

توسعه‌ی مدل ریسک لرزه‌ی زیان ناشی از توقف تولید در واحدهای پالایشگاهی گاز (مطالعه‌ی موردی: پالایشگاه گازی پارسیمان)

مهدی انصاری (دانشجوی دکتری)

سید مهدی موسوی* (دانشیار)

اسماعیل ایزدی زمان آبادی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۱ (ص. ۳۳-۳۴، شماره ۲/۳، پژوهشی)

توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی زیان‌های اقتصادی ناشی از توقف تولید پس از زلزله در واحدهای بزرگ صنعتی، یکی از پیش‌نیازهای کلیدی در اخذ تصمیم‌های هوشمندانه‌ی مدیریتی به منظور کاهش پیامدهای زلزله در واحدهای مذکور است. مطالعه‌ی حاضر با هدف توسعه‌ی یک مدل زیان اقتصادی ناشی از توقف تولید در پالایشگاه گازی پارسیمان در اثر زلزله انجام شده است. برای دستیابی به هدف مذکور، براساس یک مدل خطر لرزه‌ی شناخته شده، کاتالوگ مصنوعی در یک بازه‌ی ۵۰ هزار ساله به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسعه یافته و میدان جنبش زمین در گستره‌ی قرارگیری اجزاء مختلف پالایشگاه اعم از: میدان‌های برداشت، واحدهای پالایشی، مخازن ذخیره‌سازی، ایستگاه پمپاژ و ایستگاه تقویت فشار شبیه‌سازی شده است. سیستم پالایشگاهی به ۱۰ مسیر تولیدی تجزیه و هر مسیر به‌عنوان یک زیرسیستم تجزیه و تحلیل شده است. مؤلفه‌های سازنده‌ی هر زیرسیستم، شناسایی شده و منحنی‌های شکنندگی و بازیابی متناسب هر مسیر براساس الگوهای ارائه شده طبق HAZUS تخصیص یافته است. در نهایت، توابع پیش‌بینی زیان ناشی از توقف تولید در هر سناریوی دلخواه زلزله توسعه یافته و با تلفیق مدل خطر لرزه‌ی مدل نهایی پیش‌بینی زیان ناشی از توقف تولید حاصل شده است.

واژگان کلیدی: خطر لرزه‌ی، ریسک لرزه‌ی، توقف تولید، زیان، بیمه‌ی پارامتریک، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، آغازگر.

mehdiiust78@gmail.com
meh.mousavi61@gmail.com
e.izadi@pci.ia.un.ac.ir

۱. مقدمه

زلزله به‌عنوان یک سانحه‌ی طبیعی، پدیده‌ی است با احتمال رویداد کم، اما پیامدهای بسیار سنگین اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی یا زیان‌های جانی که به صورت مرگ و میر یا جراحت‌ها شهروندان را متأثر می‌سازد، باعث شده است تا در شمار درآوردترین سوانح طبیعی جلوه کند. زیان‌های اقتصادی ناشی از پدیده‌ی طبیعی زلزله نیز در ابعاد گوناگون جوامع را متأثر می‌سازد؛ به طوری که در صورت بروز یک زلزله‌ی نسبتاً بزرگ، نشان داده شده است که به‌طور متوسط تولید ناخالص ملی کشور زلزله‌زده به میزان ۱/۶٪ در طول ۸ سال بعد از زلزله کاسته می‌شود.^[۱]

بروز زلزله در مجاورت نواحی صنعتی که در بردارنده‌ی تعداد زیادی از واحدهای بزرگ و راهبردی صنعتی است، می‌تواند پیامدهای اقتصادی کلانی را برای هر کشوری به دنبال داشته باشد. برای نمونه، زلزله‌ی کجالی^۱ (۱۹۹۹) ترکیه، پهنه‌ی آنجا

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۴/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۳/۳۰، پذیرش ۱۴۰۱/۴/۱۵

DOI:10.24200/J30.2022.59884.3077

پتروشیمی کشور در نواحی لرزه خیز زاگرس جنوبی که یکی از کانون‌های لرزه خیزی کشور است،^[۵] این توجه را دوچندان می‌کند. صنایع نفت و گاز واقع در منطقه‌ی ویژه‌ی عسلویه و یا پالایشگاه گازی پارسیان در جنوب استان فارس از نمونه‌های صنایع واقع در پهنه‌ی زاگرس جنوبی است.

مطالعه‌ی دقیق و شناخت رفتار لرزه‌ی اجزاء یک سیستم صنعتی در معرض زلزله و تلفیق آن با مدل‌های واقع‌بینانه‌ی خطر لرزه‌ی، پیش‌نیاز اساسی در تصمیم‌گیری کلان‌کاهش پیامدهای اقتصادی بروز زلزله در واحدهای صنعتی است.^[۶] از ترکیب مدل ریاضی پیامدهای اقتصادی، سناریوهای گوناگون زلزله بر یک واحد صنعتی با مدل تحلیل خطر ناحیه‌ی مدنظر، در نهایت مدل ریسک به دست خواهد آمد.^[۸] که ریسک زمینه‌ساز اخذ تصمیم‌های مدیریت کلان با هدف کاهش پیامدهای زلزله می‌شود. بدون وجود یک مدل ریسک واقع‌بینانه، انتظار اتخاذ تصمیم‌های هوشمندانه در سطوح بالا از مدیران اجرایی دور از ذهن به نظر می‌رسد.

