

S. Kouhestani

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom.

e-mail: s.kohestani@stu.qom.ac.ir

B. Sayyafzadeh

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom.

e-mail: B.Sayyafzadeh@stu.qom.ac.ir

M. Sharifi*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom.

e-mail: mfsharifi@yahoo.com

Seismic Vulnerability Assessment of Derrick-Supported Flare-Stacks Using Fragility Curves

Risk reduction and management of oil, gas, and petrochemical plants are important in terms of energy supply, financial implications, life loss, and repairs. Probabilistic analysis and reliability methods are effective approaches for calculating the risk and cost to such plants, which are composed of units with different types of equipment and structures that have different responses and consequences. One major piece of equipment in a plant that has been shut down is the flare. Depending on the height, the flares can be self-supported, guy-supported, or derrick-supported. The current study investigated the seismic probability behavior of a derrick-supported flare. An existing flare was investigated using the finite element method and incremental dynamic analysis as a case study. The different limit states of the structures were considered when calculating the fragility curves using the results of incremental dynamic analysis. The results showed that the seismic demand on the main structure of the flare stack in the ordinary seismic intensity range was not significant due to the flexible behavior of the structure.

Keywords: Incremental dynamic analysis, Flare, Fragility curve, Seismic vulnerability, Probabilistic assessment.

* Corresponding author

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزاهاي سازه‌های خرپایی بلند (مشعل) با استفاده از منحنی‌های شکنندگی

در حال حاضر، کاهش ریسک لرزاهاي مجتمع‌های صنعتی به‌ویژه زیرساخت‌های تأمین انرژی مورد توجه قرار گرفته است. تحلیل‌های احتمالاتی و قابلیت اعتماد ایزار توانمندی در محاسبه ریسک و هزینه پیدا کرده است. یکی از مهم‌ترین مجتمع‌ها و کارخانه‌هایی که به لحاظ تأمین انرژی، پیامدهای مالی، جانی و تعمیرات مورد توجه است، کارخانجات نفت، گاز و پتروشیمی می‌باشد. این مجتمع‌ها عمدها از واحدهای مختلفی تشکیل شده است و هر واحد دارای تجهیزات و سازه‌های متنوعی با رفتارها و پیامدهای خاص خود می‌باشد. بررسی رفتار لرزاهاي احتمالاتی کارخانه نیازمند درک صحیح رفتار اجزا و تجهیزات تشکیل دهنده آن می‌باشد. یکی از تجهیزاتی که در هنگام توقف بهره‌برداری پلنت‌ها و همچنین جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست در آن‌ها کاربرد دارد، تجهیز فلر می‌باشد. فلرها بسته به ارتفاع دارای سه نوع خود ایستا، مهار شده با کابل و مهار شده با سازه پشتیبان (دربک) می‌باشند. در این تحقیق، رفتار لرزاهاي احتمالاتی تجهیز فلر مهار شده با سازه پشتیبان مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین منظور، مطالعه موردي از فلر طراحی و ساخته شده با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی و مورد تحلیل‌های دینامیکی افزاینده قرار گرفته است. سپس با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف خرایی سازه و براساس نتایج تحلیل منحنی‌های شکنندگی استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد در سازه‌های فلر بلند و نسبتاً بلند، به دلیل رفتار انعطاف‌پذیر سازه، در حالت کلی، مقدار نیازهای لرزاهاي وارد شده به سازه اصلی قابل ملاحظه نمی‌باشند و رفتار کلی سازه نگهدارنده فلر، بیشتر توسط اجزای سازه‌ای تعیین می‌گردد. نتیجه حاصل شده در زلزله‌های مشابه تجربه شده است.

وازگان کلیدی: تحلیل دینامیکی افزاینده، فلر، منحنی شکنندگی، آسیب‌پذیری لرزاهاي، ارزیابی احتمالاتی.

سعیده کوهستانی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه،
دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه
قم.

پست الکترونیک:
s.kohestani@stu.qom.ac.ir

بیژن سیافزاده

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده
فنی مهندسی، دانشگاه قم.

پست الکترونیک:
b.sayyaf@yahoo.com

مهدی شریفی*

استادیار، دانشکده فنی مهندسی،
دانشگاه قم.

پست الکترونیک:
mfsharifi@yahoo.com

۱- مقدمه

محصولات تولیدی پتروشیمی در سال‌های اخیر، توجه بسیاری را به این صنعت معطوف کرده است. از سوی دیگر، گسترش این صنعت با چالش‌های بسیاری از جمله احتمال وقوع زلزله همراه است. احداث کارخانجات صنعتی در مناطقی با پتانسیل خطر زلزله، بسیار گسترش یافته است و این موضوع ارزیابی خطر لرزاهاي این کارخانه‌ها را به یک ضرورت اساسی تبدیل می‌کند. همچنین انتخاب موقعیت ساخت یک کارخانه، یک انتخاب استراتژیک است که سعی می‌شود هزینه حمل و نقل از طریق خطوط لوله را به حداقل برساند و در نتیجه

امروزه نقش کلیدی صنعت نفت و پتروشیمی در توسعه اقتصادی کشورهای مختلف جهان بر کسی پوشیده نیست. توسعه صنعت نفت و گاز و نقش آن در تأمین امنیت انرژی جهان و نیاز روز افزون جوامع بشری به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۰۹/۰۹، بازنگری ۱۳۹۹/۱۰/۱۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۱۶.
DOI: 10.22091/cer.2021.6244.1218 شناسه دیجیتال

لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد سیستم‌های لوله‌کشی صنایع پتروشیمی از طریق مطالعه موردي توسط بورسی^۶ و همکاران و بسیاری از موارد دیگر [۳، ۴ و ۵].

یکی از اجزای غیرساختمنی کارخانه‌های نفتی، فلرها هستند. در صنعت، عواملی همچون قطع جریان برق، تغییر در خوراک ورودی به بخش‌ها، بهره‌برداری بیش از ظرفیت طراحی از واحدهای تولیدی، تعمیر و نگهداری نامناسب، انحراف از روش‌های درست و دستورالعمل‌های بهره‌برداری و اشتباهات انسانی از جمله عواملی هستند که موجب تغییرات فرآیندی و بالا رفتن فشار در مخازن، برج‌ها و سایر تجهیزات صنعتی می‌گردند [۶]. تغییرات فشار به نوبه خود می‌تواند موجب صدمات جبران‌ناپذیر به تجهیزات صنعتی و بعض‌اً صدمات جانی گردد. از عمدت‌ترین روش‌های ایمن‌سازی دستگاه‌های صنعتی در مقابل افزایاد فشار، فلرها می‌باشند. فلرها دودکش‌هایی هستند که گازهای اضافی قبل از آن که مشکلی برای تأسیسات به وجود آورند، توسط آنها و با فاصله از کارخانه سوزانده می‌شود. همچنین این تجهیزات به منظور دور کردن گازهای مضر و بعض‌اً بسیار خطرناک از محیط صنعتی و حفاظت از تجهیزات و شاغلان حاضر در کارخانه از تشعشعات حرارتی ناشی از سوختن گازها طراحی شده‌اند. به بیان دیگر، فلر و سیله ایمنی است که کارخانه را از عواقب گازهای مازاد نجات می‌دهد [۷].

به‌طور کلی، فلرهای مورد استفاده در پالایشگاه‌ها را می‌توان به دو دسته مرتفع و زمینی (کم ارتفاع) تقسیم کرد. طراحی فلرهای مرتفع براساس حداکثر جریان مواد قابل احتراق و حداکثر میزان مجاز تشعشعات حاصل از احتراق می‌باشد و از نظر نوع مهار کردن دودکش به سه نوع خود ایستا^۷، کابلی^۸ و دکلی^۹ تقسیم می‌شوند (شکل [۸]).

