

## تحلیل خطر آتش‌سوزی پس از زلزله در خطوط لوله گاز با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (مطالعه موردی: منطقه ۲۰ شهر تهران)

علیرضا صادقیان<sup>۱</sup>، بابک امیدوار\*<sup>۲</sup> و اسماعیل صالحی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

### چکیده

به نظر می‌رسد با توجه به عمر بالای خطوط لوله گاز منطقه ۲۰ شهر تهران و در برخی موارد گذر لوله‌های گاز از روی گسل و یا نزدیکی گسل‌های موجود، این منطقه پتانسیل خسارت بالایی در برابر سوانح احتمالی از جمله زلزله و آتش‌سوزی پس از آن داشته باشد. در این تحقیق، روشی تحلیلی- عددی برای تخمین احتمال وقوع اشتعال ناشی از شبکه توزیع برق و خطوط لوله گاز پس از زلزله در منطقه ۲۰ شهر تهران ارائه شده است. به این منظور، با تحلیل خطر و برآورد آسیب‌پذیری در برابر زلزله به تحلیل خطر آتش‌سوزی خطوط لوله گاز پس از زلزله پرداخته شده است. در ادامه برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مراحل تحلیل، حالات مختلف خسارت لرزه‌ای خطوط لوله شبکه گاز و آتش‌سوزی پس از آن بر اساس روش مونت کارلو شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، در شدیدترین حالت که مربوط به سناریوی دوم (گسل جنوب ری) می‌باشد؛ به طور متوسط وقوع ۲۰ نشت، ۷ شکست و ۹ اشتعال ناشی از آسیب لرزه‌ای خطوط لوله گاز، محاسبه شده است. با اعمال راهکار مبتنی بر جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به جای لوله‌های ترد، نتایج ذکر شده در حالت نشت ۶۵٪، در حالت شکست ۷۱٪ و در حالت اشتعال ۸۹٪ تقلیل یافت. مقادیر ذکر شده مقدار میانگین پارامترهای مورد نظر است که به منظور تعیین عدم قطعیت آن‌ها، در ادامه تحقیق توابع توزیع احتمال متغیرهای مذکور به همراه پارامترهای توزیع ارائه شده است که می‌تواند مرجع تصمیم‌گیری با توجه به قابلیت اطمینان مورد نظر باشد.

**واژگان کلیدی:** تحلیل خطر، آتش‌سوزی، شبیه‌سازی مونت کارلو، شبکه گاز، شبکه برق، تهران.

### ۱- مقدمه

شهر تهران در دامنه جنوبی البرز مرکزی و بر روی نهشته-های آبرفتی کواترنر<sup>۲</sup> بنا شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با وجود گسل‌های لرزه‌زا و کواترنر نظیر راندگی شمال تهران، کهریزک، ری و پیشوا و ده‌ها گسل کوچک در بستر شهر تهران و نیز با توجه به تاریخچه لرزه‌ای این شهر، احتمال رویداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگی بیش از هفت ریشتر در این شهر می‌تواند قابل انتظار باشد [۳]. در این میان نامقاوم بودن بسیاری از ساختمان‌های تهران در برابر زلزله و نیاز به مقاوم‌سازی شریان‌های حیاتی، ضرورت تحلیل احتمال رویداد حریق پس از زمین‌لرزه در این شهر را بدیهی می‌نماید. لوله‌کشی گاز تهران از دیگر موارد مهم مخاطرات پس از رویداد زلزله می‌باشد. انشعابات گاز در مجاور ساختمان‌های نامقاوم و آسیب‌های ناشی از ساختمان‌های خسارت دیده و همچنین گذر لوله‌های گاز از روی گسل‌های گوناگون و یا نزدیکی آن‌ها می‌تواند موجب بروز

با توجه به لزوم پیشگیری از بحران پس از زلزله در شهرهای بزرگ، حفاظت از شریان‌های حیاتی در برابر آسیب‌های ناشی از زلزله اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. در این میان یکی از اولین اولویت‌های مقابله با بحران پس از زلزله، به شبکه‌های گازرسانی داده می‌شود [۱]. زیرا این سیستم اثر مستقیم و ویژه‌ای در ایمنی شهروندان و اموال آنان دارد. تجربیات زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد اگر سیستم گازرسانی تحت تأثیر خسارات ناگهانی و شدید یک زلزله قرار گیرد، غفلت در زمان وقوع نشت گاز موجب آتش گرفتن گاز و گستردگی دامنه آتش‌سوزی و بروز انفجارهای مهیب گاز و به دنبال آن تلفات انسانی چشمگیر می‌گردد. اهمیت این موضوع آن‌چنان است که بایرلی<sup>۱</sup> زلزله‌شناس معروف در کتاب خود تحت عنوان زلزله شناسی می‌نویسد: «وقوع حریق پس از زلزله‌های بزرگ آن‌چنان معمول است که باید آن را قسمت مکمل زلزله تلقی نمود» [۲].

می‌باشد. گسل شمال ری به صورت دیواره فرسوده‌ای به بلندی ۲ متر با راستای شرقی- غربی و درازای ۱۶/۵ کیلومتر در شمال و شمال غربی شهر ری قرار گرفته است. گسل جنوب ری به شکل دیواره کوتاه (میان ۱ تا ۲ متر) و درازای کلی حدود ۱۸/۵ کیلومتر بوده و ادامه شرقی و غربی آن در زیر رسوبات جوان رودخانه‌ای و دشتی ناپدید می‌شود [۵]. در شکل (۲) موقعیت گسل‌ها و منطقه مورد نظر در مقایسه با مناطق اطراف آن قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۳)، نقشه گسل‌ها و شبکه گاز منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

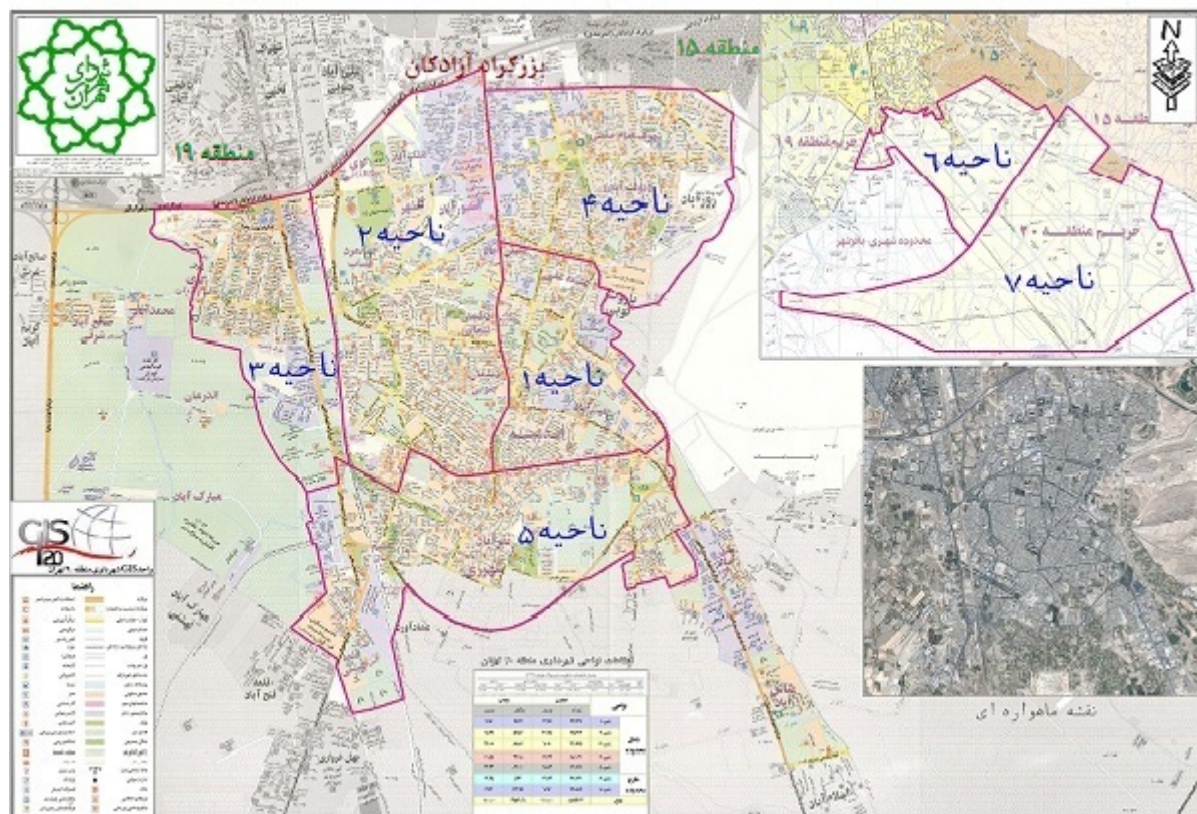
به نظر می‌رسد با توجه به قدمت منطقه ۲۰ شهر تهران و عمر بالای خطوط لوله گاز، این منطقه پتانسیل خسارت بالایی در برابر سوانح احتمالی از جمله زلزله و آتش‌سوزی پس از آن داشته باشد. لذا در این پژوهش، خطرپذیری آتش‌سوزی پس از زلزله در خطوط لوله گاز منطقه ۲۰ شهر تهران مورد تحلیل قرار گرفته است.

