

تعیین معیارهای شدت زلزله‌ی بهینه جهت تخمین پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فولادی با شکل پذیر متوسط تحت زلزله‌های نزدیک گسل

سیما اصغرزاد دانش، جواد کاتبی *

۱- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه

تبریز simadanesh2024@gmail.com

۲- دانشیار گروه سازه، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز jkatebi@tabrizu.ac.ir

خلاصه

در راستای مطالعه‌ی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها یک معیار برای شدت زلزله مورد نیاز است که همبستگی بالایی با پاسخ سازه‌ها داشته باشد و بتوان با سطح اطمینان بالایی با استفاده از احتمال شدت‌های مختلف زلزله احتمال پاسخ سازه‌ها را بررسی نمود. معیارهای شدت زلزله موضوع تحقیقات بی شماری بوده است. یکی از معیارهای پرکاربرد، پاسخ شتاب الاستیک در پریود پایه‌ی سازه ($S_a(T_1)$) می‌باشد. این معیار در تخمین رفتار غیر الاستیک سازه‌ها بیش تخمینی دارد. به تدریج محققین مختصات مختلفی از پاسخ طیفی سازه‌ها را در بیان معیار شدت به کار گرفتند. همچنین با استفاده از معیار شدت $S_a(T_1)$ معیار شدت‌های دو مؤلفه‌ای را مطرح کردند. در این مقاله ۱۱ معیار شدت مختلف مبتنی بر مختصات مختلفی از رکوردهای زلزله و پاسخ‌های طیفی سازه‌ها و نیز سرعت افزایشی رکورد زلزله با استفاده از دو شاخص آماری کارایی و کفایت مقایسه شدند. جهت بررسی رفتار خطی و غیر خطی سازه‌ها از دو سازه‌ی ۴ و ۱۳ طبقه با ویژگی قاب خمشی متوسط استفاده شد و تحلیل استاتیکی پوش آور و تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی و IDA در پلتفرم opensees انجام گرفت. با استفاده از نتایج تحلیل IDA سطوح شکنندگی با استفاده از معیار شدت $S_a(T_1)$ ، $S_a(T_1) / DSI$ ، $S_a(T_1)$ رسم شد.

کلمات کلیدی: معیار شدت زلزله، $S_a(T_1)$ ، پاسخ طیفی سازه‌ها، قاب خمشی متوسط، تحلیل IDA، سطوح شکنندگی

۱. مقدمه

بزرگای زلزله بیانگر میزان انرژی آزاد شده از زلزله است. اگر چه این مشخصه اندازه‌ی زلزله را بیان می‌کند ولی جهت توصیف شدت زلزله که در مناطق مختلف مشاهده می‌شود کافی نیست. شدت زلزله پتانسیل تخریب زلزله در یک منطقه را توصیف می‌کند. برای یک زلزله‌ی یکسان، مقادیر شدت در نواحی مختلف متفاوت است [۱]. جهت مطالعه‌ی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، ویژگی‌های کمی از رکوردهای زلزله که بیانگر شدت زلزله باشند مورد توجه پژوهشگران بی شماری بوده است. از اولین معیارهایی که جهت بیان شدت زلزله به کار رفته (IMs) مقدار شتاب بیشینه‌ی رکورد زلزله (PGA) می‌باشد. به تدریج با محاسبه‌ی طیف‌های پاسخ سازه، پاسخ شتاب الاستیک در پریود پایه‌ی سازه