این استراتژی، کارخانه‌ها به مناطق شهری نزدیک شده‌اند. کنترل یک رویداد زمانی از دست می‌رود که یک عضو غیرسازه‌ای یا سازه‌ای دچار شکست شود و باعث از بین رفتن جان انسان‌ها و پیامدهای فاجعه بار محیط زیستی و مالی شود [۱].

زمین لرزه از جمله مخاطرات طبیعی می‌باشد که مسئول حوادث عمدی و خسارات قابل توجه در بسیاری از اماکن صنعتی بوده است. با این وجود، استانداردهای ملی یا بین‌المللی هیچ روندی را برای ارزیابی ریسک کلی کارخانه‌های صنعتی که در مناطق زلزله‌خیز واقع شده است، ارائه نمی‌دهند. یکی از حوادث اخیر زلزله توهوکو^۱ و سونامی مرتبط با آن می‌باشد که باعث وقوع فاجعه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ شد. زلزله کچائلی^۲ در ترکیه، زلزله ونچان^۳ در سال ۲۰۰۸ در چین و موارد بسیار دیگری را در این زمینه می‌توان اشاره نمود، بنابراین ارزیابی ریسک رخدادهای لرزه‌ای به‌طور ویژه برای کارخانه‌های صنعتی توصیه شده است [۲]. به‌طور معمول، پالایشگاه‌های نفت و گاز و پتروشیمی شامل تجهیزات متعدد و تعداد زیادی از سازه‌های ساختمنی و غیرساختمنی می‌باشند، مخازن استوانه‌ای و مخازن افقی تحت فشار روی سطح زمین، نمونه‌هایی از سازه‌های معمول غیرساختمنی هستند. این تجهیزات عموماً برای ذخیره‌سازی آب، مواد نفتی، مواد شیمیایی و گازهای طبیعی کاربرد گسترده‌ای دارند. مطالعات زیادی بر روی ارزیابی لرزه‌ای این تجهیزات انجام گرفته است همچون مطالعات ایدینگر^۴ جهت تهیه توابع شکنندگی لرزه‌ای برای اجزای غیرسازه‌ای موجود در تأسیسات مشترک صنعتی، مطالعات دانسی^۵ جهت مطالعه موردي مربوط به یک پایپرک اصلی یک پالایشگاه در کارائیب با استفاده از تحلیل IDA و تهیه توابع شکنندگی، تجزیه و تحلیل

^۶- Bursi

^۷- Self-Supported

^۸- Guyed Supported

^۹- Derrick Type

^۱- Tohoku

^۲- Kocaeli

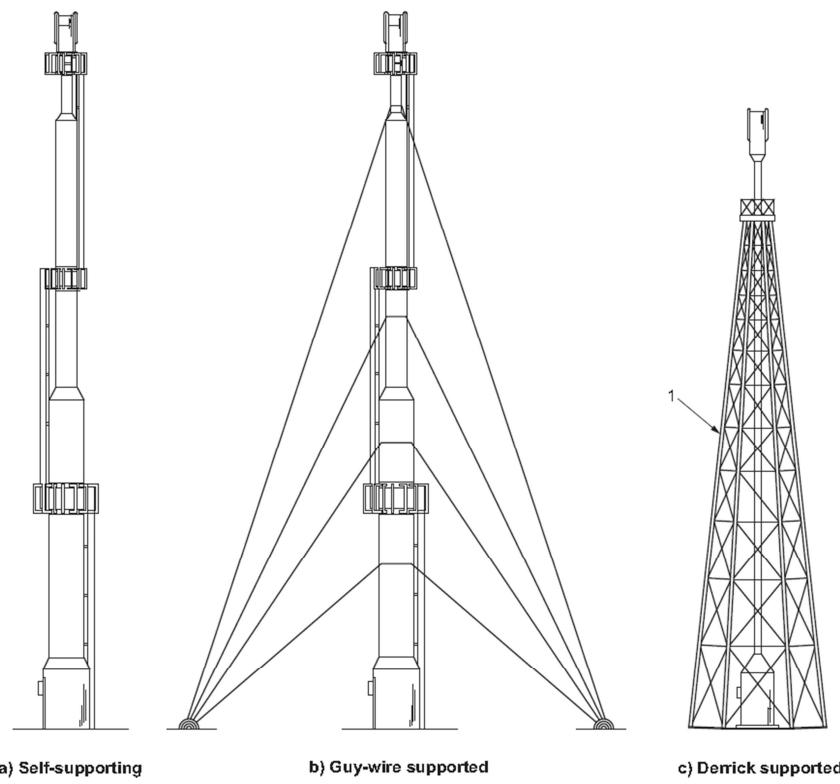
^۳- Wenchuan

^۴- Eidinger

^۵- Danesi

محافظت از آن است. با این وجود، مساحت قابل توجهی زمین اطراف فلر مورد نیاز است. براساس مدارک موجود، یک قانون برای فضای مورد نیاز جهت ساخت این نوع فلر دایره‌ای به شعاع برابر با ارتفاع آتشخان آن است [۱۰]. فلرهایی که بهوسیله سازه‌ی پشتیبان (دریک) محافظت می‌شوند می‌توانند به هر ارتفاع مورد نیاز ساخته شوند، زیرا بار سیستم بر روی دکل پخش شده و دیگر افزایش غیرمعمول قطر لوله فلر را به همراه نخواهد داشت [۱۱].

فلرهای خود ایستا سازه‌های ایده‌آلی هستند. با این حال، با افزایش ارتفاع و با بارگذاری باد، قطر و ضخامت دیواره آن‌ها بسیار بزرگ و پرهزینه می‌شوند. بنابراین معمولاً برای ارتفاع کم (۳۰ تا ۱۰۰ فوت) استفاده می‌شوند [۹]. فلرهای کابلی، اقتصادی‌ترین در دامنه ارتفاع ۱۰۰ تا ۳۰۰ فوت هستند و بهطور معمول، توسط مجموعه‌هایی از ۳ سیم در ترازهای مختلف محکم می‌شوند. مهار فلر بهوسیله کابل، ساده‌ترین روش



شکل ۱ - انواع فلر [۸]

نگردید. این در حالی است که در آن منطقه سازه‌ها براساس $PGA=0.22g$ طراحی شده بودند که این موضوع نشان از کم تأثیر بودن اثرات لرزه‌ای بر روی این دسته از سازه‌ها دارد [۱۲].

هدف از این مقاله، ارزیابی لرزه‌ای احتمالاتی فلرهای سازه پشتیبان می‌باشد. بهمین منظور، مطالعه موردنی از فلر طراحی و ساخته شده با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی و مورد تحلیل‌های دینامیکی افزاینده قرار گرفته است. سپس با در نظر گرفتن حالات مختلف

خرابی این نوع سازه‌ها تحت تأثیر زلزله بسیار کم گزارش شده است. در یکی از معدود گزارشات مربوط به زلزله ۱۲ مه ۲۰۰۸ به بزرگی $7/9$ و عمق ۱۹ کیلومتر و $PGA=0.96g$ منطقه وانچوان را در استان سیچوان در چین می‌توان اشاره نمود که طی آن تأسیسات صنعتی نیز تحت تأثیر این زمین لرزه قرار گرفت. مشاهدات حاکی از آن است که در این زلزله بعضی اعضای فلر ساخته شده از خرپای فلزی در فشار، کمانش کردند و کل سیستم فلر دچار خمیدگی شده است، اما بهره‌برداری از آن متوقف

می‌شود. در پایان هریک از مراحل آنالیز، مقدار شدت خسارت متناظر با سطح شدت لرزمای که آنالیز در آن صورت گرفته است ثبت می‌گردد. در نهایت، تحت هر رکورد مقیاس شده یک منحنی پاسخ در برابر شدت که به آن منحنی تک نگاشت IDA گفته می‌شود، به دست می‌آید. در ادامه، هریک از شاخص‌های ذکر شده و ضریب مقیاس زلزله تعریف می‌شوند.