خطرهای فراوانی شود. به علاوه مسائلی از قبیل وقوع جرقه در نتیجه اتصال سیم‌های برق، می‌تواند احتمال وقوع آتش‌سوزی پس از زلزله را تشدید نماید. مطالعه موردی در این پژوهش، بررسی و تحلیل خطر آتش‌سوزی پس از زلزله در خطوط لوله گاز منطقه ۲۰ شهر تهران می‌باشد.

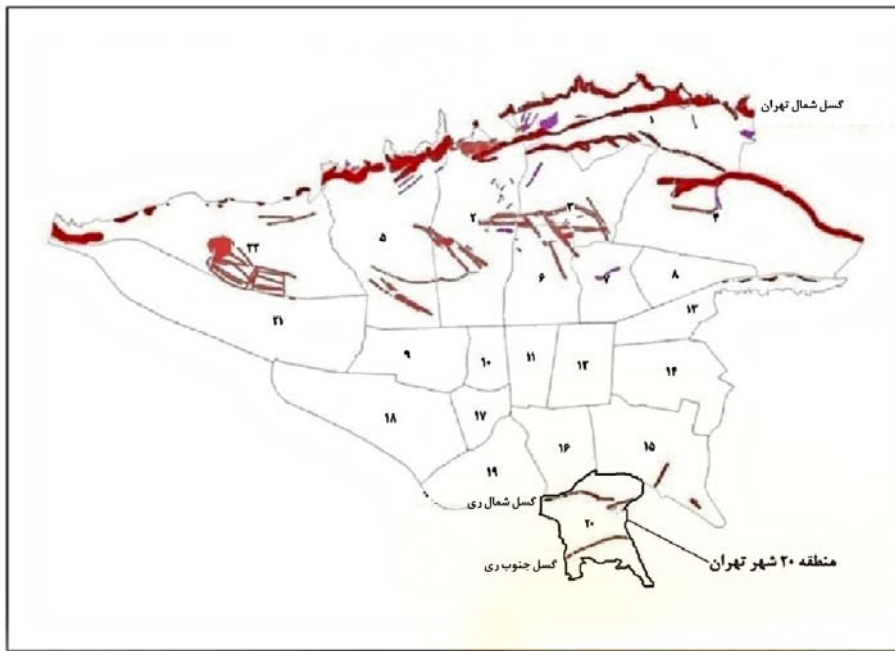
منطقه ۲۰ شهر تهران با مساحتی در حدود ۲۳ کیلومتر مربع داخل محدوده شهری و ۱۵۳ کیلومتر مربع حریم، دارای ۳۷۸۴۴۵ نفر جمعیت می‌باشد که در منتهی‌الیه جنوب شرقی تهران قرار دارد. از لحاظ تقسیمات شهرداری منطقه ۲۰ شهر تهران به ۷ ناحیه شهرداری و ۲۲ محله شهری تقسیم می‌شود [۴]، که در شکل (۱) نواحی ۷ گانه آن نشان داده شده است.

منطقه ۲۰ در گستره فرونشست شمال ایران مرکزی (دشت تهران-ری) جای دارد. این بخش که قسمت‌های مرکزی و جنوبی شهر تهران، شهرری و جنوب آن را فرا می‌گیرد، از نهشته‌های آبرفتی جوان و کمی قدیمی‌تر پوشیده شده است و مخروط افکنه‌های رودخانه‌های کن، کرج و جاجرود قسمت‌های جنوبی آن را می‌پوشاند [۵].

گسل‌های شمال و جنوب ری؛ گسل‌های موجود در منطقه



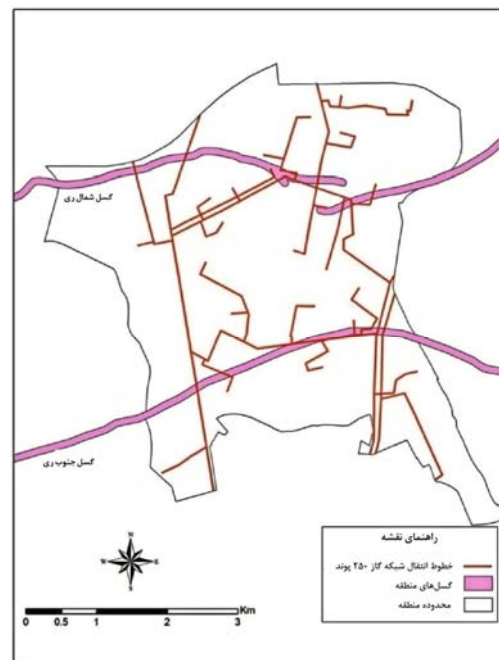
شکل ۱- تقسیمات شهرداری منطقه ۲۰ شهر تهران [۴]



شکل ۲- موقعیت گسل‌ها و منطقه مورد نظر در مقایسه با مناطق اطراف آن [۶]

تحقیقاتی انجام شده بر روی اشتعال‌های پس از زلزله که به مدل‌سازی این پدیده منجر شده است، عمدتاً غیر تحلیلی و بر اساس داده‌های آماری آتش‌سوزی پس از زلزله‌های آمریکا و ژاپن بوده است [۷].

Mizuno و همکاران [۸] اولین مدل اشتعال پس از زلزله را بر اساس داده‌های آماری آتش‌سوزی پس از زلزله‌های ژاپن ارائه دادند. در سال ۱۹۸۶، Scawthorn [۹] مدل اشتعال پس از زلزله برای کانادا را با استفاده از روش فوق (داده‌های آماری آتش‌سوزی پس از زلزله) بر اساس زلزله‌های کالیفرنیا از سال ۱۹۷۱ تا آن تاریخ ارائه داد. در سال ۱۹۹۱، Cousins و همکاران [۱۰] از این مدل برآورد تعداد اشتعال پس از زلزله برای کشور زلاندنو استفاده نموده‌اند. Eidinger و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۵ با در نظر گرفتن تمامی زلزله‌های قرن بیستم آمریکا تا آن زمان و حتی آن زلزله‌هایی که در مدل اسکاتورن در نظر گرفته نشده بود، رابطه جدیدی را برای برآورد اشتعال مؤثر و غیر عمدی پس از زلزله ارائه نمود. از این رابطه از سال ۲۰۰۱ در متدولوژی HAZUS استفاده شده است [۱۲]. همچنین مطالعاتی توسط Todorovaska و Trifunace [۱۳] در سال ۱۹۹۸ انجام شده است که در آن تعداد اشتعال‌های پس از زلزله ۱۹۹۴ نورتریج به عنوان توابعی از شدت مرکالی اصلاح شده، تعداد شکستگی‌های لوله‌های آب، تعداد ساختمان‌های علامت‌گذاری شده و بیشینه سرعت زمین طبقه‌بندی شده است



شکل ۳- نقشه شبکه گاز و گسل‌های منطقه ۲۰ شهر تهران [۶]

## ۲- پیشینه تحقیق

زلزله‌های شهر سن‌فرانسیسکو در سال ۱۹۰۶ و شهر توکیو در سال ۱۹۲۳، به علت وقوع آتش‌سوزی‌های بعد از آن، به عنوان دو مورد از بدترین فجایع تاریخ بشری به حساب می‌آیند. به همین علت اولین تحقیقات در زمینه آتش‌سوزی پس از زلزله توسط دو کشور آمریکا و ژاپن انجام شده است. فعالیت‌های

مختلف به دست آمده است. این منحنی‌ها می‌تواند برای تعیین اولویت در برنامه‌های کاهش و پیشگیری در نواحی شهری بکار برده شود. در سال ۲۰۱۱، Esposito [۱۹]، پایگاه داده سیستم اطلاعات جغرافیایی را توسعه داد که این پایگاه، داده‌های فیزیکی و خصوصیات عملکردی سیستم توزیع گاز لاکویلا<sup>۱</sup> را جهت توصیف رفتار لرزه‌ای تمامی اجزا دربر می‌گرفت. منطقه لاکویلا بر حسب خطرات تغییر شکل ناپایدار و پایدار زمین شناسایی شد و در ادامه به منظور ارزیابی پاسخگویی سیستم بر حسب شاخص‌های عملکردی، شبیه‌سازی احتمالاتی برای حالت‌های مختلف اجرا گردید.