($Sa(T_1)$)، برای سیستم تک درجه آزاد به عنوان معیار شدت زلزله به کار رفت. با افزایش تحقیقات در این زمینه، مختصات‌های مختلفی از شتاب طیفی استفاده گردید. Eads و همکاران [۲] جهت در نظر گرفتن اثر موده‌های بالاتر سازه $Sa(avg)$ را مطرح کردند. این معیار شدت بیانگر میانگین هندسی چند مختصات از شتاب طیفی است. بر اساس طیف پاسخ سرعت Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۳] یک معیار شدت متشکل از چند مختصات ارائه کردند. آنان بر این باور بودند که طیف سرعت نسبت به دو طیف دیگر حساسیت بیشتری به پاسخ سازه دارد. Bradley در سال ۲۰۱۱ [۴] یک معیار شدت مبتنی بر پاسخ جابه جایی طیفی با عنوان DSI را مطرح نمود. در سال ۲۰۲۰ Amiri و Yakhchalian [۵] با استفاده از DSI و $Sa(T_1)$ یک معیار شدت دو مؤلفه ای را معرفی کردند. در سال ۲۰۱۹ Dávalos و Miranda [۶] مجموع مساحت سه پالس شتاب متوالی هم جهت را به عنوان یک معیار شدت (FIV_3) معرفی و همبستگی آن را با پاسخ سازه، تحت زلزله‌های منطقه‌ای نزدیک و دور گسل بررسی نمودند.

معیارهای شدت زلزله باید دو ویژگی مهم داشته باشند. اول معیار کارایی است. به این معنی که وقتی رکوردهای زلزله بر روی سازه‌هایی با ویژگی مشخص اثر مشابهی ایجاد می‌کنند، معیارهای شدت نظیر آن رکوردها مقادیر مشابه یا به عبارت دیگر کمترین پراکندگی را داشته باشند. در این صورت با سطح اطمینان بالایی می‌توان از آن معیار شدت جهت تخمین پاسخ سازه استفاده کرد. دومین ویژگی کفایت است. به این معنی که معیار شدت مورد نظر متأثر از ویژگی‌های زلزله از جمله بزرگا، فاصله‌ی منطقه از مبدأ زلزله، فاکتور مقیاس و سایر مشخصه‌ها نباشد. با وجود این ویژگی‌ها می‌توان در تحلیل‌های زلزله و پاسخ سازه‌ها از تعداد رکوردهای کمتری استفاده کرد و حجم محاسبات را به طور قابل توجهی کاهش داد [۶].

در راستای مطالعاتی که در خصوص معیارهای شدت زلزله انجام می‌گیرد آنالیز شکنندگی لرزه‌ای انجام می‌شود. این آنالیز یک روش احتمالاتی جهت ارزیابی آسیب سازه‌های مهندسی است که عدم قطعیت را در وقوع زلزله و مشخصات زمین لرزه در نظر می‌گیرد. در این روش یک معیار شدت با کارایی و کفایت بالا مورد نیاز است که بر اساس آن منحنی‌ها یا سطوح شکنندگی استخراج می‌شوند که احتمال آسیب سازه را با افزایش و کاهش معیار شدت زلزله نشان می‌دهند [۷].

در این تحقیق ۳۰ رکورد نزدیک گسل بر اساس فاصله از مبدأ (Rjb) و بزرگا (Mw) های مورد نظر (به ترتیب ۰-۱۲ کیلومتر و ۶۲-۷/۵) از سایت peer انتخاب و در دو گروه با پالس و بدون پالس مطالعه شدند. سازه‌ها در دو گروه ۴ و ۱۳ طبقه با ویژگی قاب خمشی متوسط طراحی شدند. ۱۱ معیار شدت انتخاب و پاسخ دینامیکی سازه‌ی نظیر این معیارها محاسبه شد. همبستگی معیارها و پاسخ‌های نظیر بر اساس شاخص‌های آماری تعیین و بر این اساس بهترین معیارها معرفی شدند.

۲. معرفی معیار شدت‌های زلزله مطالعه شده در این تحقیق

۱۱ معیار شدت زلزله در جدول ۱ قابل مشاهده است. ۳ معیار اول مربوط به مختصات رکورد زلزله، ۷ معیار بعدی مبتنی بر مختصات طیف پاسخ سازه و معیار آخر مبتنی بر سرعت افزایشی است. رکوردهای زلزله‌ی مورد مطالعه بر اساس نتایج تحلیل IDA برای ماگزیمم تغییر مکان بین طبقاتی ۲ درصد سازه مقیاس شدند و سپس مقادیر معیارهای شدت محاسبه شد. جهت محاسبه‌ی fiv_3 ، fc و α دو پارامتر مجهول است. با استفاده از روش بهینه سازی در جهت تولید fiv_3 با حداقل انحراف معیار، مقادیر به ترتیب f_n 0.5 و 0.3 انتخاب شد.