۱-۲- شاخص شدت لرزمای

شاخص شدت لرزمای (^{۱۴}IM) کمیتی مقیاس‌پذیر و تابعی از شتاب‌نگاشت اصلی است که به صورت هماهنگ، با افزایش یا کاهش شتاب‌نگاشت تغییر می‌کند. مثال‌هایی از IM قابل مقیاس، بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV) و شتاب طیفی مود اول ارتعاش سازه (Sa) (T1, ۵%) می‌باشند. شاخص شدت لرزمای در بردارنده ویژگی‌های دینامیکی یک رکورد می‌باشد و انتخاب مناسب آن موجب کاهش پراکندگی داده‌ها می‌شود [۱۴]. در این مقاله، PGA به عنوان شاخص شدت لرزمای انتخاب شده است.

۲-۲- شاخص شدت خسارت

شاخص شدت خسارت (^{۱۵}DM) یک کمیت مثبت اسکالار است که مشخص‌کننده پاسخ سازه در برابر بارهای لرزمای می‌باشد. به بیان دیگر، شاخص شدت خسارت، کمیتی است که از خروجی تحلیل دینامیکی غیرخطی نتیجه‌گیری می‌شود. انتخاب یک شاخص خسارت مناسب بستگی زیادی به کاربری سازه، نوع سازه، اهمیت آن و هدف از انجام تحلیل دارد [۱۴]. با توجه به هندسه سازه‌های فلر، کمیت بیشینه جابه‌جایی نسبی بخش‌های داخلی دکل ^{۱۶}(حد فاصل بین دو المان افقی در ارتفاع خرپا) معیار مناسبی برای برآورده شدت خسارت می‌باشد و

خرابی سازه و براساس نتایج تحلیل‌های فزاینده منحنی‌های شکنندگی استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد در سازه‌های فلر بلند و نسبتاً بلند، به دلیل رفتار انعطاف‌پذیر سازه، در حالت کلی، مقدار نیازهای لرزمای وارد به سازه اصلی قابل ملاحظه نمی‌باشند. جزئیات و روند انجام مطالعه صورت گرفته در ادامه ارائه می‌گردد.

۲- مروری بر تحلیل IDA

تحلیل دینامیکی افزاینده (^{۱۰}IDA) توسط آژانس مدیریت بحران فدرال آمریکا (^{۱۱}FEMA) به عنوان روشی جدید برای تعیین ظرفیت خربایی کلی سازه پذیرفته شده است. مفهوم آن برای اولین بار توسط برتره ^{۱۲}(۱۹۷۷) بیان گردید و کرنل ^{۱۳} و همکاران این آنالیز را بسط و گسترش دادند [۱۳]. این روش که به منظور در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت ذاتی موجود در زلزله، در ارزیابی پاسخ لرزمای سازه‌ها ابداع شده است و با توجه به ماهیت دینامیکی آن و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح، دقیق‌ترین روش در تخمین رفتار سازه‌ها می‌باشد. تحلیل IDA شامل مجموعه‌ای از چندین تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است که به کمک آن مقدار خسارت وارد شده بر حسب شدت تحریک زلزله مشخص می‌شود. هر رکورد به‌نحوی مقیاس می‌شود تا گستره مناسبی از شدت‌های لرزمای و نیز رفتار سازه را از حالت الاستیک خطی تا مرحله فروریزش پوشش دهد [۱۴]. برای انجام تحلیل IDA، در ابتدا پارامتر شدت لرزمای از یک مقدار بسیار کوچک جهت حصول رفتار الاستیک تحت تحلیل دینامیکی تا سطح مشخصی از شدت لرزمای برای دستیابی به حد خربایی مورد نظر با یک الگوریتم مناسب مقیاس می‌گردد و هر بار این مقیاس به رکورد زلزله اعمال گردیده و سازه تحت اثر آن رکورد، آنالیز دینامیکی

¹⁴- Intensity Measure

¹⁵- Demand Measure

¹⁶- the maximum intersegment displacement ratio (ISDR_{max})

¹⁰- Incremental Dynamic Analysis

¹¹- Federal Emergency Management Agency

¹²- Bertero

¹³- Cornell

اطلاعات ضروری به نظر می‌رسد. در این حالت، هر منحنی تبدیل به یکتابع تصادفی ($IM = f(IM)$) (خسارت برحسب شدت) می‌شود. در نتیجه، با درنظر گرفتن مقادیر خسارت‌های تعیین شده در هر تراز از شدت زلزله می‌توانیم با داشتن صدکهای $1/50$ ٪ و $1/16$ ٪ طیف‌های پاسخ مجموعه‌ای از رکوردها را جمع‌بندی کنیم. در انتهای با مشخص نمودن حالت‌های حدی خرابی مورد نظر می‌توان به بررسی عملکرد و رفتار سازه تحت رکوردهای مختلف زلزله و نیز ارزیابی تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها پرداخت [۱۴].

۳- منحنی‌های شکنندگی

از آنجاکه زلزله دارای یک ماهیت تصادفی می‌باشد، باید با یک رویکرد احتمالاتی به این مسئله نگریست، یعنی بهجای بیان شدت زمین لرزه‌ای که سازه را به سطح خاصی از عملکرد می‌رساند، احتمال رسیدن به آن سطح و یا گذر از یک شاخص خسارت بهزاری شدت‌های مختلف زمین لرزه بیان شود. منحنی‌هایی که از این طریق محاسبه می‌شود منحنی شکنندگی نامیده می‌شوند. شکنندگی را می‌توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد:

$$F_i(im) = P(EDP \geq d_i / IM = im) \quad (2)$$

- در این رابطه، $F_i(im)$ ، احتمال رسیدن و یا گذر خسارت EDP از شاخص خسارت d_i در شدت حرکت زمین $IM = im$ را بیان می‌کند. جهت حصول منحنی شکنندگی باید مراحل زیر طی گردد:
 - در ابتدا سطوح عملکرد معروفی می‌شود.
 - مرحله دوم، تشکیل ماتریس پاسخ که شاخص خسارت به ازای شاخص لرزه‌ای می‌باشد.
 - مرحله سوم مربوط به تحلیل آماری برای استخراج منحنی‌های شکنندگی است.
 - مرحله نهایی، ساده کردن منحنی‌های شکنندگی به دست آمده برای کاربرد آسان‌تر می‌باشد.

در این تحقیق نیز این کمیت به عنوان شاخص خسارت در نظر گرفته شده است.

۲-۳- ضریب مقیاس

ضریب مقیاس ($S.F^{17}$) یک عدد مثبت مانند λ است که دامنه آن می‌تواند از صفر تا بینهایت تغییر کند و با ضرب آن در مقادیر شتاب‌نگاشت اولیه شتاب‌نگاشت مقیاس شده را به دست می‌دهد. با توجه به مقدار آن ($\lambda < 1$ or $\lambda > 1$) سطح شدت، افزایش یا کاهش می‌یابد. در اولین گام جهت مقیاس نمودن شدت لرزه‌ای، مقدار بسیار کوچک برای پارامتر شدت لرزه‌ای که تضمین کننده پاسخ خطی سازه باشد، انتخاب می‌گردد. سپس با استفاده از یک ضریب ثابت در هر گام، شدت لرزه‌ای افزایش می‌یابد. ضریب مقیاس در هر گام با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$SF = \frac{PGA(i)}{PGA} \quad (1)$$

در این رابطه PGA برابر با بیشینه شتاب زمین و (i) برابر با مقدار در نظر گرفته شده برای شدت لرزه‌ای که در این مقاله مقادیر $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ در نظر گرفته شده است، می‌باشد.