### ۳- روش‌شناسی تحقیق

فرآیند تحقیق حاضر شامل سه گام اصلی، ۱- تحلیل خطر زلزله، ۲- برآورد آسیب‌پذیری در برابر زلزله، و ۳- تحلیل خطر آتش‌سوزی پس از زلزله می‌باشد. در این تحقیق در گام اول، به منظور تحلیل خطر زلزله، اجزاء شبکه‌های گاز و برق و همچنین ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه و کاربری‌های موجود شناسایی شد و اطلاعات مربوط به آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار "ARC GIS" در لایه‌های اطلاعاتی مجزا به سامانه اطلاعات جغرافیایی وارد شد. سپس سه سناریوی زلزله برای منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد و پس از انتخاب روابط کاهندگی مناسب (رابطه زارع و رابطه قدرتی و همکاران)، پارامترهای لرزه-ای (بیشینه شتاب و سرعت زمین) برای هر یک از قطعات خطوط لوله گاز که قبلاً در محیط GIS مدل شده بود، محاسبه شد.

در گام دوم، به منظور برآورد آسیب‌پذیری در اثر زلزله، نرخ تعمیر و احتمال خرابی در اثر حداکثر سرعت زمین<sup>۲</sup> و همچنین نرخ تعمیر و احتمال خرابی در اثر تغییر مکان دائمی زمین<sup>۳</sup> با استفاده از روش‌شناسی HAZUS در مرکز هر یک از قطعات لوله در نظر گرفته شده برای هر سه سناریوی زلزله محاسبه شد. در این مرحله به منظور تشخیص این که قطعه خراب شده، نشت نموده یا شکسته شده است، احتمال خرابی قطعه مورد نظر با یک عدد تصادفی مقایسه شده و در مورد آن تصمیم‌گیری می‌شود. سپس احتمال خسارت شبکه برق در سطوح مختلف خرابی در منطقه مورد نظر محاسبه شد.

و همچنین برای آن‌ها تعدادی منحنی پیشنهاد شده است. Williamson و Groner [۱۴] نیز در سال ۲۰۰۰ مطالعاتی را برای روی اشتعال‌های پس از زلزله به دلیل تخریب شبکه توزیع برق و گاز انجام داده‌اند که آسیب‌پذیری بیشتر را برای مناطق پرجمعیت و یا بافت فرسوده، نسبت به وقوع اشتعال‌های پس از زلزله نشان می‌دهد. آنچه از مطالعات پیشین درباره آتش‌سوزی پس از زلزله برمی‌آید این است که اکثر مدل‌های تخمین اشتعال‌های پس از زلزله بر مبنای داده‌های تجربی و کارهای آماری بوده‌اند و تفاوتی میان جداگانه مدل نکرده‌اند. در سال ۲۰۰۸، Zolfaghari و همکاران [۱۵] مدلی تحلیلی را برای برآورد احتمالی اشتعال‌های داخل ساختمانی ارائه کرده‌اند. در مدل آن‌ها احتمال یک اشتعال در هر ساختمان برای یک زلزله سناریو محاسبه شده است و عواملی نظیر تخریب اجزاء سازه‌ای، اجزاء غیر سازه‌ای ساختمان و واژگونی محتویات ساختمان، چگالی ساختمان‌ها (مساحت ساختمان‌ها، تعداد طبقات ساختمان‌ها)، انواع محتویات آن‌ها، کاربری ساختمان‌ها، زمان زلزله در سال و روز و عدم قطعیت مرتبط با هر یک از آن‌ها در محاسبه اشتعال در نظر گرفته شده است. Karaman و Yildiz [۱۶] در سال ۲۰۱۲، مدلی فیزیکی به منظور تخمین تعداد آتش‌سوزی‌های پس از زلزله در داخل ساختمان و محل آن برای مناطق شهری ارائه دادند. در این مدل علاوه بر شدت مرکالی اصلاح شده و بیشینه شتاب زمین، عوامل دیگری نظیر سیستم تجهیزات ساختمانی (سیستم گاز و برق)، لوازم پرخطر (بخاری، اجاق گاز و...) و لوازم کم خطر (کامپیوتر، تلویزیون و...) در نظر گرفته شده است.

تحقیقات دیگری در رابطه با بررسی دلایل وقوع اشتعال‌های پس از زلزله انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به کارهای Scawthorn و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۵ بر روی اثرات تخریب شبکه توزیع گاز بر وقوع اشتعال‌های پس از زلزله اشاره نمود. آن‌ها بیان داشتند که ۲۶٪ اشتعال‌های اتفاق افتاده پس از زلزله نورتریج به دلیل تخریب شبکه توزیع گاز بوده است. Behnamfar و Rajabipour [۱۸] در سال ۲۰۰۸، مدلی را برای تخمین احتمالاتی گسترش آتش‌سوزی پس از زلزله ناشی از خرابی خطوط لوله گاز ارائه دادند. این مدل شامل ارزیابی سناریوهای خرابی خطوط لوله، مدل‌سازی اشتعال گاز طبیعی و مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی می‌باشد که با شبیه‌سازی عددی مدل پیشنهادی، منحنی‌هایی بر حسب زمان برای نشان دادن چگونگی آتش‌سوزی و افزایش خسارات پس از زلزله در مناطق

1- L'Aquila

2- Peak ground velocity

3- Permanent ground deformation

البته در خصوص وضعیت گسل شمال و جنوب ری بین متخصصین اختلاف نظر وجود دارد. در تحقیقات اخیر توسط Nazari و همکاران [۲۲] اشاره شده است که این دو اصولاً گسل نبوده و ناشی از رسوبات دشت تهران می‌باشد. پس از انتخاب زلزله‌های سناریو برای محدوده مورد مطالعه، باید پارامترهای مربوط به این زلزله‌ها محاسبه گردند. در این مطالعه از میانگین روابط کاهندگی زارع [۲۳] و Kazemi و همکاران [۲۴] برای حداکثر شتاب زمین و حداکثر سرعت زمین استفاده شده است. از مدل‌های دیگر در این زمینه می‌توان به مراجع [۲۵، ۲۶] اشاره کرد. مدل کاهندگی برای محاسبه بیشینه شتاب و سرعت زمین توسط زارع [۲۳] به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$\log A = aM + bX - \log X + C + \sigma P \quad (1)$$

در این رابطه،  $A$  پارامتر لرزه‌ای مورد نظر (شتاب یا سرعت بیشینه زمین برحسب  $m/s^2$  و  $m/s$ )،  $M$  بزرگای گشتاوری زلزله،  $X$  فاصله کانونی زلزله (برحسب کیلومتر)،  $C$  ضریب ساختگاه،  $\sigma$  انحراف معیار و  $P$  درصدی از انحراف معیار است که در محاسبات اعمال می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته خاک منطقه مورد مطالعه از آبرفت نرم تشکیل شده است، لذا بسته به خاک منطقه، از ضرایب جدول (۲) استفاده می‌شود. همچنین با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه از ضرایب مؤلفه افقی شتاب ایران مرکزی - البرز استفاده شده است. مدل کاهندگی برای محاسبه بیشینه شتاب و سرعت زمین برای تحقیقات Kazemi و همکاران [۲۴] به صورت زیر می‌باشد:

$$\ln y = C_1 + C_2 M_S + C_3 \ln R + C_4 R + \sigma \quad (2)$$

در این رابطه،  $y$  پارامتر لرزه‌ای مورد نظر (شتاب  $(cm/sec^2)$  یا سرعت بیشینه زمین  $(cm/sec)$ )،  $M_S$  بزرگای سطحی زمین لرزه،  $R$  فاصله کانونی زلزله (برحسب کیلومتر) و  $\sigma$  انحراف معیار می‌باشد. با توجه به سرعت متوسط موج برشی در منطقه، ساختگاه منطقه، ساختگاه خاکی در نظر گرفته شده و از ضرایب موجود برای ایران مرکزی - البرز، مطابق جدول (۳) استفاده شده است.