جدول ۱- معیارهای شدت زلزله‌ی مطالعه شده

PGA, PGV, PGD	reference
Sa(T_1), Sv(T_1), Sd(T_1)	

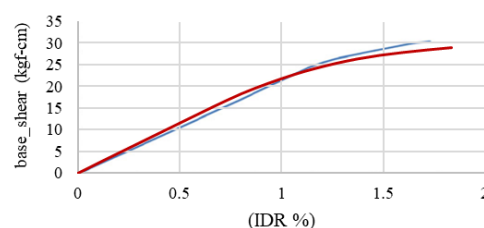
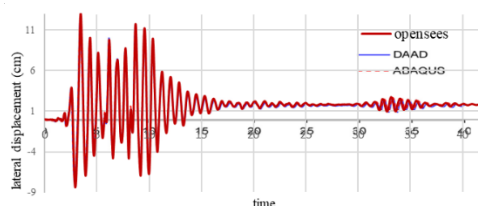
$Sa(avg) = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n Sa(a_j T_1)}$	$a_1 = 0.2$ $a_n = 3$	[۲]
$S_v(avg) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n [S_v(T_i)]}$	$S_v^{*123} = [S_v(T_1)]^{1/3} [S_v(T_2)]^{1/3} [S_v(T_3)]^{1/3}$	[۳]
$DSI = \int_2^5 S_d(T) dT$		[۴]
$(S_a(T_1), S_a(T_1)) / DSI$		
$fiv3 = \max\{V_{s,max1} + V_{s,max2} + V_{s,max3}, V_{s,min1} + V_{s,min2} + V_{s,min3} \}$	$V_s(t) = \left\{ \int_t^{t+\alpha T_n} \ddot{u}_{gf}(\tau) d\tau, \forall t < t_{end} - \alpha T_n \right\}$	[۶]

۳. مشخصات سازه‌ها

ابتدا طراحی سازه‌های فلزی ۴ و ۱۳ طبقه به صورت سه بعدی در نرم افزار Etabs با هندسه‌ی منظم و توزیع جرم متقارن انجام گرفت. فولاد ST37 به عنوان مصالح اجزا انتخاب شد. مقدار مدول الاستیسیته و تنش تسلیم به ترتیب برابر ۲۰۰۵۵/۶۶ و ۲۳۵/۳۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. بارهای المان‌های تیر به صورت خطی، برای المان‌های میانی در راستای NS برابر $DL=20$ KN/m و $LL=8$ KN/m و برای المان‌های کناری نصف این مقادیر در نظر گرفته شد. این مقادیر برای المان‌های پشت بام برابر $DL=20$ KN/m و $LL=6$ KN/m بود. با در نظر گرفتن قاب‌های خمشی متوسط برای سازه و اتصالات صلب، ابعاد تیرها به صورت IPE_x و ابعاد ستونها به صورت باکس‌های مربعی تعیین شد.

۴. مدل‌سازی دو بعدی در openses و انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی

در مدل‌سازی المان‌های تیر و ستون در openses از روش پلاستیسیته‌ی متمرکز استفاده شد. این روش با استفاده از مدل فنرهای اصلاح شده‌ی کراوینکلر مفاصل متمرکز را مدل می‌کند. بعد از رسیدن تغییرات سازه به ناحیه‌ی پلاستیسیته، فنرها فعال می‌شوند و رفتار غیر خطی سازه را نشان می‌دهند. این مدل زوال مقاومت و سختی را به دو روش هیستریک و غیر هیستریک در نظر می‌گیرد [۸]. مطابق شکل ۱ برای صحت‌سنجی مدل‌سازی المان‌ها به روش پلاستیسیته‌ی گسترده از تحقیق Patra و Bhattacharya در سال ۲۰۱۱ [۱۰] و به روش پلاستیسیته‌ی متمرکز از تحقیق Nguyen و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۱] استفاده شده است.