هر کدام از منحنی‌های IDA مربوط به هر شتاب‌نگاشت بیان گر رفتار سازه تحت رکورد مشخصی از زلزله بوده و قابل تعمیم به همه رکوردها نمی‌باشد. در نتیجه، نمی‌تواند به تنهایی رفتار سازه را در زلزله احتمالی پیش‌بینی کند. از این‌رو، برای در برگرفتن محدوده کاملی از پاسخ سازه به تعداد کافی شتاب‌نگاشت نیاز است تا بتوان به برآورد درستی از رفتار سازه رسید که نتیجه آن به وجود آمدن دسته منحنی‌های IDA می‌باشد. برای کاهش پراکندگی اطلاعات و بررسی منحنی‌ها با این دید که سازه در هر سطحی از تقاضا چه پاسخی نشان می‌دهد، دستیابی به حالت کلی از رفتار سازه، خلاصه کردن

¹⁷- Scale Factor

استاندارد) نیز محاسبه نمود. میانگین μ و انحراف استاندارد σ جامعه نمونه برابر می‌باشد با:

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (4)$$

$$\zeta^2 = \ln [1 + \delta^2] \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5)$$

۳-۳- تحلیل شکنندگی

براساس تعاریف موجود در منحنی شکنندگی برای هر حالت خرابی S_i احتمال شرطی تجاوز خرابی ایجاد شده در فلر بیش از سطح خرابی معین S_i در یک سطح مشخص PGA است. این تعریف به صورت رابطه (۷) قابل بیان است:

$$P(S > s / PGA) = P(X > x_i / PGA) = 1 - \varphi \left[\frac{\ln(x_i) - \lambda}{\zeta} \right] \quad (6)$$

در رابطه (۶)، φ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد، x_i کران بالای ($I, II, III = i$) S_i می‌باشد.

۴-۳- منحنی شکنندگی ساده شده

برای کاربرد راحت، منحنی‌های شکنندگی، معمولاً به صورت توابع توزیع تجمعی لگاریتم نرمال^{۱۹} بیان می‌شوند. به این ترتیب، منحنی‌های شکنندگی تنها با دو پارامتر به صورت رابطه (۸) نشان داده می‌شوند:

$$F_A(a) = \int_0^a \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_A a} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(a) - \ln(m_a)}{\zeta_A} \right)^2 \right) da \quad (7)$$

که a متغیر تصادفی PGA است، m_a معادل میانگین A و ζ_A انحراف استاندارد لگاریتمی a می‌باشد.

معادله فوق می‌تواند به صورت تابع توزیع تجمعی

در ادامه هر مرحله به صورت مجزا توضیح داده می‌شود.

۳-۱- سطوح عملکرد

حالات حدی خرابی را می‌توان به صورتی در نظر گرفت که معرف یک نوع تغییرشکل در سازه باشند. در این مقاله، محاسبه مقادیر تابع احتمال برای هر سازه و در هریک از شدت‌های زلزله، به صورت گذشت دریفت حداکثر سازه از آستانه‌های تعریف شده در جدول ۳ C1-3 FEMA 356 [۱۵] می‌باشد، در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- سطوح عملکردی

| دریفت | سطح عملکرد |
|-------|------------------------------|
| ۰/۰۰۵ | قابلیت استفاده بی وقفه (I.O) |
| ۰/۰۱۵ | ایمنی جانی (L.S) |
| ۰/۰۲ | فرپوششی (C.P) |

۲-۳- ماتریس پاسخ

با انجام تحلیل‌های IDA و مقیاس رکورد زلزله به دفعات مشخص برای رسیدن به سطح خرابی تعیین شده و سپس استخراج پاسخ‌های سازه‌ای، ماتریس پاسخ به ابعاد «تعداد نگاشت‌ها»^{۱۶} تعداد سطوح IM مقیاس شده^{۱۷} تشکیل می‌شود (همانطور که قبل از بیان شده است در این مقاله شدت لرزه‌ای برابر با PGA و شاخص خسارت استخراج شده بیشینه جایه‌جایی نسبی می‌باشد). برای هر سطح در ماتریس (در سطح PGA یکسان)، پاسخ‌های سازه‌ای دارای توزیع لگاریتم نرمال با تابع چگالی احتمالاتی (PDF^{۱۸}) به شرح رابطه (۳) است:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_x x} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta_x} \right)^2 \right) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $0 \leq x < \infty$ و λ و ζ_x دو پارامتر توزیع لگاریتم نرمال متغیر تصادفی x هستند. آن‌ها را می‌توان از اطلاعات دو پارامتر توزیع نرمال (میانگین و انحراف

^{۱۹}- Lognormal CDF

^{۱۸}- Probability Distribution Function

در این پژوهش، آسیب‌پذیری لرزاگی یک نمونه فلر به طول ۴۶ متر واقع در استان خوزستان بررسی شده است که در ادامه مشخصات کلی آن ارائه می‌شود. فلر مورد نظر، یکی از تجهیزات واقع در کارخانه جداسازی نفت و گاز جنوب و شمال در میدان نفتی آزادگان جنوبی در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از غرب اهواز می‌باشد. در این فلر، دکل از نوع سه وجهی با ارتفاع ۴۶ متر می‌باشد که از دودکش با ارتفاع ۵۱ متر پشتیبانی می‌کند. ساختار دکل از برج‌های سه‌وجهی با قاب فولادی مهاربندی تشکیل شده است. شعاع سازه دکل در تراز ۳۴/۰ متر با شعاع ۴/۵ متر بوده و با شبیک یکنواخت تا تراز ۲/۷۵ متر ادامه دارد و از تراز ۳۴ متر تا تراز ۴۶ متر این شعاع ثابت می‌باشد. قاب‌های فولادی مهاربندی در ترازهای ارتفاعی +۸، +۲۲، +۲۸، +۳۴، +۴۲ و +۴۶ در نظر گرفته شده است. دودکش در این ارتفاعات در جهت افقی مهار می‌شود و در جهت قائم آزاد است.

در این مقاله، فلر با نام FL-01-3S-H51 معرفی شده است. در این نامگذاری FL مخفف مشعل، ۰۱ شماره مطالعه موردنی، S۳ نمایانگر سه وجهی بودن آن، H51 ارتفاع فلر را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات مقاطع و مصالح به کار رفته جهت مدل‌سازی به ترتیب در جداول ۲ و ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است.

براساس اطلاعات و توضیحات ارائه شده در بالا در خصوص مشخصات هندسی و مصالح، مدل‌سازی فلر در نرم‌افزار SAP2000 Ver14.2.2 صورت گرفت.

نرمال استاندارد با آرگومان ζ به شرح رابطه (۹) باشد:

$$F_A(a) = \varphi[z] \quad (8)$$

که در آن z متغیر نرمال استاندارد است، که به صورت $z = (\ln(a) - \ln(m_a)) / \zeta_A$ تعریف شده است. در منحنی شکنندگی، برای احتمال شکنندگی $F_A(a)$ در سطح PGA از a ، متغیر نرمال مربوطه را می‌توان با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه کرد:

$$z = \varphi^{-1}[F_A(a)] \quad (9)$$

که در آن (۰)^{-۱} φ تابع معکوس توزیع تجمعی نرمال استاندارد است.