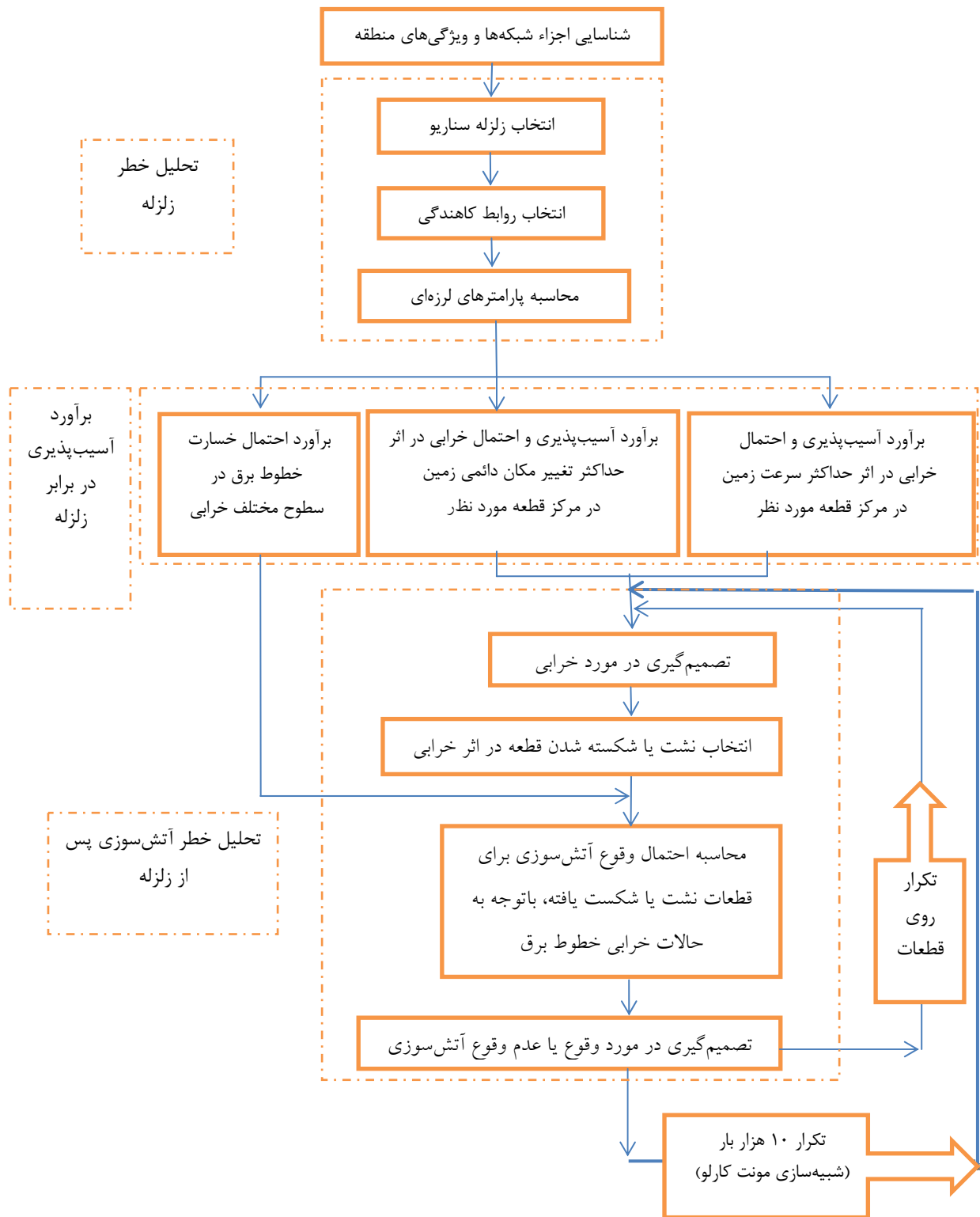
در گام سوم، به منظور برآورد احتمال آتش‌سوزی هر یک از قطعات خطوط گاز از روش درخت خطا استفاده شد. در این مرحله، در درخت خطای مورد نظر دو عامل اصلی برای آتش‌سوزی پس از زلزله؛ منبع جرقه و خرابی شبکه گاز در نظر گرفته شد که به این منظور احتمال وجود سوخت قابل اشتعال برابر با احتمال شکست و یا نشت خطوط لوله گاز در نظر گرفته شد. احتمال وجود منبع جرقه برابر با احتمال جرقه در اثر تخریب شبکه برق فرض شد. در نهایت با ترکیب احتمال اشتعال در اثر نشت و شکست در سطوح مختلف خرابی شبکه برق، احتمال اشتعال هر یک از قطعات، به دست آمد. در این مرحله نیز به منظور تشخیص این که قطعه مورد نظر مشتعل می‌شود یا نه، احتمال اشتعال قطعه مورد نظر در هر تکرار شبیه‌سازی مونت-کارلو با یک عدد تصادفی مقایسه شده و در مورد آن تصمیم‌گیری می‌شود. به منظور شبیه‌سازی واقعیت، گام‌های دوم و سوم برای هریک از قطعات در نظر گرفته شده، به تعداد ۱۰۰۰۰ بار در شبیه‌سازی مونت‌کارلو تکرار شد.

در این تحقیق فرآیند مذکور (از گام ۲ تا انتها) برای هر سناریوی زلزله، با توجه به روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای حل معادلات احتمال از طریق تعداد دفعات زیاد (۱۰ هزار بار) تکرار شد تا عدم قطعیت‌های مربوط به این که در هر سناریوی زلزله کدام لوله‌ها در معرض شکست یا نشت و همچنین اشتعال قرار می‌گیرند، مدل‌سازی گردد. در شکل (۴) الگوریتم مورد نظر نشان داده شده است. در نهایت، نتایج خروجی برای سناریوهای در نظر گرفته شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS، بر مبنای پارامترهای تابع توزیع احتمال متغیرهای خروجی و عدم قطعیت آن‌ها تحلیل شده است.

در بخش بعدی جزئیات به کارگیری الگوریتم پیشنهادی در منطقه مورد مطالعه ذکر شده است.

#### ۴- پیاده‌سازی الگوریتم

در این تحقیق سه سناریوی محتمل در نظر گرفته شد که عبارتند از: گسل شمال ری، گسل جنوب ری و گسل شمال تهران. با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط جایکا و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در قالب طرح جامع لرزه‌ای تهران [۲۰]، مشخصات این سه سناریو در جدول (۱) آمده است. قابل ذکر است مطالعاتی توسط Zafarani و همکاران [۲۱] در زمینه سناریوی زلزله در شهر تهران نیز انجام گرفته است که در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است.