انتقال ریسک به شرکت‌های بیمه‌گر، یکی از راهکارهای مدیریتی برای کاهش پیامدهای زلزله است.^[۹] وجود یک مدل ریسک واقع‌بینانه، پیش‌نیازی اساسی برای عقد یک قرارداد هوشمندانه با شرکت‌های مذکور است. مکانیسم‌های بیمه را می‌توان به دو دسته‌ی مهم تقسیم‌بندی کرد: سازوکار سنتی و سازوکار مدرن پارامتریک. در سازوکار سنتی، پرداخت خسارت براساس ارزیابی‌های میدانی میزان زیان رخ داده بعد از زلزله است. در سوی مقابل، در سازوکار مدرن پارامتریک، پرداخت خسارت فقط براساس پارامترهای فیزیکی زلزله، اعم از شدت زلزله و یا بزرگا خواهد بود.^[۱۰] بسیاری از افراد، بیمه‌ی پارامتریک^۴ زلزله را یکی از زمینه‌های مهم پیشرفت‌های آتی می‌دانند.^[۱۱] مزیت مهم دیگر پوشش‌های بیمه‌ی پارامتریک، قابلیت تبدیل آن‌ها به صورت اوراق قرضه^۵ و یا مشتقات مالی و معامله در بازارهای مالی است.^[۱۲]

اگر چه موضوع بیمه‌ی پارامتریک و انتقال ریسک به بیمه‌های اتکایی و یا بازارهای مالی در کشور ما تقریباً ناشناخته است، اما به نظر می‌رسد در سال‌های آتی بیش از پیش به آن توجه شود. استفاده از سازوکار پارامتریک و یا سازوکار سنتی بیمه برای انتقال ریسک زلزله در واحدهای صنعتی مستلزم وجود یک مدل ریسک دقیق است. مطالعه‌ی حاضر تلاشی است برای ساخت یک مدل ریسک لرزه‌ی ناشی از توقف تولید^۶ در واحدهای صنعتی نفت و گاز که به عنوان مطالعه‌ی موردی، پالایشگاه گازی پارسیان انتخاب شده است. واحد پالایشگاه گازی پارسیان با تولید ۱۷٪ از گاز مصرفی کشور، دومین پالایشگاه گاز ایران است و اهمیت راهبردی دارد. زیان‌های احتمالی وارد بر واحد پالایشی پارسیان را می‌توان به دو بخش زیان اقتصادی ناشی از آسیب‌دیدگی اجزا و زیان اقتصادی ناشی از توقف در فرایند تولید تقسیم‌بندی کرد. مطالعه‌ی حاضر فقط زیان ناشی از توقف تولید را دنبال کرده و در نهایت به جست‌وجوی مدل زیان لرزه‌ی ناشی از توقف تولید پرداخته است.

۲. معرفی واحد صنعتی مورد مطالعه

پالایشگاه گاز پارسیان با ظرفیت اسمی تولید ۷۶ میلیون مترمکعب گاز طبیعی در روز و ۸۳۰ تن انواع میعانات گازی، دومین پالایشگاه گاز ایران است، که تأمین حدود ۱۷٪ از گاز مصرفی و ۱۱٪ از سید انرژی کشور را بر عهده دارد. پالایشگاه گاز پارسیان در جنوب استان فارس، در ۳۰ کیلومتری شمال غربی لامرد و ۱۲ کیلومتری جنوب شرقی مهر در دشت میان آخرین رشته‌کوه‌های فلات ایران (زاگرس جنوبی) بر کناره‌ی بزرگراه لامرد - مهر - عسلویه قرار گرفته است.

۱.۱.۲. اجزاء کلیدی پالایشگاه

۱.۱.۲.۱. واحدهای تأمین خوراک پالایشگاه

خوراک واحد پالایشگاهی پارسیان از چهار میدان گازی تأمین می‌شود. میدان تابناک با ظرفیت تولید ۴۴ میلیون مترمکعب در روز، خوراک واحدهای پالایشگاهی ۴۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ را تأمین می‌کند. انتقال گاز خام از میدان تابناک با دو خط لوله‌ی ۳۰ اینچی و طول ۲۸ کیلومتر انجام می‌گیرد. میداین گازی وراوی، شانول و هما به ترتیب با ظرفیت تولید فعلی ۸، ۱۱/۸ و ۱۹/۷ میلیون مترمکعب در روز، دیگر منابع تأمین خوراک پالایشگاه ذکر شده است. گاز خام ورودی از این حوزه‌ها در واحدهای زم‌زدایی پارسیان ۲ که مشتمل بر چهار ردیف زم‌زدایی و یک واحد تثبیت است، فرآورش می‌شود. گاز حوزه‌ی گازی وراوی از طریق یک خط لوله‌ی ۱۶ اینچی به طول ۱۲ کیلومتر به پالایشگاه انتقال می‌یابد. گاز و مایعات حوزه‌های شانول و هما نیز پس از جداسازی مواد زائد در مرکز تفکیک خیرگو از طریق دو خط لوله‌ی ۳۶ و ۶ اینچ به طول ۵۶ کیلومتر به پالایشگاه منتقل می‌شود.

۲.۱.۲. واحدهای اصلی پالایشی

واحدهای اصلی پالایشی عبارت‌اند از: واحد ۴۰۰ با ظرفیت فرآورش ۲۱/۵ میلیون مترمکعب و ۱۰۰۰ بشکه‌ی میعانات گازی، واحد ۸۰۰ با فرآورش ۳ میلیون مترمکعب، واحد ۵۰۰ با ظرفیت فرآورش ۲۱/۵ میلیون مترمکعب و ۱۰۰۰ بشکه‌ی میعانات گازی، واحد ۱۰۴ با فرآورش ۳۷/۵ میلیون مترمکعب در روز؛ واحد ۱۰۳ با ظرفیت تولید ۱۷۰۰۰ بشکه میعانات گازی میداین وراوی، شانول و هما.

۳.۱.۲. واحد ذخیره و صدور میعانات گازی

واحد ذکر شده شامل ۲ مخزن، هر کدام با ظرفیت ۱۸۰۰۰ مترمکعب، ۵ دستگاه پمپ انتقال مایعات به مخازن ساحلی واقع در منطقه‌ی ساحلی عسلویه به ظرفیت مجموع ۴۵۰ مترمکعب است.

۴.۱.۲. ایستگاه تقویت فشار گاز

واحد تقویت فشار گاز، شامل ۳ ردیف توربوکمپرسورگازی است که فشار گاز تولیدی مجموعه‌ی پارسیان یک را افزایش می‌دهد و به خط سراسری چهارم گاز ایران تزریق می‌کند.

۵.۱.۲. مزرعه‌ی مخازن ذخیره‌سازی ساحلی

مخازن ذخیره‌سازی ساحلی، شامل یک مخزن ذخیره‌ی پروپان با ظرفیت ۲۵۰۰۰ مترمکعب، یک مخزن ذخیره‌ی بوتان با ظرفیت ۲۲۰۰۰ مترمکعب، و مخازن ذخیره‌ی بنزین با ظرفیت ۹۶۰۰۰ مترمکعب در منطقه‌ی ویژه‌ی پارس جنوبی به منظور ذخیره‌سازی قبل از صادرات ساخته شده است. میعانات تولیدی توسط یک خط لوله‌ی ۱۰ اینچ به مخازن ارسال می‌شود.