با توجه به تعریف متغیر نرمال استاندارد، برای منحنی شکنندگی با توزیع لوگاریتم نرمال، رابطه ζ نسبت به $\ln(a)$ خطی است. عرض از مبدأ و شبی رابطه خطی به ترتیب $\ln(m_a)$ و ζ_A خواهد بود. بنابراین، برای برآش منحنی شکنندگی در عملکرد توزیع تجمعی نرمال، می‌توان از ایده فوق استفاده کرد. ابتدا، برای هر منحنی شکنندگی، متغیرهای نرمال استاندارد Z مرتبط با احتمال شکنندگی برای تمامی سطوح PGA توسط معادله (۹) محاسبه می‌شود. سپس رابطه متغیر نرمال استاندارد Z به ترتیب با آن ایجاد می‌شود تا مقادیر $\ln(m_a)$ و ζ_A استخراج شود [۱۶].

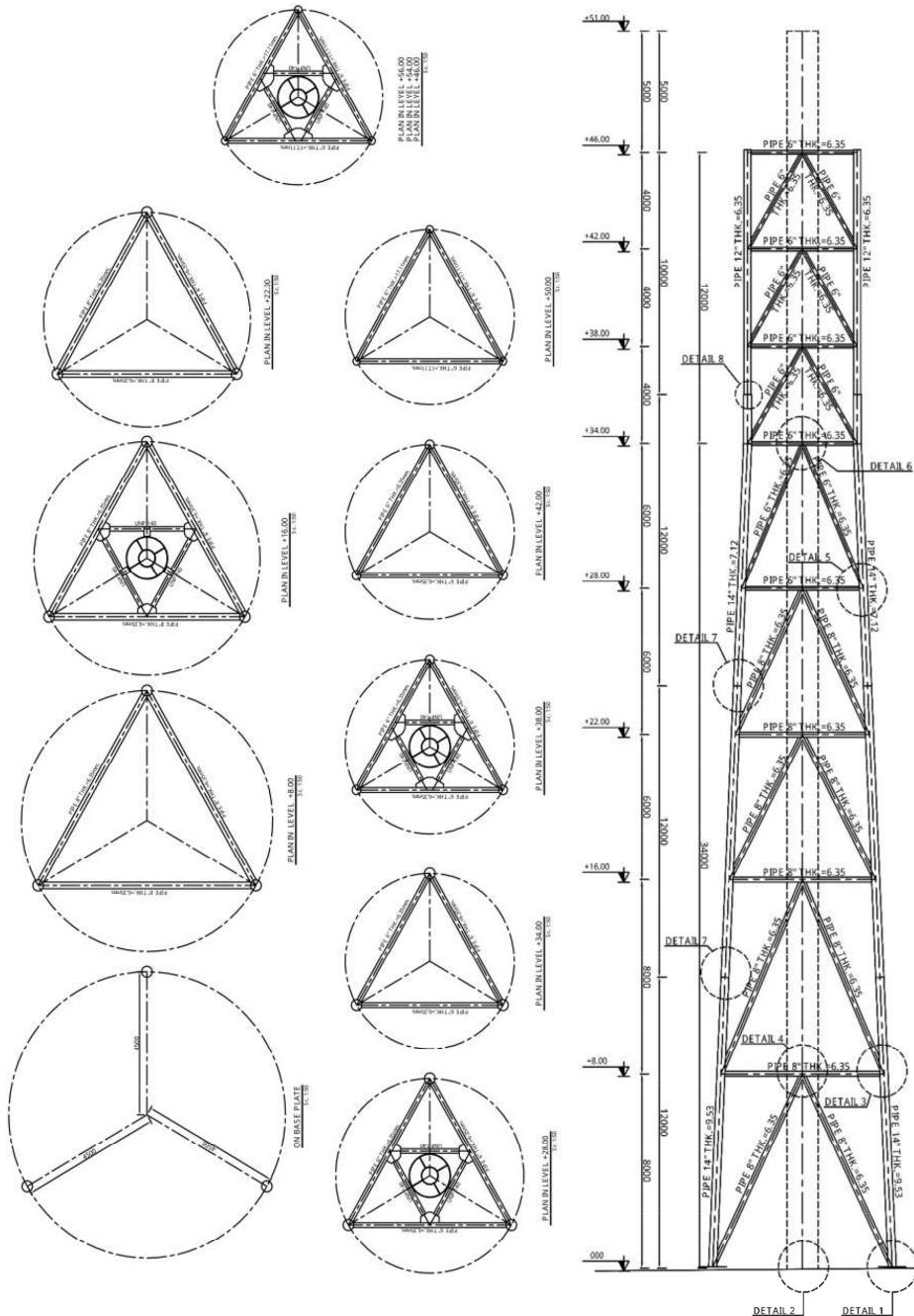
۴- معرفی مدل، مدل‌سازی و شرح مراحل

جدول ۲- مشخصات مقاطع

| عضو | قطع | قطر (میلی‌متر) | ضخامت (میلی‌متر) |
|---------------|----------|----------------|------------------|
| ستون | Pipe-14" | ۳۵۵/۶ | ۹/۵۳ |
| | Pipe-14" | ۳۵۵/۶ | ۷/۱۲ |
| | Pipe-14" | ۳۵۵/۶ | ۶/۳۵ |
| | Pipe-12" | ۳۲۳/۸ | ۶/۳۵ |
| تیر و مهاربند | Pipe-8" | ۲۱۹/۱ | ۶/۳۵ |
| | Pipe-6" | ۱۶۸ | ۶/۳۵ |

جدول ۳- مشخصات مصالح

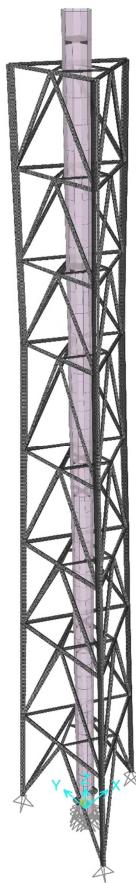
| وزن مخصوص (kg/m ³) | تش نهایی (kg/m ²) | تش تسليم (kg/m ²) | ضریب پواسون | مدول الاستیستیت (kg/m ²) | نوع مصالح | عضو |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|---|---------------|--|
| ۷۸۴۹ | ۴۱۵..... | ۲۴..... | ۰/۳ | $۲/۰۳۸ \times 10^{10}$ | ASTM 106 Gr B | المان پوسته (دودکش) |
| ۷۸۴۹ | ۳۶۷۰۹۷۸۰ | ۲۴۴۷۳۱۸۹ | ۰/۳ | $۲/۰۳۸ \times 10^{10}$ | ST-37 | المان با مقاطع لوله (دکل خرپایی) |



شکل ۲- ترازهای ارتفاعی و مقاطع استفاده شده برای فلر FL-01-3S-H5

وجود ندارد، بنابراین مفاصل پلاستیک سازه به صورت محوری در مرکز ستون‌ها و مهاربندی‌ها براساس آیین‌نامه FEMA 356 [۱۵] انتخاب شده است. در شکل ۳، نمای کلی از مدل اجزای محدود سازه نشان داده شده است.

با توجه به ماهیت خرپایی سازه و با توجه به مفصلی بودن اتصالات تیرها و مهاربندها و نوع سیستم خرپایی به کار رفته که منجر به ایجاد لنگر کم در ستون‌ها می‌شود، امکان تشکیل مفاصل پلاستیک خمی در اعضا



شکل ۳- سازه مدل شده در نرم‌افزار SAP2000

- دمای بھربرداری مشعل،
- بار باد،
- بار لرزه‌ای.