شکل ۴- الگوریتم مورد استفاده در تحقیق

جدول ۱- سناریوهای انتخاب شده برای زلزله [۶]

شماره سناریو	محل احتمالی وقوع زلزله	بزرگای زلزله سناریو (ریشتر)	عمق کانونی (کیلومتر)	عرض جغرافیایی زلزله احتمالی (UTM)	طول جغرافیایی زلزله احتمالی (UTM)
۱	روی گسل شمال ری	۶/۷	۵	۳۹۴۱۴۱۳/۴۶	۵۳۸۲۴۱/۷۶
۲	روی گسل جنوب ری	۶/۷	۵	۳۹۳۸۴۵۲/۷۷	۵۳۹۱۴۰/۰۲
۳	روی گسل شمال تهران	۷/۲	۵	۳۹۶۱۰۷۵/۲۳	۵۳۴۷۰۱/۰۲

جدول ۲- ضرایب مربوط به رابطه کاهش‌دهنده زارع [۲۳]

منطقه / مؤلفه	a	b	C	$\sigma$
ایران مرکزی- البرز (مؤلفه افقی) بیشینه شتاب زمین	۰/۳۲۲	-۰/۰۰۰۴	-۰/۷۲۰	۰/۳۹۴
ایران مرکزی- البرز (مؤلفه افقی) بیشینه سرعت زمین	۰/۴۷۱	۰/۰۰۰۶	-۲/۹۶۹	۰/۳۶۰

جدول ۳- ضرایب مربوط به رابطه کاهش‌دهنده قدرتی [۲۴]

ساختگاه	پارامتر/ ضریب	C1	C2	C3	C4	$\sigma$
ساختگاه خاکی	شتاب بیشینه افقی	۳/۶۵	۰/۶۷۸	-۰/۹۵	-	۰/۴۹۶
	سرعت بیشینه افقی	-۱	۱/۰۳	-۰/۹۳	-	۰/۵۴

در این روش‌شناسی در اثر لرزش زلزله ۲۰ درصد مقدار تعمیرها، شکست و ۸۰ درصد آن‌ها نشت خواهد بود [۱۲]. این مقدار برای خطوط لوله ترد به کار می‌رود و برای خطوط لوله انعطاف‌پذیر (فولادی با جوش قوسی و پی‌وی‌سی) می‌بایست از ضریب اصلاح ۰/۳ برای نرخ تعمیر استفاده شود. در این مطالعه خطوط لوله فولادی با جوش گازی در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار نرخ تعمیر در اثر تغییر مکان دائمی زمین در این قسمت از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$R.R \approx Pr [Liquefaction] PGD^{(0.56)} \quad (5)$$

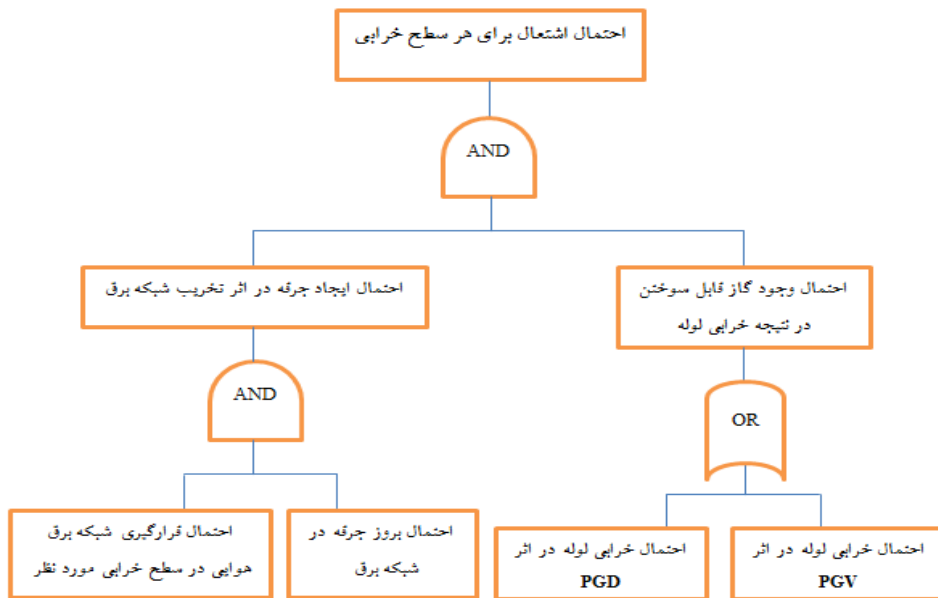
در این قسمت ۲۰ درصد خرابی‌ها، نشت و ۸۰ درصد خرابی‌ها، شکست فرض می‌شود [۱۲]. مطابق شکل (۵) برای محاسبه احتمال اشتعال خطوط آسیب‌دیده در درخت خطای مورد استفاده دو عامل اصلی برای آتش‌سوزی، منبع جرقه و خرابی شبکه گاز، در نظر گرفته شده است.

پس از محاسبه بیشینه شتاب و سرعت زمین برای سناریوهای مختلف زلزله در محل مرکز قطعات خطوط لوله موجود در سیستم مورد مطالعه، احتمال خرابی این قطعات تخمین زده می‌شود. چرا که این احتمالات به عنوان ورودی درخت خطا خواهند بود. در این پژوهش از روش‌شناسی HAZUS به منظور تخمین احتمال خرابی استفاده شده است [۱۲]. برای به دست آوردن احتمال خرابی در اثر PGV در هر یک از قسمت‌های خطوط لوله، می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد.

$$P_f = 1 - \exp(-R.R.L) \quad (3)$$

در این رابطه،  $R.R$  نرخ تعمیر و  $L$  طول قطعه لوله مورد نظر بر حسب کیلومتر می‌باشد. مقدار  $R.R$  حاصل از لرزش زمین نیز بر اساس روش‌شناسی HAZUS، از رابطه (۴) به دست می‌آید:

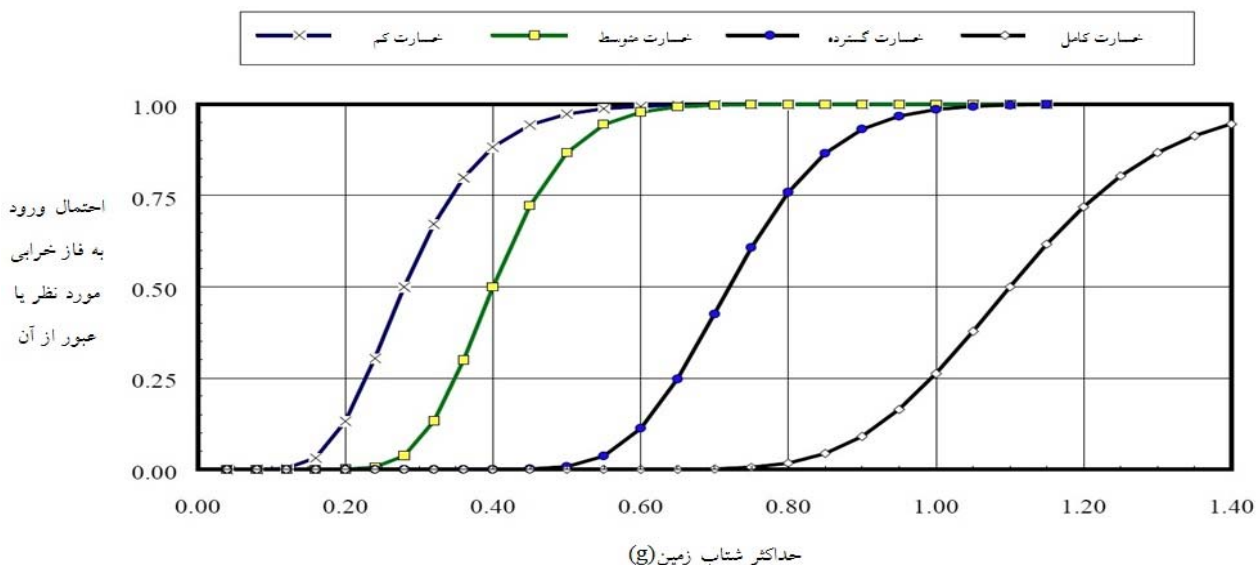
$$\approx 0.0001 PGV^{(2.25)} \quad (4)$$



شکل ۵- درخت خطای مورد استفاده در تحقیق [۶]

