط لوله، برای خط لوله گاز شیرین و گاز ترش نقشه‌ای جداگانه تهیه شده است و در انتها نقشه ریسک تمامی خطوط با در نظر گرفتن آثار تجمعی خطوط در یکدیگر در سطح منطقه آورده شده است. باید توجه داشت که سطح اطمینان نقشه‌های تولیدشده ۹۵٪ است.

## فریده رضایی نوده و همکاران



شکل ۶. نقشهٔ ریسک فردی خط لولهٔ گاز شیرین (الف)؛ نقشهٔ ریسک فردی خط لولهٔ گاز ترش (ب)؛ نقشهٔ ریسک فردی کل خطوط لوله در سطح اطمینان ۹۵٪ (پ)

### ۴-۵- تحلیل نتایج و بحث

محدوده‌های ریسک در جهت جنوب‌غرب به سمت شمال‌شرق است. این امر سبب تشدید پراکنش گاز سمی شده و سطح ریسک را در مناطق مجاور خط لوله افزایش داده است. از سویی، جهت جریان گاز در این خط از شرق به سمت غرب است؛ بنابراین با افزایش فاصله از شیر قطع اتوماتیک، در صورت وقوع نشتی روی خط لوله، حجم گاز خارج‌شده افزایش می‌یابد و پیامدهای گسترده‌تر را به همراه خواهد داشت. در نتیجه، بزرگی میزان ریسک با افزایش فاصله از شیر قطع اتوماتیک افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۶- (پ) نشان داده شده است، در حالت پس از فرایند، برآورد ریسک با در نظر گرفتن هر دو خط لولهٔ گاز ترش و شیرین و محاسبهٔ آثار تجمعی هر سه خط در نقاط گرید در اطراف خط لوله انجام شده است. نقشهٔ ریسک خروجی

همان‌طور که در شکل ۶- (الف) نشان داده شده است، میزان ریسک فردی برای خط لولهٔ گاز شیرین در بازهٔ ۰ تا 2E-04 است. در این تحقیق از پیامد انتشار گاز سمی در خطوط لولهٔ گاز شیرین، به دلیل کوچک بودن مقادیر آن، چشم‌پوشی شده است. بنابراین خطر شوک و فشار انفجار خط لولهٔ ۱۲ اینچ (خط شمارهٔ ۱) و خط لولهٔ ۵۶ اینچ گاز شیرین (خط شمارهٔ ۲) باید زیر نظر قرار گیرد.

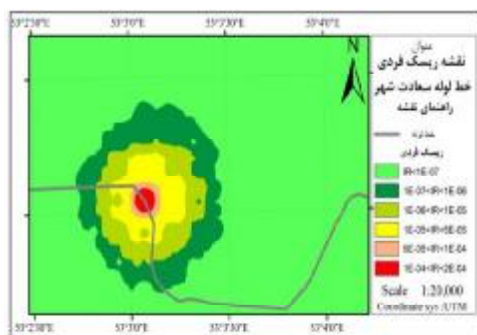
همچنین طبق شکل ۶- (ب)، میزان ریسک فردی خط لولهٔ ۵۶ اینچ گاز ترش (خط شمارهٔ ۳) در بازهٔ ۰ تا 2E-04 قرار دارد. نتایج به دست‌آمده حاکی از بالا بودن غلظت گاز ترش در نواحی نزدیک به خط لوله و احتمال مرگ‌ومیر بالا در این محدوده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، به‌علت جنوب‌غربی بودن جهت وزش باد منطقه، جهت تمامی

برای بررسی صحت روش به کاررفته در این مطالعه، آمار و مشخصات دقیق حادثه انفجار خط لوله گاز سعادت شهر از بایگانی حوادث گذشته شرکت انتقال گاز ایران تهیه شد. بدین ترتیب روش پیشنهادی، با توجه به اطلاعات موجود از زمان پیش از وقوع حادثه، روی این منطقه پیاده سازی شد. این حادثه تلفات جانی نداشته اما منجر به آسیب دیدن محصولات کشاورزی واقع در شعاع چهار کیلومتری از محل نشت گاز شده است. برای بررسی محدوده آسیب پذیری محصولات کشاورزی، محدوده درک فشار ۰/۵ psi در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل ۷ آمده، نتایج پیاده سازی روش پیشنهادی روی این منطقه محدوده آسیب پذیری ۸ psi با شعاع ۱۳۵ متر است که با توجه به فاصله زیاد ناحیه مسکونی از محل نشت، تلفات جانی اتفاق نمی افتد. همچنین محدوده درک فشار ۰/۵ psi با شعاع ۴/۵ کیلومتر به دست آمده؛ بنابراین خطای نسبی پیش بینی میزان ریسک از طریق مدل پیشنهادی ۰/۱۱ است.