بار مرده شامل وزن خود سازه و سایر اجزای ثابت و دائمی است. بار مرده خود سازه توسط نرم‌افزار به سازه اعمال می‌شود و سایر اجزای ثابت و متعلقات شامل بار نردبان‌های دسترسی و سکوهای میان تراز و وزن سر مشعل به سازه تخصیص داده شده است. تغییر دمای محیط ± 30 درجه سانتیگراد به سازه اختصاص داده شده است. تغییرات دمایی ناشی از عملکرد مشعل شامل حرارت از 250 درجه سانتیگراد در بالای شعله به 100

شایان ذکر است که کلیه اتصالات اعضا به یکدیگر به صورت مفصلی بوده و همچنین اتصال دودکش و سازه دکل به زمین نیز به صورت مفصلی مدل‌سازی شده است. بارهای واردہ به دکل براساس ضوابط و ضرایب عنوان شده در ASCE 7-10 [۱۷] و مبانی ارائه شده در مشخصات فنی سازنده تجهیز به شرح ذیل در مدل‌سازی لحاظ شده است. بارهای اعمال شده جهت طراحی به دکل‌ها عبارتنداز:

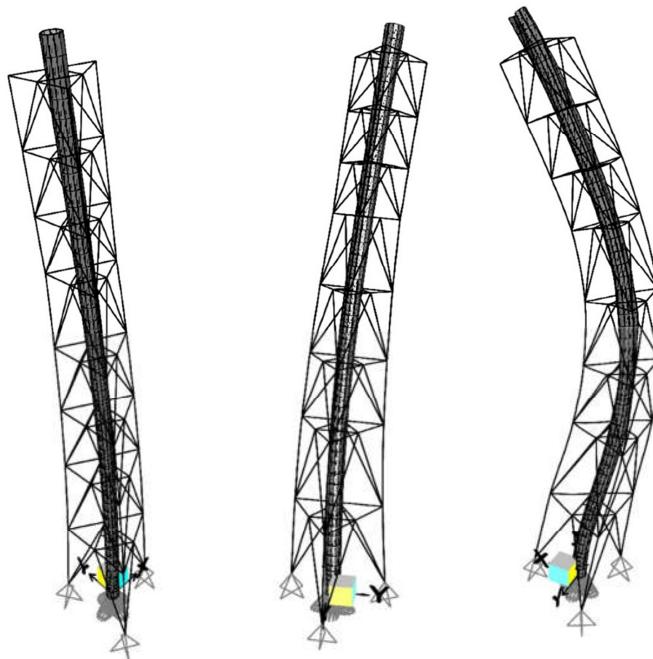
- بار مرده،
- بار زنده،
- دمای محیط،

سازه برای مودهای ابتدایی به شرح جدول ۴ و شکل ۴ حاصل شده است.

درجه سانتیگراد در پایه به سازه اختصاص داده شده است. بار باد براساس ASCE07-10 بخش ۲۹/۵ برای طراحی سازه استفاده شده است [۱۷]. دوره تناوب‌های تحلیلی

جدول ۴- مودهای تحلیلی سازه FL-01-3S-H51 مدل‌سازی شده

| شماره مود | دوره تناوب | Ux | Uy | Uz |
|-----------|------------|---------|---------|----------|
| ۱ | ۰/۸۱۹۱ | ۰/۴۵۴۱ | ۰/۱۳۷۹ | ۱/۲۱۶۰-۶ |
| ۲ | ۰/۸۱۸۱ | ۰/۱۳۸ | ۰/۴۵۴۱ | ۰/۰۰۰۱۲۳ |
| ۳ | ۰/۲۵۶ | ۰/۰۰۵۲ | ۰/۰۰۰۹ | ۷/۷۹۳۰-۹ |
| ۴ | ۰/۲۲۴ | ۰/۰۰۶۹ | ۰/۲۴۹ | ۰/۰۰۰۴۳۹ |
| ۵ | ۰/۲۲۲ | ۰/۲۴۶۶ | ۰/۰۰۶۲ | ۰/۰۰۰۰۲۹ |
| ۶ | ۰/۱۳۲ | ۲/۹۰-۱۳ | ۶/۳۰-۱۱ | ۰/۰۰۲۴۷۷ |



شکل ۴- شکل سه مود اول ارتعاش برای فلر FL-01-3S-H51

می‌گرددند. اما در تحلیل‌های IDA نتایج بررسی‌های صورت گرفته نشان دهنده آن است که نیازی به حساسیت بالا در انتخاب نگاشت‌ها براساس فاصله و بزرگا نمی‌باشد و تفاوت چندانی در نتایج حاصل ایجاد نمی‌گردد [۱۸]. طبق توصیه کرنل، استفاده از ۱۰ تا ۲۰ رکورد زلزله معمولاً از دقت قابل قبولی برای برآورد تقاضای آسیب برخوردار است [۱۴]. در این مقاله، ۱۰ شتاب‌نگاشت از بانک داده‌های زلزله PEER استخراج

۵- انتخاب مجموعه نگاشت

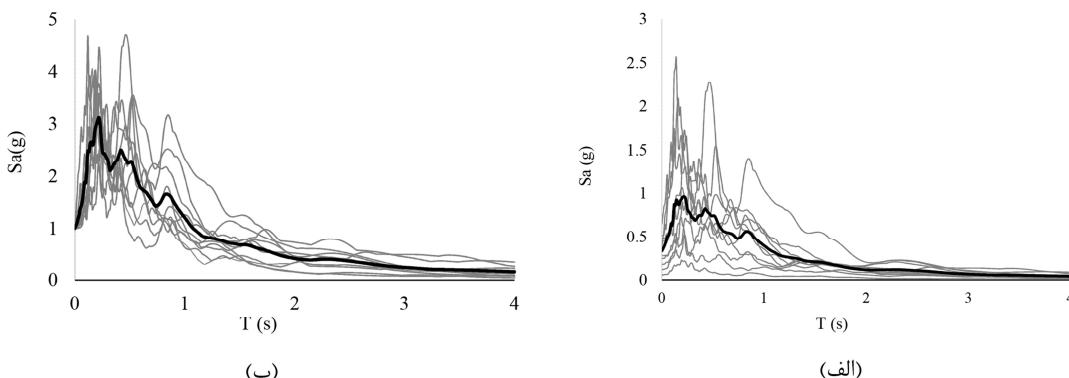
در بسیاری از مطالعات لرزمای، انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها براساس مشخصه‌های منطقه مورد بررسی همچون فاصله از گسل، بزرگا، نوع خاک منطقه و سایر مشخصات مربوط به منبع رویداد صورت می‌گیرد تا نگاشت‌های منتخب، بیشترین شباهت را به نگاشت‌های محتمل منطقه داشته باشند. پس از انتخاب نگاشت‌ها، جهت انجام مطالعات لرزمای به سطح مورد نظر، مقیاس

عددی جنینگز [۲۰] به صورت مقیاس شده و مقیاس نشده در ۰ شکل ۵ نشان داده شده است.

گردید و مشخصات آنها در جدول ۵ شان داده شده است [۱۹]. طیف پاسخ نگاشتهای مذکور با استفاده از روش

جدول ۵- مجموعه نگاشتهای منتخب [۱۹]

| شماره | نام رویداد | ایستگاه | سال | PGA | بزرگا |
|-------|-----------------|----------------|------|--------|-------|
| ۱ | Imperial Valley | Plaster City | ۱۹۷۹ | ۰/۰۵۷ | ۶/۵ |
| ۲ | Loma Prieta | Hollister Diff | ۱۹۸۹ | ۰/۲۷۸۵ | ۶/۹ |
| ۳ | Loma Prieta | Anderson | ۱۹۸۹ | ۰/۲۴۶ | ۶/۹ |
| ۴ | Loma Prieta | Coyote Lake | ۱۹۸۹ | ۰/۱۷۹ | ۶/۹ |
| ۵ | Loma Prieta | WAHO (000) | ۱۹۸۹ | ۰/۳۷۳ | ۶/۹ |
| ۶ | Loma Prieta | WAHO (090) | ۱۹۹۰ | ۰/۶۵۴ | ۶/۹ |
| ۷ | Beverly Hills | Northridge | ۱۹۹۴ | ۰/۴۴۳۴ | ۶/۷ |
| ۸ | Nishi-Akashi | Kobe | ۱۹۹۵ | ۰/۴۸۲۲ | ۶/۹ |
| ۹ | Abbar | Manjil | ۱۹۹۰ | ۰/۵۱۴۵ | ۷/۴ |
| ۱۰ | Imperial Valley | El Centro | ۱۹۷۹ | ۰/۱۱۷ | ۶/۵ |



شکل ۵- طیف پاسخ شبه شتابنگاشتهای انتخاب شده به صورت (الف) مقیاس نشده و (ب) مقیاس شده با نسبت میرایی ۵٪

به صورت بیشینه جابه جایی نسبی در برابر بیشینه شتاب زمین رسم شده است.