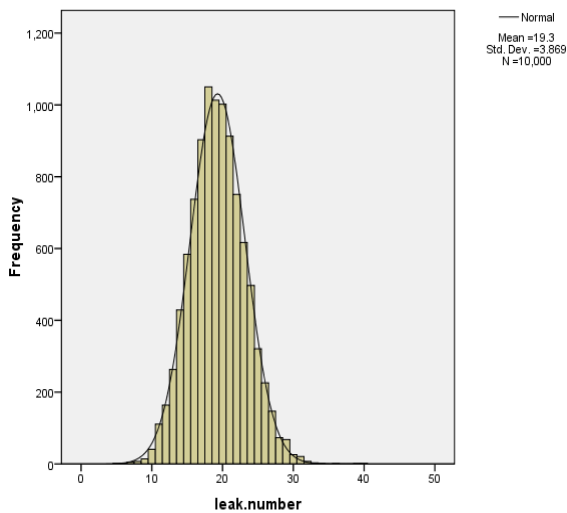
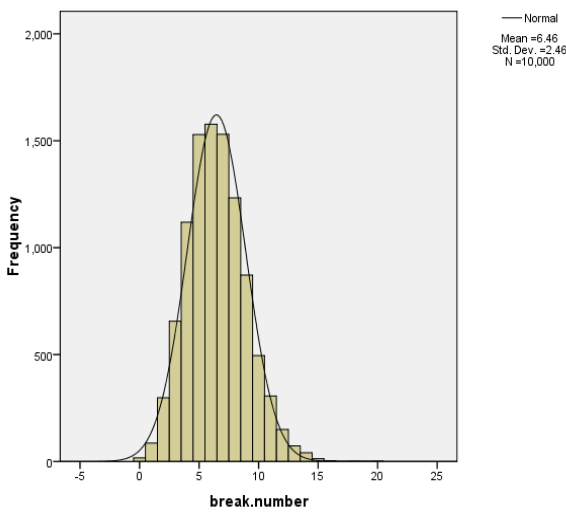
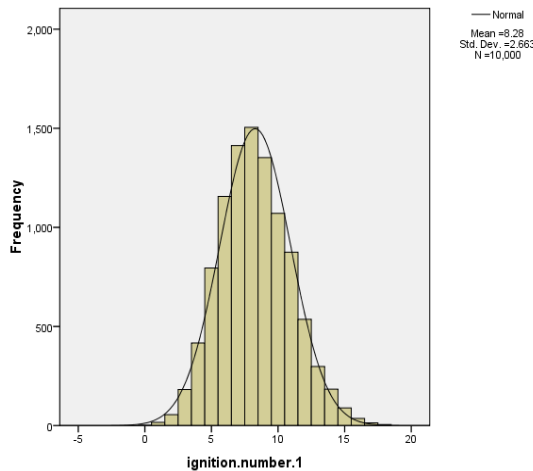
در سطوح مختلف خرابی، مطابق با شکل (۶) بر اساس منحنی-های شکنندگی در نظر گرفته می‌شود [۲۷] و احتمال قرار گرفتن خطوط شبکه برق در هر یک از سطوح خرابی محاسبه شده است. در محاسبه احتمال بروز جرقه در اثر تخریب شبکه برق هوایی در محل خرابی این شبکه با توجه به سطح خرابی و بر اساس قضاوت مهندسی، احتمال بروز جرقه در شبکه برق خسارت دیده ۶۰٪ فرض می‌شود [۱۵].

احتمال وجود سوخت قابل اشتعال برابر با احتمال خرابی خطوط لوله گاز و احتمال وجود منبع جرقه برابر با احتمال جرقه در اثر تخریب شبکه برق فرض می‌شود. در ارزیابی احتمال خرابی خطوط لوله، پارمترهای لرزه‌ای مؤثر بر تخریب خطوط لوله، حداکثر تغییر مکان دائمی زمین (PGD) و حداکثر سرعت زمین (PGV)، در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، ایجاد جرقه در اثر تخریب شبکه برق خطوط هوایی در نظر گرفته شده است. میزان آسیب‌پذیری شبکه برق



شکل ۶- منحنی‌های شکست شبکه توزیع برق هوایی برای چهار سطح خرابی مختلف [۱۲]





شکل ۷- تعداد اشتغال، شکست و نشست برای سناریوی ۱

به نظر می‌رسد به منظور پیشگیری از حوادث ثانویه ناشی از وقوع زلزله که در اثر تخریب شبکه توزیع گاز شهری و نشست گاز محتمل می‌باشد، ارائه راهکارهای مقاوم‌سازی و کاهش اثرات ضروری باشد. به این منظور، جهت یافتن دقیق اثر جایگزینی

در این قسمت، احتمال اشتغال در هر قطعه از لوله که دچار نشست یا شکست شده است، از طریق هشت درخت منطقی (چهار درخت برای تعیین احتمال اشتغال در چهار سطح خرابی، وقتی قطعه دچار نشست شود؛ چهار درخت نیز برای تعیین احتمال اشتغال در چهار سطح خرابی، زمانی که قطعه دچار شکست شود) محاسبه می‌گردد.

### ۵- تحلیل نتایج

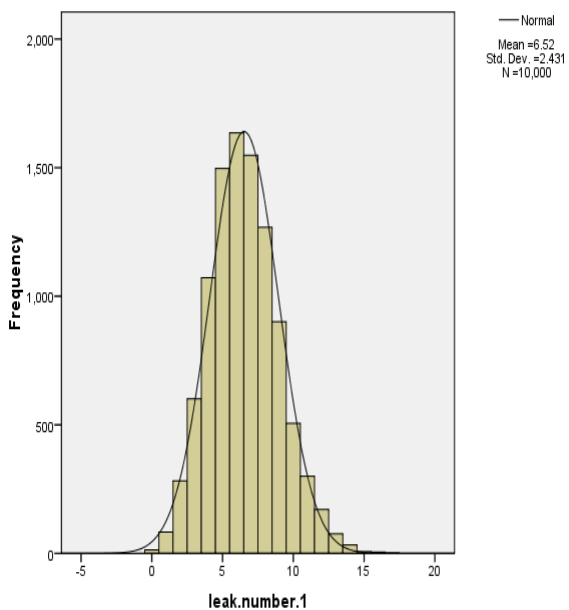
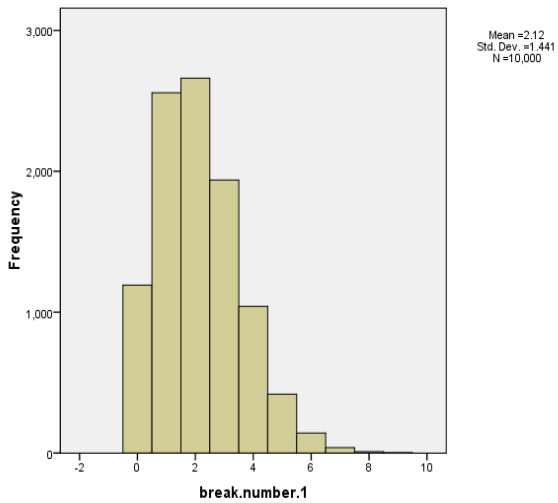
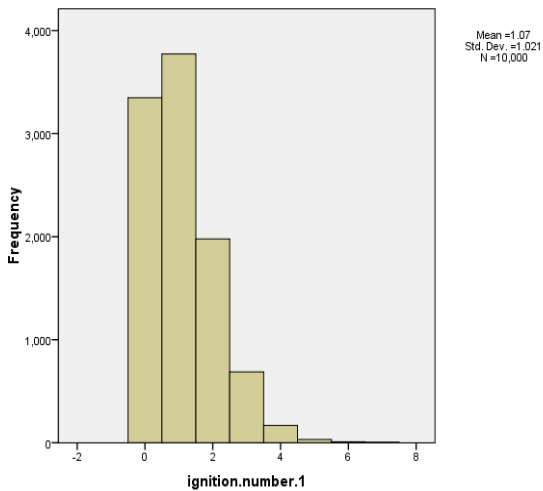
نتایج خروجی برای سناریوهای در نظر گرفته شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل شد. در کل در این تحقیق نتایج زیر به صورت متوسط برای خطوط لوله انتقال گاز در منطقه ۲۰ شهر تهران به دست آمد:

الف) سناریوی اول (وقوع زلزله‌ای با بزرگای ۶/۷ بر روی گسل شمال ری): وقوع ۱۹ نشست، ۶ شکست و ۸ اشتغال.  
 ب) سناریوی دوم (وقوع زلزله‌ای با بزرگای ۶/۷ بر روی گسل جنوب ری): وقوع ۲۰ نشست، ۷ شکست و ۹ اشتغال.  
 ج) سناریوی سوم (وقوع زلزله‌ای با بزرگای ۷/۲ بر روی گسل شمال تهران): وقوع ۴ نشست، ۱ شکست و ۰ اشتغال.  
 با توجه به این که تعداد نشست، تعداد شکست و تعداد اشتغال متغیرهای تصادفی هستند و مقادیر اشاره شده در فوق مقادیر میانگین متغیرها را نشان می‌دهد، به منظور فراهم نمودن بستری برای تصمیم‌سازی بر مبنای عدم قطعیت‌های موجود، برای هر کدام از متغیرهای تصادفی فوق مقادیر انحراف معیار به همراه هیستوگرام توزیع فراوانی آن‌ها مشخص شده است. به عنوان نمونه برای هر کدام از متغیرهای تصادفی فوق در سناریو اول، مقادیر انحراف معیار به همراه هیستوگرام توزیع فراوانی آن‌ها در شکل (۷) رسم شده و در جدول (۴) ارائه گردیده است.