شکل ۱ ارتباط بین اجزای مختلف سیستم پالایشگاه و توزیع جغرافیایی اجزای مختلف را نشان می‌دهد.

۲.۲. محصولات تولیدی پالایشگاه

گاز طبیعی به میزان ۷۵ میلیون مترمکعب در روز پس از فرایند تقویت فشار به خط چهارم سراسری گاز ایران تحویل می‌شود. اتان، پروپان، بوتان و بنزین طبیعی، دیگر محصولات اصلی پالایشگاه پارسیان هستند، که به ترتیب به میزان ۲۷۰۰، ۱۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۲۰۰ تن در روز تولید می‌شوند. براساس قیمت‌های جهانی در اکتبر ۲۰۲۱، ارزش روزانه‌ی تولید پالایشگاه پارسیان در جدول ۱ ارائه شده است، که مطابق آن، توقف تولید روزانه‌ی پالایشگاه پارسیان منجر به زیان حدود ۲۴ میلیون

جدول ۱. ارزش‌گذاری تولیدات روزانه پالایشگاه پارسیان.

محصول	میزان تولید روزانه	قیمت جهانی واحد (دلار)	درآمد روزانه (میلیون دلار)
گاز طبیعی	۷۶ میلیون مترمکعب	۰/۱۹	۱۴/۴۴
انان	۲۷۰۰ تن	۹۱۰	۲/۴۵۷
پروپان	۱۴۰۰ تن	۷۱۰	۰/۹۹۴
بوتان	۱۰۰۰ تن	۶۸۰	۰/۶۸۰
بنزین طبیعی (C ₆ ⁺)	۳۲۰۰ تن	۱۶۵۰	۵/۲۸
مجموع			۲۳/۸۵

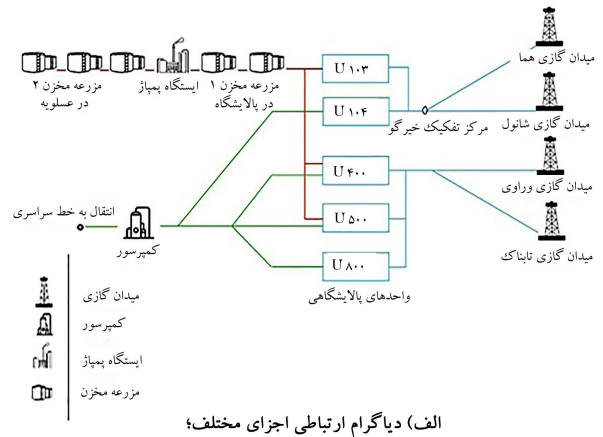
برای محاسبات چشمه‌های لرزه‌زا و یا هر ترکیب متفاوت از روابط کاهندگی در تحلیل خطر امکان‌پذیر است، اما تأثیری در روش ارائه شده در نوشتار حاضر ندارد.

در مطالعه‌ی حاضر، جهت تحلیل خطر از روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۸ در محاسبات خطر استفاده شده است.^[۱۴] برای این منظور، مدل‌های چشمه‌ی لرزه‌زا و روابط کاهندگی اشاره شده به عنوان ورودی به بستر^۹ نرم‌افزار OpenQuake مدنظر قرار گرفته و از مازول تحلیل رویداد محور^{۱۰} استفاده شده است.^[۱۵] با استفاده از بستر ذکر شده، کاتالوگ مصنوعی در یک دوره‌ی زمانی بسیار طولانی با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی مونت کارلو تولید شده است. واضح است که الگوی لرزه‌خیزی حاکم بر کاتالوگ مصنوعی تولید شده منطبق بر مدل بازگشتی زلزله‌ی منطقه است که این مدل بازگشتی برای منطقه‌ی خاورمیانه در پروژه‌ی EMME از رابطه‌ی گوتبرگ - ریشتر و ضرایب مرتبط با هرگسل استفاده شده است. در ادامه، میدان جنبش زمین متناظر با هر رویداد واقع در کاتالوگ مصنوعی برای گستره‌ی جغرافیایی مدنظر بر مبنای مدل‌های جنبش زمین^{۱۱} تعریف شده، بازتولید شده است. در تولید میدان جنبش زمین در هر رویداد لازم است از مدل‌های همبستگی مکانی مناسب استفاده شود.^[۱۶] که در پژوهش حاضر از مدل همبستگی مکانی JB^{۱۲} استفاده شده است.^[۱۷] در مطالعه‌ی حاضر، ۱۱۰۰۰ رویداد^{۱۳} شناسایی شده است که تعداد اخیر معرف فعالیت لرزه‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه در یک دوره‌ی زمانی فرضی ۵۰ هزار ساله است. در شکل (الف) توزیع مکانی کانون رویدادهای مختلف شبیه‌سازی و در شکل (ب) گستره‌ی بزرگی زلزله‌های شبیه‌سازی شده به همراه فراوانی هر یک مشاهده می‌شود. در شکل ۳، نیز میدان جنبش زمین (در اینجا PGA^{۱۴}) برای یک رویداد موردی از کاتالوگ مشاهده می‌شود که در آن می‌توان موقعیت جغرافیایی کانون زلزله‌ی بزرگای $M_w = 6/35$ ریشتر به همراه مقادیر شتاب پیشینه‌ی زمین در گستره‌ی پالایشگاه اعم از چاه‌های برداشت^{۱۵}، واحدهای پالایشی^{۱۶}، مزرعه‌ی مخازن^{۱۷}، ایستگاه پمپاژ^{۱۸} و ایستگاه تقویت فشار (کمپرسور)^{۱۹} را مشاهده کرد.

به عنوان کنترل نهایی بر راستی‌آزمایی محاسبات خطر، منحنی خطر برآمده از تحلیل حاضر در نرم‌افزار OpenQuake برای مرکز پالایشگاه براساس پروژه‌ی EMME و نیز سایت تحلیل خطر EFER.org مقایسه و در شکل ۴ ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج به‌خصوص در محدوده‌ی شتاب‌های $0/1g$ تا $0/5g$ با دقت خوبی، یکسان هستند.