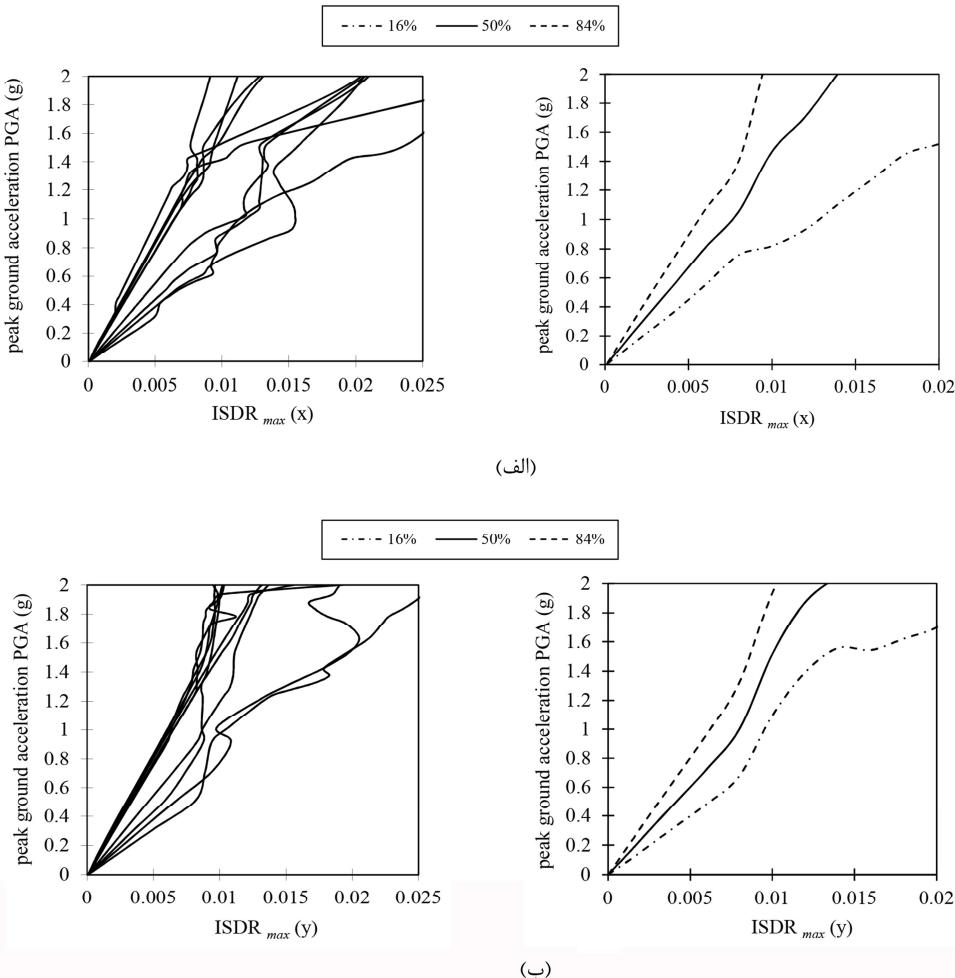
منحنی های شکنندگی ابزاری برای تعیین احتمالاتی آسیب پذیری ناشی از زلزله می باشند. با استفاده از روابط و توضیحات ارائه شده در بخش دوم و سه سطح عملکرد، قابلیت استفاده بی وقفه (I.O) و اینمنی جانی (L.S) و فروریزش (C.P) مندرج در دستورالعمل FEMA356 [۱۵] برای سازه مورد بررسی به منظور ارزیابی احتمال خرایی در هر شدت از زلزله، میزان پارامترهای توزیع احتمالاتی، براساس برآش توزیع

۶- انجام تحلیل های IDA و شرح نتایج حاصل

در این مقاله، رفتار سازه تحت اثر ۱۰ رکورد مختلف که مشخصات آنها ارائه شده است برای هر دو راستای طولی و عرضی به صورت مجزا تحت تحلیل دینامیکی افزایشی بررسی می شود. اطلاعات به دست آمده از نتایج تحلیل ها برای هر شتابنگاشت که به صورت نقاط گسسته مربوط به اندازه خسارت سازه ای (DM) در برابر شدت زلزله های مقیاس شده (IM) می باشد، به صورت منحنی های IDA ترسیم می گردد. در شکل ۶ این نتایج

احتمال متناظر با وقوع سه سطح عملکردی به دست آمده برای فلر مورد مطالعه، می‌توانند معیاری برای مقایسه عملکرد سازه‌های مشابه باشند.

لگاریتم نرمال به داده‌ها به دست آمده است. پارامترهای شکنندگی (CDF) ارائه شده‌اند و نهایتاً منحنی‌های شکنندگی برای سه حالت خسارت در دو جهت طولی و عرضی در جداول ۶ و ۷ و شکل ۷ ارائه شده است. مقادیر



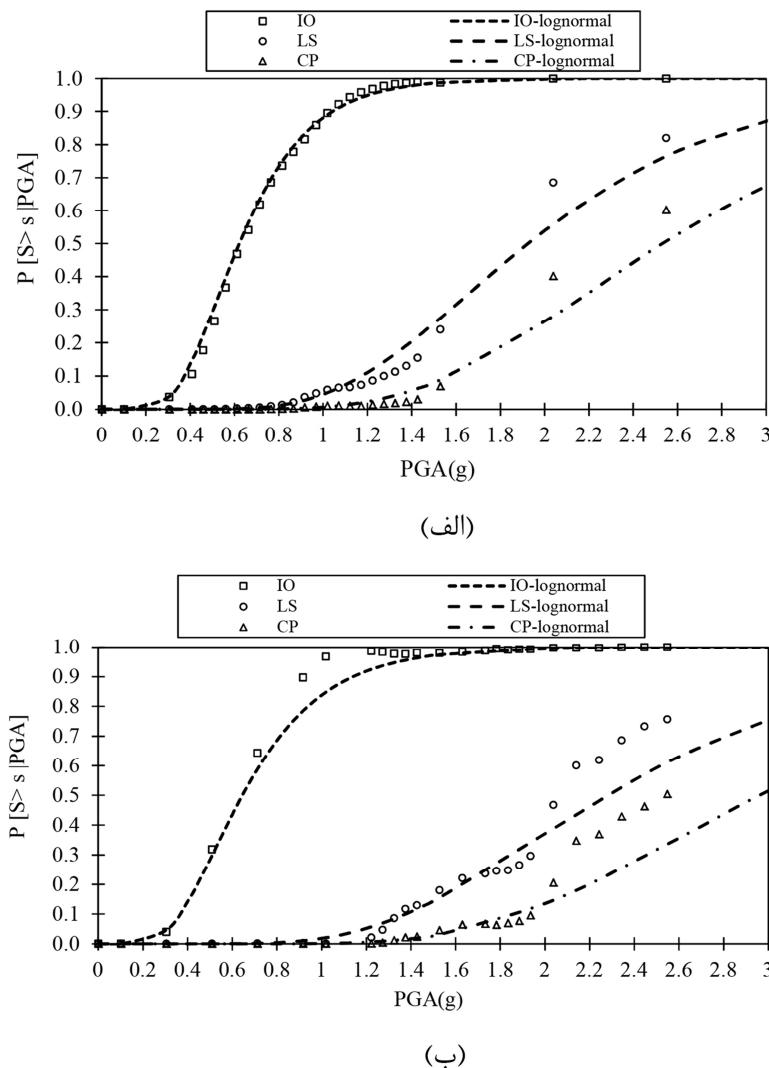
شکل ۶- منحنی‌های IDA برای فلر FL-01-3S-H51 در جهت (الف) طولی و (ب) عرضی و منحنی خلاصه شده آن