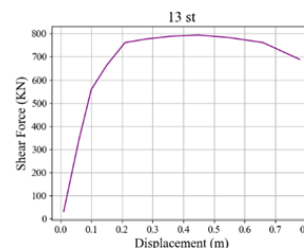
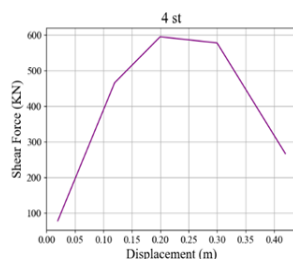


شکل ۱- سمت راست. تحلیل پوش آور برای قاب خمشی فولادی دو طبقه، مدلسازی المان‌ها به روش پلاستیسیته‌ی گسترده [۱۰].
سمت چپ تحلیل تاریخچه زمانی. پاسخ غیر خطی سازه در اثر زلزله San Fernando مدلسازی المان به روش پلاستیسیته‌ی متمرکز [۱۱]

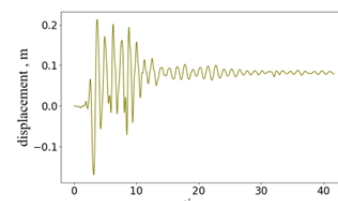
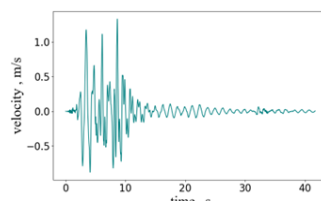
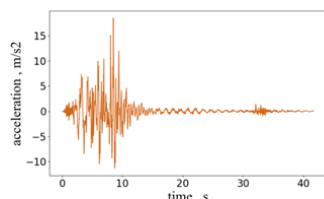
بعد از مدلسازی به روش پلاستیسیته‌ی متمرکز و نیز بارگذاری ثقیلی، مقادیر پریود محاسبه و نیز تحلیل‌های پوش آور، تاریخچه زمانی و IDA [۹] انجام گرفت. در جدول ۲ مقادیر پریودها، در شکل ۲ منحنی‌های برش پایه نتیجه تحلیل پوش آور، در شکل ۳ نمودارهای پاسخ شتاب، جابه جایی و سرعت نقطه‌ی کنترل برای سازه‌ی ۴ طبقه و زلزله San Fernando، در شکل‌های ۴ و ۵ نمودارهای حاصل از تحلیل IDA آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر پریود سازه‌ها

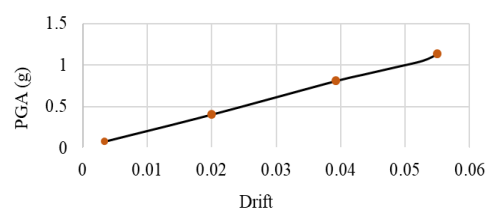
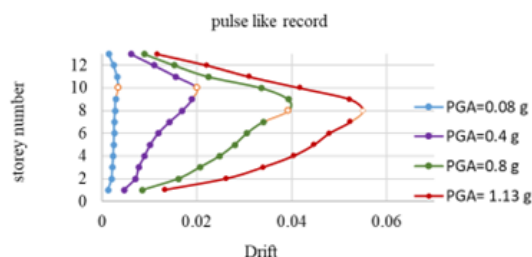
سازه	پریود مود اول (ثانیه)	پریود مود دوم (ثانیه)	پریود مود سوم (ثانیه)
۴ طبقه	۱/۲۲	۰/۴۱	۰/۲۲
۱۳ طبقه	۲/۲۶	۰/۸۴	۰/۴۸