۴. توسعه‌ی مدل ریسک توقف تولید در سیستم پالایشگاه

جهت توسعه‌ی مدلی قابل اطمینان برای سنجش زیان حاصل از توقف تولید بعد از رویداد زلزله در سیستم پالایشگاه پارسیان (موضوع مطالعه‌ی حاضر)، این مراحل طی شده است.



الف) دیاگرام ارتباطی اجزای مختلف؛



ب) توزیع جغرافیایی سامانه‌ها.

شکل ۱. اجزاء مختلف سامانه‌ی پالایشگاهی پارسیان.

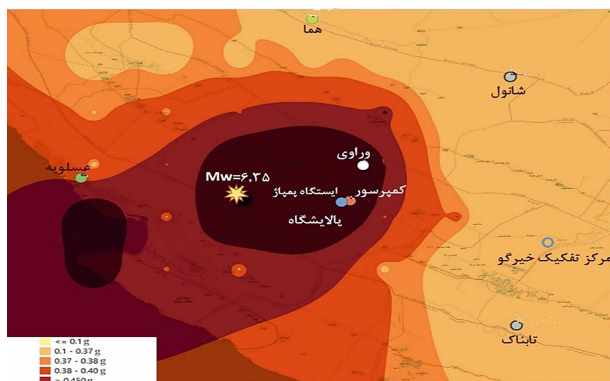
دلاری خواهد بود. بیمه‌ی سنتی زلزله عموماً پوشش‌دهنده‌ی خسارت‌های ناشی از آسیب به تجهیزات و سازه‌های پالایشگاهی است و خسارت اشاره شده را به صورت کامل پوشش نمی‌دهند. در مطالعه‌ی حاضر، مدلی برای برآورد ریسک توقف امر تولید ناشی از زلزله ساخته و بر مبنای آن، پارامترهای آغازگر^۲ بیمه طراحی شده‌اند.

۳. مدل خطر زلزله در سیستم پالایشگاه

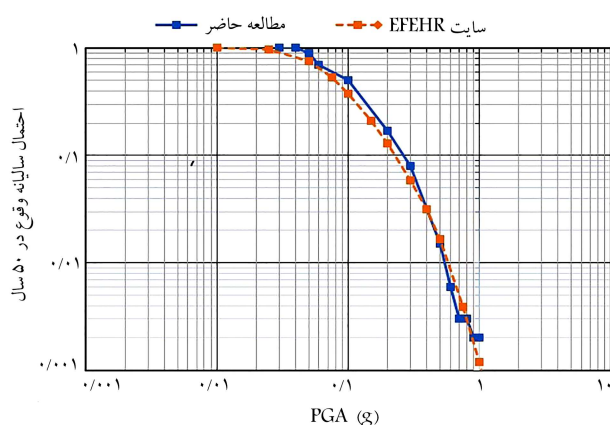
در مطالعه‌ی حاضر، برای محاسبه‌ی چشمه‌های لرزه‌زای منطقه از نتایج پروژه‌ی EMME (۲۰۱۴) که مختص منطقه‌ی خاورمیانه در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ توسعه یافته، استفاده شده است.^[۱۳] در پروژه‌ی اخیر، تلفیقی از مدل چشمه‌های سطحی با وزن $(0/4)$ و چشمه‌های خطی با وزن $(0/6)$ استفاده شده است. پالایشگاه پارسیان در ناحیه‌ی با مشخصات تکنیکی فعال با زلزله‌های پوسته‌ی کم‌عمق قرار دارد. بر این اساس، در پروژه‌ی EMME از ۴ مدل جنبش زمین با وزن‌های متفاوت استفاده شده است. لازم به ذکر است استفاده از هر مدل دیگر

جدول ۲. ارزش‌گذاری تولیدهای روزانه‌ی پالایشگاه پارسیان به میلیون دلار.

شماره	مسیر تولید	تولید		ارزش دلاری روزانه محصول	
		محصول	حجم روزانه		
۱	کمپرسور → U400 تابناک → میدان گازی	گاز طبیعی	21 Mm ³ /day	3/99 M\$	
۲	مخزن مزرعه ۲ → ایستگاه پمپاژ → مخزن مزرعه ۱ → U400 میدان گازی → تابناک	میعانات گازی	235 ton/day	2/665 M\$	
۳	کمپرسور → U400 تابناک → میدان گازی	گاز طبیعی	21 Mm ³ /day	3/99 M\$	
۴	مخزن مزرعه ۲ → ایستگاه پمپاژ → مزرعه مخزن ۱ → U500 میدان گازی → تابناک	میعانات گازی	235 ton/day	2/665 M\$	
۵	میدان گازی مزرعه مخزن ۲ → ایستگاه پمپاژ → مخزن مزرعه ۱ → U103 → وراوی	میعانات گازی	35 ton/day	0/396 M\$	
۶	کمپرسور → U800 تابناک → میدان گازی	گاز طبیعی	2 Mm ³ /day	0/38 M\$	
۷	کمپرسور → U104 → خیرگو → میدان گازی شانول	گاز طبیعی	12 Mm ³ /day	2/28 M\$	
۸	مخزن مزرعه ۲ → ایستگاه پمپاژ مزرعه مخزن ۱ → U103 خیرگو → میدان گازی شانول	میعانات گازی	125 ton/day	1/417 M\$	
۹	کمپرسور → U104 → میدان گازی هما	گاز طبیعی	20 Mm ³ /day	3/80 M\$	
۱۰	مزرعه مخزن ۲ → ایستگاه پمپاژ → مزرعه مخزن ۱ → U103 → خیرگو میدان گازی هما	میعانات گازی	200 ton/day	2/267 M\$	
				مجموع	23/85 M\$



شکل ۳. توزیع شدت زلزله در یک سناریوی مشخص بزرگای $M_w = 6/35$ در مختصات نشان داده شده.