جدول ۶- پارامترهای شکنندگی (CDF lognormal) فلر FL-01-3S-H51 در جهت طولی

| انحراف معیار | میانگین | سطح عملکرد |
|--------------|---------|------------|
| ۰/۴۰۱۷ | ۰/۶۲۲۱ | I.O |
| ۰/۳۸۶۶ | ۱/۹۲۷۳ | L.S |
| ۰/۳۷۳۸ | ۲/۵۳۲۷ | C.P |

جدول ۷- پارامترهای شکنندگی (CDF lognormal) فلر FL-01-3S-H51 در جهت عرضی

| انحراف معیار | میانگین | سطح عملکرد |
|--------------|---------|------------|
| ۰/۴۴۵۰۳ | ۰/۶۴۵۰۹ | I.O |
| ۰/۳۹۳۲۵ | ۲/۲۷۸۶ | L.S |
| ۰/۳۵۴۷۱ | ۲/۹۶۰۶ | C.P |



شکل ۷- منحنی شکنندگی فلر FL-01-3S-H51 در جهت (الف) طولی و (ب) عرضی

شده از سایت PEER به دست آمده است. EDP انتخاب شده برای سازه فلر، بیشینه جابه جایی نسبی و PGA نیز به عنوان IM انتخاب گردید. معیارهای شکست براساس سه سطح IO, LS و CP مندرج در دستورالعمل FEMA356 انتخاب شدند.

مروری بر نتایج، نشان از امنیت لرزه‌ای این نوع سازه‌ها با توجه به مقادیر احتمالاتی بسیار کم (برای حالات حدی LS و CP) محدوده زلزله‌ها تا $g = 0.8$ دارد، در حالی که زلزله حاکم منطقه $g = 0.35$ می‌باشد و احتمال بسیار پایین فراتر رفتن از حالت حدی IO برای محدوده زلزله‌های تا $g = 0.4$ مشاهده می‌گردد.

۷-نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارزیابی لرزه‌ای احتمالاتی تجهیز فلر مهار شده با سازه پشتیبان پرداخته شده است. بدین منظور، منحنی شکنندگی به روش احتمالاتی برآورد شده است و پارامترهای مربوطه نیز ارائه گردید. سازه فلر مورد مطالعه، واقع در میدان نفتی آزادگان جنوبی می‌باشد و دارای دکل سه وجهی با ارتفاع ۴۶ متر که از مشعل با ارتفاع ۵۱ متر محافظت می‌کند. توزیع شاخص خرایی در هر شدت زلزله با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت اثر ۱۰ شتابنگاشت استخراج

نمی‌باشد، اما همچنان به کارگیری ضوابط لرزمای برای حمل زلزله‌های نادر توصیه می‌شود. در انتهای لزوم ارزیابی‌های لرزمای برای انواع سازه‌های فلر و مقایسه نتایج و پارامترهای شکنندگی به دست آمده توصیه می‌گردد.

نتیجه حاصل شده با توجه به حاکم بودن بار باد برای طراحی این سازه‌ها و با توجه به گزارش‌های موجود مطابقت دارد و لذا می‌توان گفت نیاز لرزمای وارد به این سازه‌ها در محدوده شدت‌های متعارف لرزمای قابل توجه

مراجع

- [1] Di Sarno, L., & Karagiannakis, G. (2020). "On the seismic fragility of pipe rack—piping systems considering soil–structure interaction", *Bulletin of earthquake engineering*, 1-35.
- [2] Caputo, A.C., & Vigna, A. (2017) "Numerical Simulation of Seismic Risk and Loss Propagation Effects in Process Plants: An Oil Refinery Case Study", In *ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference*, 8, <https://doi.org/10.1115/PVP2017-65465>.
- [3] Eidering, J. (2009). "Fragility of non-structural components for FEMA benefit cost analysis", *G&E Engineering Systems Inc*, 480-490
- [4] Danesi, R. J. (2015). *Seismic risk of industrial plants: assessment of a petrochemical piperack using incremental dynamic analysis* (Doctoral dissertation, MSc Thesis Rose School. Pavia, Italy).
- [5] Bursi, O. S., Paolacci, F., & Reza, M. S. (2015). "Performance-based analysis of coupled support structures and piping systems subject to seismic loading", In *Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 57034, p. V008T08A021). American Society of Mechanical Engineers.
- [6] S. D. C. E. A., & D. N. (2005). *Flaring at oil refineries in south Durban and Denmark*. ISBN 0-620-34209-9.
- [7] World Bank Group. (2004). *A Voluntary Standard for Global Gas Flaring and Venting Reduction*, Public Disclosure Authorized.
- [8] Standard, A. P. I. (2014). *Pressure-relieving and Depressuring Systems*, API Publishing Services, Texas A&M University/5912186001.
- [9] Sabry, H. (2017). "Integrity of LNG flare systems", In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. OnePetro, <https://doi.org/10.2118/188307-MS>.
- [10] Papas, M., Smith, S., Zink, D., & Parfreeman, N. (2010). "Principal of Flaring Combustion and Ways to Minimise Emissions and Smoke-Design and Case Study of a New Air-Injection System for Upgrading Existing Flares into Smokeless Flares", In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, <https://doi.org/10.2118/134067-MS>.
- [11] Akeredolu, F. A., & Sonibare, J. A. (2004). "A review of the usefulness of gas flares in air pollution control", *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 15(6), 574-583.
- [12] Krausmann, E., Cruz, A. M., & Affeltranger, B. (2010). "The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(2), 242-248.
- [13] Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). "Incremental dynamic analysis", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 491-514.
- [14] Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). *Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis*, Doctoral dissertation, Stanford University, 1-172.
- [15] Prestandard, F. E. M. A. (2000). commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356). Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7, 2.
- [16] Chiou, J. S., Chiang, C. H., Yang, H. H., & Hsu, S. Y. (2011). "Developing fragility curves for a pile-supported wharf", *Soil dynamics and earthquake engineering*, 31(5-6), 830-840.
- [17] No, E. (2013). 2010 Edition of ASCE 7 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. www.asce.org/sei/errata.
- [18] Iervolino, I., & Cornell, C. A. (2005). "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures", *Earthquake Spectra*, 21(3), 685-713.
- [19] Ancheta, T., Bozorgnia, Y., Darragh, R., Silva, W. J., Chiou, B., Stewart, J. P., ... & Atkinson, G. M. (2012). "PEER NGA-West2 database: A database of ground motions recorded in shallow crustal earthquakes in active tectonic regions", In *Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering*. [Https://Ngawest2.Berkeley.Edu/Site](https://Ngawest2.Berkeley.Edu/Site).
- [20] Chopra, A. K. (2012) "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering", *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, ISBN-10: 0134555120, ISBN-13: 978-0134555126.