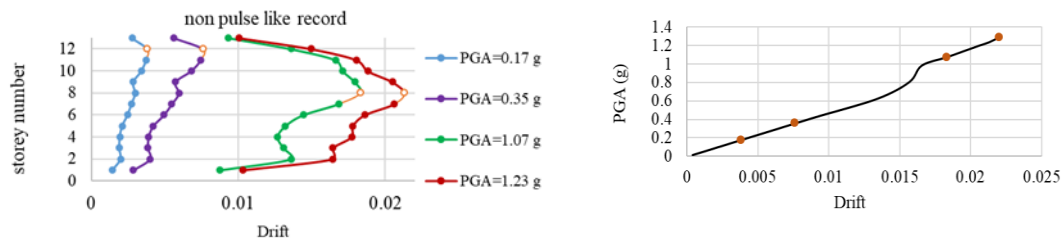


شکل ۲- نمودارهای برش پایه حاصل از تحلیل پوش آور به ترتیب از چپ برای سازه‌ی ۴ طبقه و ۱۳ طبقه

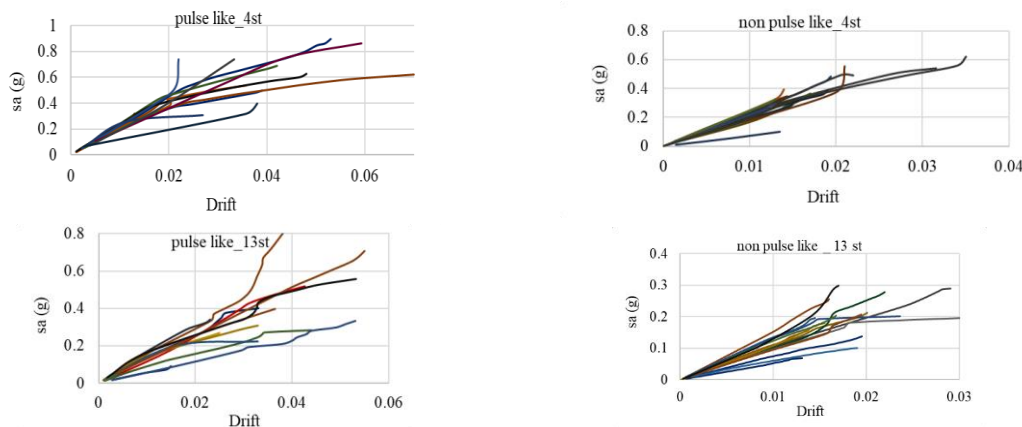


شکل ۳- به ترتیب از چپ نمودار تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابه جایی نقطه‌ی کنترل برای سازه‌ی ۴ طبقه تحت اثر زلزله San Fernando





شکل ۴-مقادیر تغییر مکان بین طبقه‌ای برای چهار شدت زلزله برای سازه ۱۳ طبقه و منحنی IDA نظیر به ترتیب از بالا برای رکورد با پالس و بدون پالس



شکل ۵-منحنی‌های IDA برای رکوردهای زلزله‌ای با پالس و بدون پالس به ترتیب از بالا برای سازه‌ی ۴ طبقه و ۱۳ طبقه

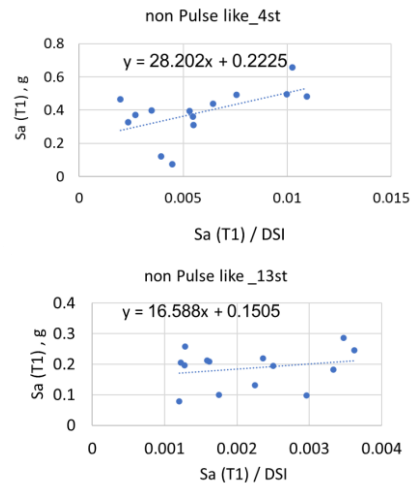
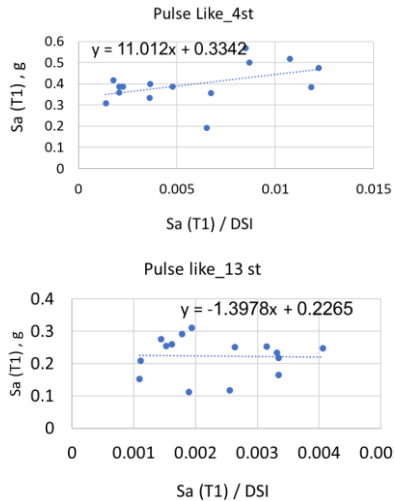
۵. کارایی و کفایت معیار شدت زلزله