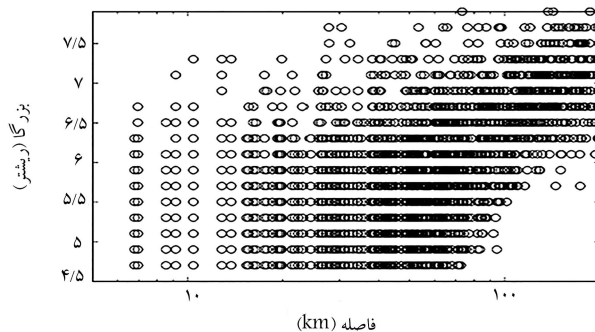


شکل ۴. منحنی خطر زلزله برای شتاب بیشینه‌ی زمین در مرکز پالایشگاه.

گاز و انتقال گاز از میدان تابناک، واحد پالایشی U400، مجموعه‌ی مخازن واقع در پالایشگاه، ایستگاه پمپاژ، مزرعه‌ی مخازن واقع در عسلویه» است. با فرض عملکرد کامل هر یک از زیرسیستم‌ها در این مسیر، تولید روزانه‌ی ۲/۶۶۵ میلیون دلار میعانات گازی محقق می‌شود.



الف) توزیع مکانی رویدادهای شبیه سازی شده در منطقه؛

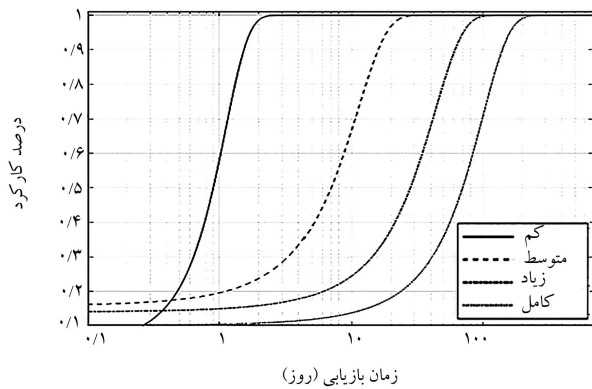


ب) گستره بزرگای زلزله‌های شبیه سازی شده و فراوانی هر یک از آنها نسبت به مرکز پالایشگاه.

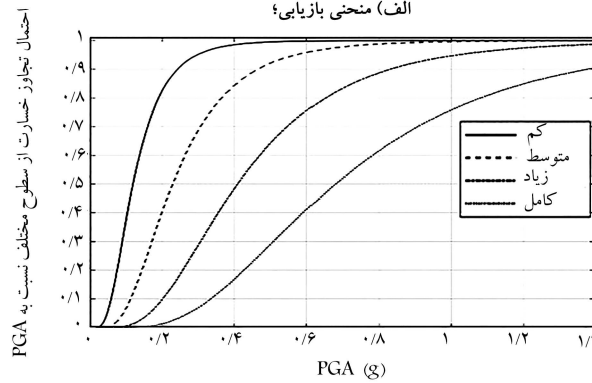
شکل ۲. توزیع مکانی رویدادهای شبیه‌سازی شده در منطقه، سناریوی ۶/۳۵ ریشتری با ستاره مشخص شده است.

۱.۴. تجزیه‌ی سیستم

به منظور داشتن ۴ میدان گازی مستقل تأمین خوراک، ۵ واحد پالایشی و ۲ رده‌ی محصول تولیدی (گاز طبیعی و میعانات گازی)، مطابق شکل ۱، سیستم به ۱۰ مسیر تولید مجزا تجزیه (جدول ۲) و میزان مشارکت هر مسیر در تولید کل پالایشگاه درج شده است. هر یک از مسیرهای تولیدی اشاره شده متشکل از چند زیرسیستم مجزاست. به عنوان مثال، مسیر تولید شماره‌ی ۲ متشکل از «تجهیزات جمع‌آوری

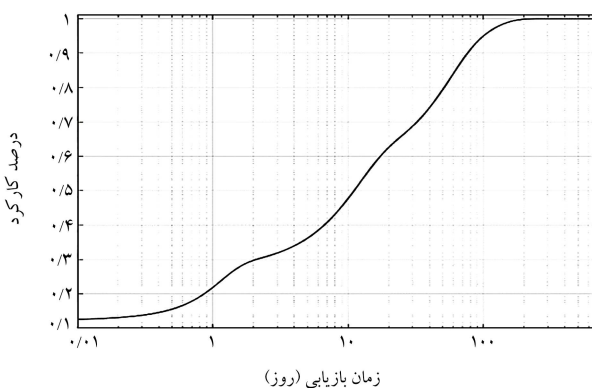


زمان بازیابی (روز)



ب) منحنی شکنندگی.

شکل ۵. منحنی‌های بازیابی و شکنندگی برای مخازن مهار نشده مطابق HAZUS.^[۱۹]



زمان بازیابی (روز)

شکل ۶. منحنی‌های بازیابی مزرعه مخزن برای شدتی معادل شتاب $g/0.4$.

از چند مخزن، آسیب‌دیدگی کامل را تجربه می‌کند، ۳۵٪ آسیب‌دیدگی شدید، ۳۵٪ آسیب‌دیدگی متوسط و ۱۵٪ نیز در وضعیت آسیب‌دیدگی کم است. با تلفیق احتمال‌های اخیر با منحنی‌های بازیابی نشان داده شده در شکل (۵الف)، منحنی بازیابی نهایی زیرسیستم اخیر برای شدتی معادل شتاب بیشینه $g/0.4$ مطابق شکل ۶ به دست می‌آید. شایان ذکر است که هرچند استفاده از منحنی‌های اشاره شده در کشور ایران در حالت خوش‌بینانه است، ولی از لحاظ الگوی پیشنهادی قابل استفاده هستند.