جدول ۴- پارامترها و نوع توزیع مربوط به متغیرهای تصادفی در

سناریو ۱

متغیرهای تصادفی			نوع توزیع	
نشست	شکست	اشتغال		
توزیع نرمال	توزیع نرمال	توزیع نرمال	پارامترهای توزیع	
۱۹/۳	۶/۴۶	۸/۲۸		
۳/۸۶۹	۲/۴۵	۲/۶۶۳	میانگین	انحراف معیار



لوله‌های انعطاف‌پذیر به جای لوله‌های ترد، تمام مراحل تحلیل با فرض جایگزین کردن لوله‌های ترد با لوله‌های انعطاف‌پذیر دوباره صورت گرفت و نتایج هر سه سناریو در حالت عادی (لوله ترد) و در حالت جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به جای لوله‌های ترد، مقایسه شد. نتایج به دست آمده پس از اعمال راهکار در هر سه سناریو در ادامه آمده است که به عنوان نمونه در شکل (۸) نتایج مربوط به سناریوی شماره (۱) نشان داده شده است.

الف) سناریوی اول: وقوع ۷ نشت، ۲ شکست و ۱ اشتعال؛ به عبارتی نتایج ذکر شده، در حالت نشت ۶۳٪، در حالت شکست ۶۷٪ و در حالت اشتعال ۸۷٪ تقلیل یافت.

ب) سناریوی دوم: وقوع ۷ نشت، ۲ شکست و ۱ اشتعال؛ به عبارتی نتایج ذکر شده، در حالت نشت ۶۵٪، در حالت شکست ۷۱٪ و در حالت اشتعال ۸۹٪ تقلیل یافت.

ج) سناریوی سوم: وقوع ۱ نشت، ۰ شکست و ۰ اشتعال؛ به عبارتی نتایج ذکر شده، در حالت نشت ۷۵٪، در حالت شکست ۱۰۰٪ و در حالت اشتعال ۰٪ تقلیل یافت.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روشی تحلیلی برای تخمین احتمال وقوع اشتعال ناشی از خسارت خطوط لوله گاز و شبکه توزیع برق پس از زلزله در منطقه ۲۰ شهر تهران ارائه گردید. به این منظور، پس از تحلیل خطر و برآورد آسیب‌پذیری زلزله به تحلیل احتمال آتش‌سوزی پس از زلزله پرداخته شد. در ادامه برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مراحل تحلیل، شامل حالات مختلف خسارت لرزه‌ای خطوط لوله شبکه گاز و آتش‌سوزی حاصل از آن، رفتار شبکه بر اساس روش مونت‌کارلو از طریق دفعات تکرار زیاد (۱۰ هزار بار تحلیل) شبیه‌سازی شده است. مراحل تحقیق برای سه سناریوی گسل شمال‌ری، گسل جنوب‌ری و گسل شمال‌تهران پیاده شد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، در شدیدترین حالت که مربوط به سناریوی دوم (گسل جنوب‌ری) می‌باشد، به طور متوسط وقوع ۲۰ نشت، ۷ شکست و ۹ اشتعال ناشی از آسیب لرزه‌ای خطوط لوله گاز، محاسبه شد.

شکل ۸- تعداد نشت، شکست و اشتعال برای سناریو ۱ پس از اعمال راهکار (جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به جای لوله‌های ترد)

- [9] Scawthorn, C., Cowell, A. D., Borden, F., "Fire-related Aspects of The Northridge Earthquake", Report Prepared for Building and Fire Research Laboratory, NIST-GCR-98-743, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1997.
- [10] Cousins, W. J., Dowrick, D. J., Sritharan, S., "Fire Following Earthquake", The Institution of Fire Engineers Conference, New Plymouth, August, 1991.
- [11] Eidinger, J. M., Goettel, K. A. Lee, D. "Fire and Economic Impacts of Earthquakes", The 4<sup>th</sup> US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, San Francisco, California, US, 1995, pp 80-87.
- [12] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Earthquake Loss Estimation Methodology", Chapter 4, Hazus 99-SR2. Technical Manual, Fema, Washington DC, 1999.
- [13] Trifunace, M.D., Todorovaska, M.I., "The Northridge, California, Earthquake Of 1994: Fire Ignition by Strong Shaking", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, 17, 165-175.
- [14] Williamson, R. B., Groner, N., "Ignition of Fires Following Earthquakes Associated With Natural Gas and Electric Distribution Systems", Peer directed studies program for reducing seismic vulnerability of gas and electrical distribution and transmission systems, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, 2000.
- [15] Zolfaghari, M., Peyghaleh, E., Golmoradi, L., Nasirzadeh, Gh., "Urban Utility Ignition Model, A Probabilistic Approach for Modeling Fire Following Earthquake", The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [16] Yildiz, S. S., Karaman, H., "Developing a Physics-based Model for Post-Earthquake Ignitions", 9<sup>th</sup> International ISCRAM Conference - Vancouver, Canada, 2012.
- [17] Scawthorn, C., Eidinger, J. M., Schiff, A. J., "Fire Following Earthquake", ASCE, US, 2005.
- [18] Behnamfar, F., Rajabipour, A., "Probabilistic Estimation of Fire Spreading Following an Earthquake due to Gas Pipeline Damage", The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [19] Esposito, S., "Systemic Seismic Risk Analysis of Gas Distribution Networks", Università di Napoli Federico II, 2011.
- این نتایج بیانگر آسیب‌پذیری بالای خطوط لوله گاز منطقه ۲۰ شهر تهران در برابر زلزله و آتش‌سوزی پس از آن می‌باشد. با اعمال راهکار مبتنی بر جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به جای لوله‌های ترد، نتایج ذکر شده در حالت نشت ۰/۶۵٪، در حالت شکست ۰/۷۱٪ و در حالت اشتعال ۰/۸۹٪ تقلیل یافت. برای متغیرهای تصادفی فوق، با توجه به نتایج خروجی شبیه‌سازی-های مونت‌کارلو، نوع تابع توزیع و پارامترهای آن معرفی گردید. انجام تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف به عنوان ادامه تحقیق پیشنهاد می‌گردد.
- ### ۷- مراجع
- [۱] حسنی، ن.، "گزارش مرحله اول پروژه مطالعات آسیب-پذیری، بهسازی و مدیریت بحران سیستم گازرسانی تهران بزرگ در مقابل زلزله"، مرکز مطالعات بحران‌های طبیعی در صنعت، دانشگاه صنعت آب و برق، ۱۳۸۴.
- [2] Byerly, P., "Seismology", Prentice-Hall Incorporated, New York, 1942.
- [۳] بختیاری، س.، "بررسی حوادث حریق ناشی از زلزله در جهان و تهیه راهنمای حفاظت ساختمان‌ها در برابر آتش با در نظر گرفتن خطرات و تخریب‌های احتمالی ناشی از زلزله"، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (پژوهشکده سوانح طبیعی)، ۱۳۸۶.
- [۴] شهرداری منطقه ۲۰، (بی‌تا)، بازیابی در ۱۷ آذر ۱۳۹۱، <http://region20.tehran.ir>
- [۵] بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ‌روش، ب.، مهاجر اشجعی، ا.، "پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون"، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۱.
- [۶] صادقیان، ع.، "ارزیابی ریسک آتش‌سوزی شبکه گاز در کاربری‌های مختلف شهری پس از زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش آن با شبکه برق، مطالعه موردی: منطقه ۲۰ شهر تهران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۲.
- [7] Lee, S. W., Davidson, R. A., "Review of Forest, Compartment, and Wildland-Urban Interface Fire Modeling and Their Relation to Fire Following Earthquake Models", The 8th US National Conference on Earthquake Engineering, 2006.
- [8] Mizuno, H. "On Outbreak of Fires in Earthquakes", Dissertation, Department of Architecture, University of Kyoto, 1978.