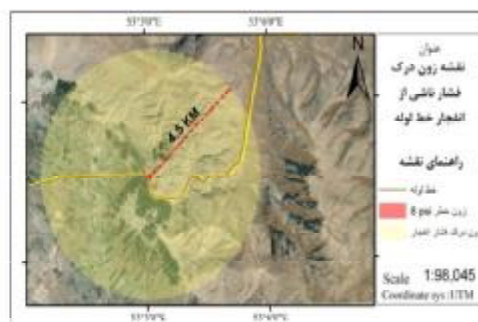
#### ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مطالعه پس از محاسبه ریسک کمی خط لوله به صورت جداگانه، محدوده خطر اطراف خط لوله، از لحاظ میزان ریسک، بررسی و پهنه بندی شد. سپس آثار تجمعی خطوط در نقاط گرید محاسبه شد. نقشه های تولید شده بیانگر این است که فرار گرفتن چند خط پرفشار انتقال گاز در مجاورت یکدیگر سبب تشدید میزان ریسک در سطح منطقه شده است.

حاصل از نتایج هر سه خط مورد مطالعه شباهت بیشتری با نقشه ریسک خط شماره ۳ دارد؛ به این دلیل که با توجه به مشابه بودن مشخصات دو خط لوله، همچون قطر و فشار بهره برداری، در بیشتر قسمت های خطوط لوله ۵۶ اینچ، پیامد فشار ناشی از انفجار تقریباً نتایج مشابهی را داشته است. بنابراین بالابودن حجم گاز نشتی و احتمال مرگومیر بالا بر اثر انتشار گاز ترش در خط شماره ۳ نقش مهمی در افزایش ریسک در سطح منطقه دارد. در نقشه نهایی تمامی خطوط نیز جهت افزایش ریسک در جهت وزش باد در سطح منطقه است. به طور کلی می توان گفت، در مقایسه با خط لوله گاز شیرین، خط لوله گاز ترش پیامدهای بزرگ تری را در پی خواهد داشت؛ به گونه ای که پیامدهای حاصل از این خط حتی خط لوله ۱۲ اینچ گاز شیرین را نیز دربر گرفته است. در واقع به دلیل تراکم خط لوله در این منطقه، وجود چند خط لوله در ریسک در نقطه ای معلوم اثر گذاشته است. محدوده ای با ریسک بیشتر از 1E-04 بسیار خطر دارد و هرگونه فعالیت و ساخت و ساز در این منطقه ممنوع است. این ریسک بالا به علت قرار گرفتن این محدوده در راستای میانگین جهت وزش باد در منطقه و اثر تجمعی چندین قسمت از خط لوله در پیامدهای وارد بر این محدوده پدید آمده است. با توجه با مقادیر ریسک محاسبه شده و نقشه های تولید شده می توان در به حداقل رساندن سطح ریسک و مدیریت و برنامه ریزی کاربری زمین های اطراف خطوط لوله اقدام کرد.



(ب)



(الف)

شکل ۷. محدوده آسیب پذیری ۰/۵ psi بر اثر انفجار خط لوله سعادت شهر (الف)؛ نقشه ریسک فردی (ب)

**User's Guide for the DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model**, US Environmental Protection Agency.

Dziubiński, M., Frączak, M. & Markowski, A., 2006, **Aspects of Risk Analysis Associated with Major Failures of Fuel Pipelines**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(5), PP. 399-408.

**EGIG (European Gas Pipeline Incident Data Group)**, 2015, Gas pipeline incidents 9th report, 1970–2013.

Frequencies, B., 2010, **Risk Assessment Data Directory**, OGP (International Association of Oil and Gas Producers), No. 434-2, Report.

Gharabagh, M.J., Asilian, H., Mortasavi, S.B., Mogaddam, A.Z., Hajizadeh, E. & Khavanin, A., 2009, **Comprehensive Risk Assessment and Management of Petrochemical Feed and Product Transportation Pipelines**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22(4), PP. 533-539.

Han, Z. & Weng, W., 2010, **An Integrated Quantitative Risk Analysis Method for Natural Gas Pipeline Network**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 23(3), PP. 428-436.

Han, Z. & Weng, W., 2011, **Comparison Study on Qualitative and Quantitative Risk Assessment Methods for Urban Natural Gas Pipeline Network**, Journal of Hazardous Materials, 189(1), PP. 509-518.