برای هر کدام از زیرسیستم‌های واقع بر هر مسیر تولید می‌توان منحنی بازیابی مشابهی را توسعه داد. در یک مسیر تولید دلخواه، زیرسیستم‌های متنوع با منحنی بازیابی متفاوت قرار می‌گیرند. منحنی‌های بازیابی زیرسیستم‌های واقع بر مسیر

۲.۴. تخصیص منحنی بازیابی برای هر مسیر تولید متناظر با هر

سناریوی زلزله

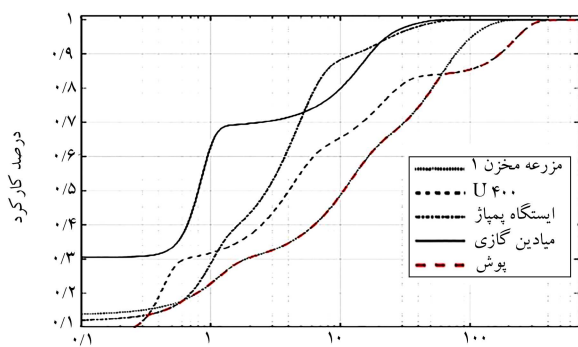
با فرض رخداد یک سناریوی فرضی از زلزله همانند سناریوی نشان داده شده در شکل ۳، هر یک از زیرسیستم‌ها نظیر مسیر تولید شماره ۲، تراز مشخصی از شدت زلزله (در اینجا بیشینه‌ی شتاب زمین) را تجربه خواهند کرد. آسیب‌دیدگی احتمالی یک زیرسیستم باعث خروج از سرویس‌دهی به مدت چند روز خواهد شد. تعداد روزهای بازیابی در یک شدت مشخص از زلزله، عدم قطعیت ذاتی دارد و با یک منحنی موسوم به «منحنی بازیابی» مدل می‌شود.

پیچیدگی ذاتی در رفتار لرزه‌ی زیرسیستم‌های پالایشگاهی و فقدان داده‌های تجربی کافی از آسیب‌پذیری اجزاء مذکور در زلزله‌های گذشته باعث می‌شود تا استفاده از قضاوت خبرگان امر مهندسی زلزله، تنها راهکار معقول برای نیل به حل مسئله‌ی حاضر باشد. از سویی دیگر، فقر نسبی کشور در دسترسی به مهندسان زلزله‌ی خیره در این امر، دیگر محدودیت پیش روی پروژه‌ی حاضر است. برای رهایی از این بن‌بست، بهره‌گیری از تجارب بین‌المللی، تصمیمی معقول است. به‌عنوان مهم‌ترین منبع در دسترس برای مسئله‌ی اخیر، گزارش مدون ATC۱۳ مدنظر قرار گرفته است.^[۱۸] استفاده از مدل‌های ATC۱۳ در پروژه‌ی حاضر، توجیه‌پذیر است، زیرا سامانه‌های پالایش نفت و گاز در سراسر دنیا، ساختار تقریباً یکسانی دارند. نتایج گزارش مذکور، مرجع اصلی سامانه‌ی جامع برآورد خسارت آمریکا (HAZUS) است، که توسط آژانس فدرال مدیریت اضطرار (FEMA) توسعه یافته است.^[۱۹] شایان ذکر است که استفاده از مدل‌های ATC۱۳ در پروژه‌های کشورهای مختلف، دارای سابقه است.^[۲۰-۲۳]

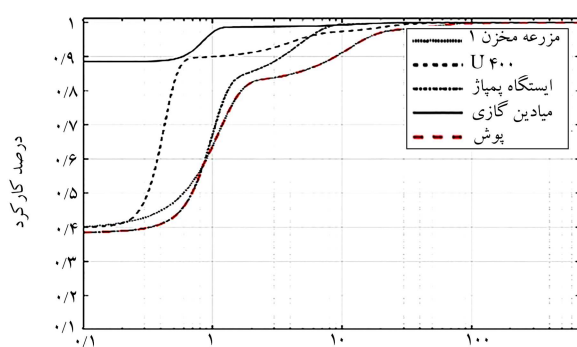
در مدل ATC۱۳، سامانه‌های پالایشگاهی به زیرسیستم‌های مختلف تجزیه می‌شوند و مدل‌های پیش‌بینی زمان بازیابی^{۲۱} براساس تابعی از شدت زلزله به آن‌ها تخصیص می‌یابند. به‌عنوان نمونه، در شکل (۵الف)، احتمال بازگشت عملکرد به سیستمی متشکل از چند مخزن (مزرعه‌ی مخزن) مهار نشده^{۲۲} به‌صورت تابعی از روزهای بازیابی و براساس حالت‌های مختلف آسیب‌دیدگی (کم، متوسط، زیاد و کامل) مشاهده می‌شود. مثلاً از منحنی مذکور می‌توان دریافت که ۱۰ روز پس از زلزله، اگر آسیب‌دیدگی مخازن متوسط باشد، به احتمال ۶۵٪ مجموعه‌ی مخازن به مدار عملکرد بازگشته‌اند؛ اما اگر آسیب‌دیدگی کامل باشد، فقط ۱۵٪ احتمال دارد آن مجموعه‌ی مخزن به مدار تولید بازگردد. در مدل ATC۱۳، هر یک از سطوح آسیب‌دیدگی تعریف شده، توصیف نسبتاً کاملی دارد. به‌عنوان مثال، آسیب‌دیدگی متوسط برای سیستم متشکل از چند مخزن این‌گونه توصیف شده است: از دست رفتن سامانه‌ی برق‌رسانی، آسیب جدی به ابزارهای دقیق، و یا خرابی قابل ملاحظه‌ی مخازن. اما منظور از آسیب‌دیدگی کامل برای مجموعه‌ی مخزن اشاره شده چنین است: شکست کامل همه‌ی لوله‌های قرارگرفته در ارتفاع یا فروریزش مخازن.^[۲۲]

منحنی نمایش داده شده در شکل (۵الف)، ماحصل نظرات خبرگان است و به‌طور طبیعی نظرات مذکور، واجد پراکنندگی هستند. طبیعت احتمالاتی شکل اخیر نیز برای پوشش‌دادن این عدم قطعیت ذاتی است. در سوی مقابل، منحنی‌های شکنندگی نمایانگر همبستگی آماری بین سطوح مختلف آسیب‌دیدگی یک سیستم و شدت جنبش زمین هستند. توسعه‌ی روابط شکنندگی برای سیستم‌های نفتی و پالایشگاهی در مدل ATC۱۳ بر مبنای قضاوت کارشناسی خبرگان تدوین شده است. در شکل (۵ب)، منحنی‌های شکنندگی^{۲۳} برای سیستمی متشکل از مجموعه‌ی مخازن مهارنشده براساس شتاب بیشینه‌ی زمین مشاهده می‌شود.