- [20] Japan International Cooperation Agency (JICA), "The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran", Final Report, 2000.
- [21] Zafarani, H., Vahidifard, H., Ansari A., "Prediction of Broadband Ground-Motion Time Histories: The Case of Tehran, Iran", *Earthquake Spectra*, 2013, 29 (2), 633-660.
- [22] Nazari, H., Ritz, J., Salamati, R., Shahidi, A., Habibi, H., Ghorashi, M., Karimi Bavandpur A., "Distinguishing between Fault Scarps and Shorelines: The Question of the Nature of the Kahrizak, North Rey and South Rey Features in the Tehran Plain (Iran)", *Terra Nova*, 2010, 22 (3), 227-237.
- [۲۳] زارع، م.، "مبانی تحلیل خطر زمین‌لرزه"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۸.
- [24] Kazemi, A., Razeghi, H., Ghodrati Amiri, G., "A New Method for Employment of Deterministic Attenuation Relationship in Probabilistic Seismic Hazard Analysis", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2011, 11 (1), 61-73.
- [25] Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., Koketsu, K., "An empirical spectral ground-motion model for Iran" *Journal of seismology*, 2009, 13 (4), 499-515.
- [26] Soghrat, M. R., Khaji, N., Zafarani, H., "Simulation of Strong Ground Motion in Northern Iran using the Specific Barrier Model", *Geophysical International Journal*, 2012, 188 (2), 645-679.
- [27] Milutinovic, Z., Trendafiloski, G., "An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns", *RISK\_UE Contract: EVK4-CT-2000-00014*, 2003.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Fire Following Earthquake Hazard Analysis of Gas Pipeline Using Monte Carlo Simulation (Case Study: District No. 20 of Tehran Metropolitan)**

Alireza Sadeghian, Babak Omidvar\*, Esmail Salehi

*Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran 14155-6135, Iran*

**Received:** 05 February 2015; **Accepted:** 22 January 2016

---

### **Keywords:**

Hazard analysis, Fire following earthquake, Monte carlo simulation, Gas network, Power network, Tehran

---

### **1. Introduction**

The experiences of past earthquakes show that if a gas system is affected by severe and sudden damages of earthquake, gas leakage may cause extensive fire, massive explosions and consequently significant human fatalities and casualties. The importance of this issue is so that Byerly has indicated that fires following major earthquakes are so common that it should be considered as the complementary part of earthquake [1]. Due to the long lifetime of gas pipelines in district No. 20 of Tehran, and, in some cases, the passing of gas pipes across the existing faults or in close proximity, this municipal district has a high damage potential in times of probable disasters, such as earthquakes and subsequent fires. Therefore, in this research a numerical analysis method for the estimation of ignition probability of gas pipelines following an earthquake in district No. 20 of Tehran is presented.

### **2. Methodology**

This research process includes three stages: 1- Seismic hazard analysis, 2- Vulnerability assessment against earthquake, 3- Fire following earthquake hazard analysis [2].

In the first stage, for analysis of seismic hazard, the power and gas network components, and related characteristics of the study area, and existing land uses were identified; also the related information in segregated information layers using "ARC GIS" software were entered into the geographic information system. Then three probable earthquake scenarios (North-Ray fault, South-Ray fault, and North-Tehran fault) for the study area were considered, and, after choosing appropriate attenuation relationships [3], the seismic parameters (Peak Ground Acceleration and Velocity) for each of the segments of gas pipeline were calculated.

In the second stage, for estimating the earthquake vulnerability, the repair rate and probability of damage following an earthquake on the basis of peak ground velocity, and repair rate, and the probability of damage from permanent ground deformation in the center of each segment for each of the three earthquake scenarios were calculated using HAZUS methodology [4]. In this stage, for determining the type of damage in the segment i.e. break or leak, the damage probabilities of the segments in each iteration of the Monte Carlo simulation were compared with random numbers. Then the damage probability of the aerial power distribution lines in different damage states in the district was calculated.

In the third stage, for estimation of the ignition probability of each gas pipeline segment, fault tree method was used. In this stage, in the considered fault tree method, two different factors for fire following earthquake i.e. the source of spark and the damage of the gas network, were considered. For this aim, the probability of existence of a flammable fuel was considered to be equal to the probability of the failure or leak of gas pipeline. The probability of

---

\* Corresponding Author,

*E-mail address:* sadeghian0105@ut.ac.ir (Alireza Sadeghian), bomidvar@ut.ac.ir (Babak Omidvar), tehranssaleh@ut.ac.ir (Esmail Salehi)

the source of spark existence was assumed to be equal to the probability of a spark from the damaged power distribution network. Finally, the probability of fire occurrence after earthquake for each segment is calculated by combining the damage probability of the segment and the ignition probability from the damaged adjacent power. In this stage, in determining whether the considered segment would be ignited or not, the ignition probability of the considered segment was compared with a random number, and it was decided accordingly.

In this research, the mentioned process (stages 2 and 3) was repeated 10000 times for each earthquake scenario using Monte Carlo simulation. In this way, the uncertainty of decision about occurrence of break or leak and ignition for each segment for each earthquake scenario was modeled. Finally, the output results for the considered scenarios were analyzed using SPSS software, and the proper probability distribution functions of the output variables and their parameters were determined to be used as a base in decision making process for retrofitting and risk reduction studies.

### 3. Results and discussion

The output results for the considered scenarios were statistically analyzed using SPSS software. Overall, in this study, the following results for gas pipelines in district No. 20 of Tehran were obtained as average:

(A) The first scenario: the occurrence of an earthquake with a magnitude of 6.7 on the North-Ray Fault causes 19 leaks, 6 breaks and 8 ignitions.

(B) The second scenario: The occurrence of an earthquake with a magnitude of 6.7 on the South-Ray fault causes 20 leaks, 7 breaks and 9 ignitions.

(C) The third scenario: The occurrence of an earthquake with a magnitude of 7.2 on the North-Tehran fault causes 4 leaks, 1 break and no ignition.

According to the results, it seems that for preventing and mitigating fire following earthquake, offering retrofitting solutions and mitigation strategies are necessary. To this end, all the stages of analysis were repeated assuming the replacement of brittle pipes with ductile pipes as an example, and the results of the analyses of all three scenarios in the existing state (brittle pipes) were compared with the state of the replacement ductile pipes, as shown below:

In the first scenario, on average, 19 leaks, 6 breaks, and 8 ignitions in the first state were reduced to 7 leaks (63% reduction), 2 breaks (67% reduction), and 1 ignition (87% reduction) in the improved state.

In the second scenario, on average, 20 leaks, 7 breaks, and 9 ignitions in the first state were reduced to 7 leaks (65% reduction), 2 breaks (71% reduction), and 1 ignition (89% reduction) in the improved state.

In the third scenario, on average, 4 leaks, 1 break, and zero ignitions in the first state were reduced to 1 leaks (75% reduction), no break (100% reduction), and no ignition (0% reduction) in the improved state.

### 4. Conclusions

Based on the results of this research in the extreme state, which is related to the second earthquake scenario (South-Ray Fault), on average, the occurrence of 20 leaks, 7 breaks, and 9 ignitions due to the seismic damage of gas pipelines was estimated. These results show the high vulnerability of the studied gas pipelines against earthquake and related subsequent fires in district No. 20 of Tehran. By applying the retrofitting solution based on the replacement of the brittle pipes with ductile pipes, the mentioned results in the leak state was reduced by 65%, in the break state was reduced by 71%, and in the ignition state was reduced by 89%. The type of the proper probability distribution functions and their parameters were determined for the output results of the Monte Carlo simulation. Performing sensitivity analysis of various parameters is suggested as a proposal for the continuation of the research.

### 5. References

- [1] Byerly, P., "Seismology", Prentice-Hall, New York, 1942.
- [2] Sadeghian, A., Fire Risk Assessment of Gas Infrastructure on Different Urban land Uses after Earthquake Considering Its Dependency on Electricity Network (Case Study: District No. 20 of Tehran Metropolitan), Thesis Submitted for the Degree of Master of Science in Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian), 2013.
- [3] Ghasemi, H. M., Zare, Y., Fukushima, K. Koketsu. "An Empirical Spectral Ground-Motion Model for Iran", Journal of Seismology, 2009, 13 (4), 499-515.
- [4] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Earthquake Loss Estimation Methodology", Chapter 4, HAZUS 99-SR2, Technical Manual, FEMA, Washington D,C, 1999.