James, M., 2014, **Simplified Methods of Using Probit Analysis in Consequence Analysis**, Eastman Chemical Company.

Jamshidi, A., Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S.H. & Khaleghi, S. 2013, **Developing a New Fuzzy Inference System for Pipeline Risk Assessment**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26(1), PP. 197-208.

Jo, Y.D. & Ahn, B.J., 2005, **A Method of Quantitative Risk Assessment for Transmission Pipeline Carrying Natural Gas**, Journal of Hazardous Materials, 123(1), PP. 1-12.

در این میان، الگوریتم‌های GIS امکان شناسایی و انتخاب نقاط تحت تأثیر چند قسمت از خط لوله را فراهم آورد که سبب نظام‌مند شدن فرایند برآورد ریسک شده است. همچنین استفاده از GIS در این تحقیق سبب توانایی تشخیص و بصری‌سازی فاصله‌های خطرناک، محدوده آسیب‌پذیری و مناطق پرخطر بر اثر پیامدهای گوناگون نشت گاز شده است.

تجزیه و تحلیل ریسک خطوط لوله گاز و استفاده از نتایج آن موجب افزایش ایمنی محیط اطراف این تأسیسات می‌شود. با استفاده از نتایج آنالیز کمی ریسک می‌توان اقداماتی در جهت مدیریت ایمنی تأسیسات با ریسک بالا و ارتقای ایمنی و تضمین امنیتی طرح‌های توسعه انجام داد. از این رو، با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز کمی ریسک، می‌توان برای پیشگیری از سوانح فاجعه‌بار اقدام کرد. ایران کشوری در حال توسعه و از بزرگ‌ترین صادرکننده‌های گاز در جهان است که تأسیسات انتقال گاز موجود و یا در دست احداث بسیاری دارد. از این منظر، نتایج آنالیز کمی ریسک امکان به حداقل رساندن سطح ریسک و مدیریت بحران تأسیسات پرخطر موجود را برای مدیران دولتی فراهم می‌آورد. شایان ذکر است که در این مطالعه، به‌طور تجربی، اندازه سلول ۲۰۰ متر برای پیاده‌سازی انتخاب شده است؛ بنابراین مطالعه روی مقیاس و اندازه سلول مناسب برای برآورد کمی ریسک خطوط لوله انتقال گاز پیشنهاد می‌شود.

### تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت و پشتیبانی شرکت ملی گاز ایران اجرا شده است؛ بنابراین از همکاری ایشان صمیمانه تشکر می‌کنیم.

### منابع

CCPS, E., 1999, **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**.

Spicer, T., Havens, J. & Guinnup, D., 1989,

- Jonkman, S., Van Gelder, P. & Vrijling, J., 2003, **An Overview of Quantitative Risk Measures for Loss of Life and Economic Damage**, Journal of Hazardous Materials, 99(1), PP. 1-30.
- Kirchhoff, D. & Doberstein, B., 2006, **Pipeline Risk Assessment and Risk Acceptance Criteria in the State of Sao Paulo, Brazil**, Impact Assessment and Project Appraisal, 24(3), PP. 221-234.
- Ma, L., Cheng, L. & Manchun, L., 2013 *a*. **Quantitative Risk Analysis of Urban Natural Gas Pipeline Networks Using Geographical Information Systems**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26(6), PP. 1183-1192.
- Ma, L., Yongshu, L., Lei, L., Manchun, L. & Cheng, L., 2013 *b*. **A Novel Method of Quantitative Risk Assessment Based on Grid Difference of Pipeline Sections**, Safety Science, 59: 219-226.
- Methods of Approximation and Determination of Human Vulnerability for Offshore Major Accident Hazard Assessment**, 2013, HSE, Review Date: Version No. 3, -11-01. Author Section: HID OSD.
- Muhlbauer, W.K., 2004, **Pipeline Risk Management Manual: Ideas, Techniques, and Resources**, USA: Gulf Professional Publishing.
- Montiel, H., Vilchez, J.A., Arnaldos, J. & Casal, J., 1996, **Historical Analysis of Accidents in the Transportation of Natural Gas**, Journal of Hazardous Materials, 51(1), PP. 77-92.
- Najafi, M. & Baosong, M., 2009, **Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications**, ASCE.
- United States Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmo-spheric Administration, 2007, ALOHA User Manual, <http://www.epa.gov/OEM/cameo/aloha.htm>.
- Zhou, Y., Hu, G., Li, J. & Diao, C. 2014, **Risk Assessment along the Gas Pipelines and its**