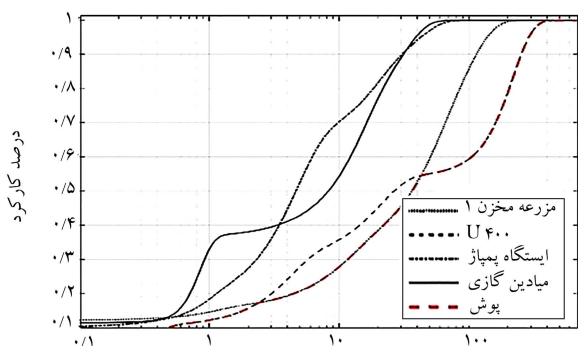
برای نمونه، اگر شتابی برابر $g/0.4$ رخ دهد، احتمال ۱۵٪ سیستم مذکور متشکل



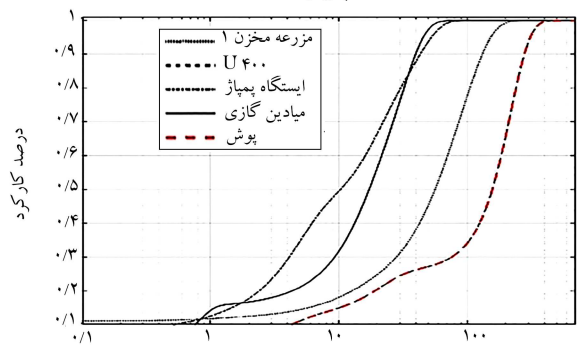
(ب) شتاب بیشینه $g_{0.4}$ زمان بازیابی (روز)



(الف) شتاب بیشینه $g_{0.15}$ زمان بازیابی (روز)

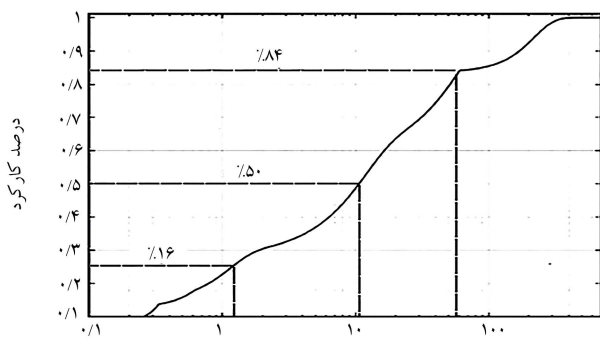


(د) شتاب بیشینه $g_{0.1}$ زمان بازیابی (روز)

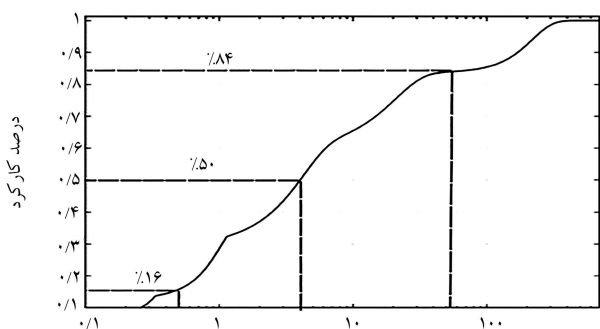


(ج) شتاب بیشینه $g_{0.65}$ زمان بازیابی (روز)

شکل ۷. منحنی بازیابی ۴ زیرسیستم مسیر ۲ تولیدی در شتاب‌های بیشینه‌ی مختلف.



(الف) مسیر بازیابی شماره ۲



(ب) مسیر بازیابی شماره ۲

شکل ۸. منحنی بازیابی مسیرهای تولیدی براساس سناریوی فرضی شکل ۳.

تولیدی شماره‌ی ۲ به ازاء مقادیر مختلف شتاب بیشینه در شکل ۷ مقایسه شده‌اند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در هر یک از چهار شتاب مدنظر، وضعیت منحنی‌های بازیابی متفاوت‌اند. در شتاب‌های کمتر، به‌طور عمده مخازن ذخیره‌سازی زیرسیستم بحرانی هستند و کنترل‌کننده، تعداد روزهای بازیابی مسیر تولید است و در شتاب‌های بالاتر واحد پالایشی زیرسیستم بحرانی است. منحنی بازیابی مسیر تولیدی اخیر را می‌توان پوش حاصل از ۴ زیرسیستم اشاره‌شده تعریف کرد. منحنی بازیابی مسیر ۲ در شکل ۷ برای شتاب‌های مختلف ترسیم شده است.

لازم به ذکر است با توجه به توزیع جغرافیایی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی یک مسیر تولیدی، مقادیر شتاب زلزله در زیرسیستم‌های واقع در مسیر تولیدی یکسان نیستند و بسته به بزرگی و کانون قرارگیری هر سناریوی دلخواه، مقادیر شتاب در هر زیرسیستم متفاوت است و باید در محاسبه‌ی منحنی بازیابی مسیر تولیدی مدنظر قرار گیرد. به‌عنوان مثال، براساس سناریوی فرضی اشاره‌شده در شکل ۳، منحنی بازیابی مسیرهای شماره‌ی ۱ و ۲ تولیدی، محاسبه و در شکل ۸ ارائه شده‌اند.

۳.۴. تجمیع مسیرهای تولیدی و استخراج مدل خسارت سیستم پالایشگاه در یک سناریوی دلخواه

با در نظر گرفتن منحنی بازیابی توسعه داده‌شده برای هر مسیر تولیدی، زمان بازیابی موردانتظار هر مسیر برآورد شده است. برای مثال، در یک سناریوی فرضی نظیر شکل ۳، زمان بازیابی موردانتظار برای مسیرهای ۱ و ۲ به ترتیب ۴ و ۱۰ روز به‌دست آمده است. بنابراین با در نظر گرفتن زیان روزانه‌ی ناشی از توقف مسیرهای تولیدی ۱ و ۲ از جدول ۲ با توجه به قیمت جهانی اشاره‌شده، خسارت موردانتظار در مسیرهای

جدول ۴. نمایش سرجمع زیان موردانتظار به همراه مقادیر شتاب زمین در هر یک از زیرسیستم‌های پالایشگاه در هر رویداد شبیه‌سازی شده.

شماره‌ی رویداد	بزرگا (ریشتر)	موقعیت رویداد		خسارت (میلیون دلار)	PGA (g)								
		Lat.	Lon.		هما	شاتول	وراوی	تابناک	ایستگاه واحدهای		مزرعه‌ی مخزن		
									کمپرسور	پمپاژ		پالایشی	
۳۷	۷/۳	۲۸/۰۵	۵۲/۰۱	۹۲/۸	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۴۵	۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۳
۱۲۵	۵/۹	۲۷/۸۸	۵۲/۶۲	۷/۰	۰/۱۵	۰	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰	۰/۰۶	۰/۰۴
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۶۱۹۰	۶/۵	۲۷/۲۵	۵۳/۰۲	۲۷/۳	۰	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۰۵
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰۴۰۹	۴/۷	۲۷/۷۹	۵۲/۹۴	۳۴/۰	۰/۴۸	۰	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰/۰۴

تولید با احتمال ۱٪، زیان ۱۲ میلیون دلاری ناشی از توقف تولید موردانتظار است. همچنین با احتمال ۰/۰۱ در یک سال، زیان مورد انتظار بالغ بر ۷۰۰ میلیون دلار خواهد بود. مدل زیان پیشنهادی می‌تواند در تصمیم‌گیری آگاهانه‌ی مدیریت پالایشگاه، نقش مؤثری ایفا کند.

OpenQuake، تابعی برای پیش‌بینی زیان‌های مالی در سناریوهای مختلف بزرگا و کانون زلزله به‌دست آمده است. از تلفیق تابع زیان با تابع خطر لرزه‌ی، در نهایت مدل ریسک زیان لرزه‌ی ناشی از توقف تولید به‌دست آمده است. بر این اساس، در یک سال با فرض توقف

پانوشتها

- Kocaeli
- Erdik
- Kajitani & Tatano
- parametric insurance
- catastrophe bonds
- interruption
- trigger
- Monte Carlo simulation
- platform
- Event-based
- Ground motion
- Jayaram and Baker
- event
- peak ground acceleration (PGA)
- wells
- refinery units
- tank farm
- pump station
- compressor
- federal emergency management agency
- restoration time
- unanchored
- Fragility
- event-based
- spatial correlation

منابع (References)

- Lackner, S. "FIW-Working paper earthquakes and economic growth", Earthquakes and Economic Growth Working Paper (2018).
- Sezen, H. and Whittaker, A.S. "Seismic performance of industrial facilities affected by the 1999 Turkey earthquake", *J. Perform. Constr. Facil.*, **20**(1), pp. 28-36 (2006).
- Durukal, E. and Erdik, M. "Physical and economic losses sustained by the industry in the 1999 Kocaeli, Turkey earthquake", *Nat. Hazards*, **46**(2), pp. 153-178 (2008).
- Kajitani, Y. and Tatano, H. "Estimation of production capacity loss rate after the great east Japan earthquake and tsunami in 2011", *Econ. Syst. Res*, **26**(1), pp. 13-38 (2014).
- Berberian, M. and Tchalenko, J. "Earthquakes of the southern Zagros (Iran): Bushehr Region", *Geol. Surv. Iran*, **39**, pp. 343-370 (1976).
- Steinberg, L.J., Cruz, A.M., Vardar-Sukan, F. and et al. "Risk management practices at industrial facilities during the Turkey earthquake of August 17, 1999: case study report", in 1st Annual IIASA-DPRI meeting Proceedings, Laxenburg, Austria, pp. 1-4 (2001).

7. Erdik, M. and Durukal, E. "Earthquake risk and its mitigation in Istanbul", *Nat. Hazards*, **44**(2), pp. 181-197 (2008).
8. Motamed, H., Calderon, A., Silva, V. and et al. "Development of a probabilistic earthquake loss model for Iran", *Bull. Earthq. Eng.*, **17**(4), pp. 1795-1823 (2019).
9. Franco, G.; Guidotti, R.; Bayliss, C. and et al. "Earthquake financial protection for Greece: A parametric insurance Cover Prototype", in *Proceedings of 2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure*, pp. 23-26 (2019).
10. Lin, X. and Kwon, W.J. "Application of parametric insurance in principle-compliant and innovative ways", *Risk Manag. Insur. Rev.*, **23**(2), pp. 121-150 (2020).
11. Freddi, F., Galasso, C., Cremen, G. and et al. "Innovations in earthquake risk reduction for resilience: Recent advances and challenges", *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, **60**, p. 102267 (2021).
12. Cummins, J.D. "Cat bonds and other risk-linked securities: state of the market and recent developments", *Risk Manag. Insur. Rev.*, **11**(1), pp. 23-47 (2008).
13. Sesetyan, K., Danciu, M.B. and Demircioglu, and et al. "The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results," *Bull Earthq. Eng.*, **16**(8), pp. 3535-3566 (2018).
14. Musson, R.M.W. "The use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment in the UK", *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)*, **43**(1) (2000).
15. Silva, V., Crowley, H., Pagani, M. and et al. "Development of the openQuake engine, the global earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment", *Nat. Hazards*, **72**(3), pp. 1409-1427 (2014).
16. Zafarani, H., Ghafoori, S.M.M. and Adlparvar, M.R. "Spatial correlation of peak ground motions and pseudo spectral acceleration based on the iranian multievent datasets", *J. Earthq. Eng.*, pp. 1-21 (2021).
17. Jayaram. N. and Baker, J.W. "Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **38**(15), pp. 1687-1708 (2009).
18. Rojahn, C., Sharpe, R.L., Scholl, R.E. and et al. "Earthquake damage evaluation data for California", *Atc-13*, p. 492 (1985).
19. Hazus Earthquake Model Technical Manual Hazus 4.2 SP3, (2020).
20. Choi, J., Yoo, D.G. and Kang, D. "Post-earthquake restoration simulation model for water supply networks", *Sustain*, **10**(10) (Oct., 2018).
21. Nastev, M. "Adapting Hazus for seismic risk assessment in Canada", *Can. Geotech. J.*, **51**(2), pp. 217-222 (2014).
22. Kulmesch, S. "Evaluation of the HAZUS-MH loss estimation methodology for a natural risk management case study in Carinthia, Austria", Unpubl. Master thesis (2010).
23. Mousavi, M., Hesari, M. and Azarbakht, A. "Seismic risk assessment of the 3rd Azerbaijan Gas pipeline in Iran", *Nat. Hazards*, **74**(3) (2014).