جهت محاسبه‌ی کارایی برای معیار شدت‌های اسکالر از انحراف از استاندارد (σ) و برای دو مؤلفه‌ای از روابط ۱ و ۲ استفاده می‌شود به طوریکه ابتدا یک خط یا منحنی برازش بین دو معیار شدت برآورد می‌شود. با فرض رابطه‌ی خطی، معادله‌ی ۱ حاصل می‌شود: سپس انحراف از استاندارد به صورت معادله‌ی ۲ محاسبه می‌شود [۵]

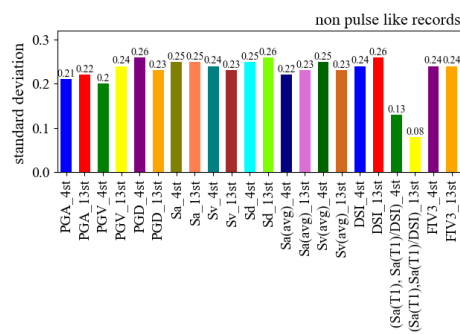
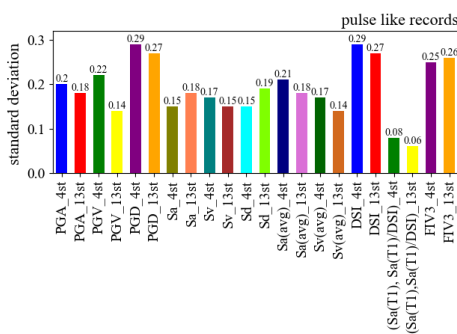
$$\mu = a_0 + a_1 \times \ln(IM_2) \quad (1)$$

$$\sigma(IM_1|IM_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(IM_1) - \mu)^2}{n-2}} \quad (2)$$

شکل ۶ جهت برآورد کارایی معیار شدت دو مؤلفه‌ای ($Sa(T_1)$, $Sa(T_1)/DSI$) رسم شده است. در شکل ۷ انحراف معیار کل معیارهای شدت مورد مطالعه، با تفکیک رکوردهای زلزله‌ای با پالس و بدون پالس، و دو سازه‌ی ۴ و ۱۳ طبقه، رسم شده است. معیارهای شدت زلزله برای رکوردهای با پالس کارایی بیشتری را نشان می‌دهند و معیار شدت دو مؤلفه‌ای ($Sa(T_1)$, $Sa(T_1)/DSI$) بالاترین کارایی را در بین کل معیارها دارد.



شکل ۶- نمودارهای خط برازش برای معیار شدت $(Sa(T_1), Sa(T_1)/DSI)$ جهت بدست آوردن مقادیر کارایی



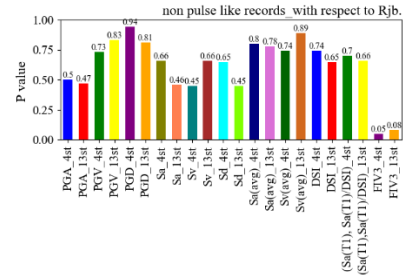
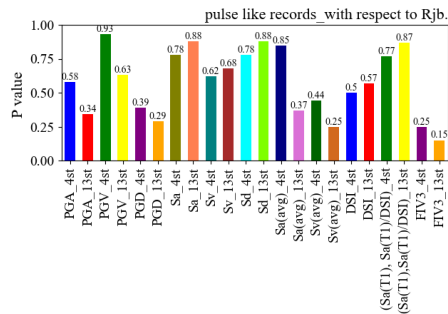
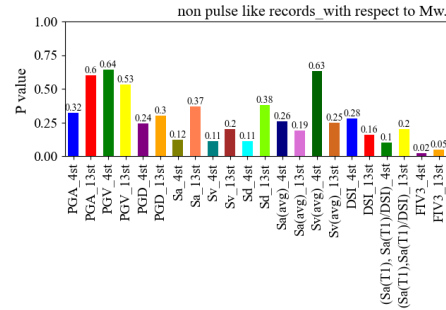
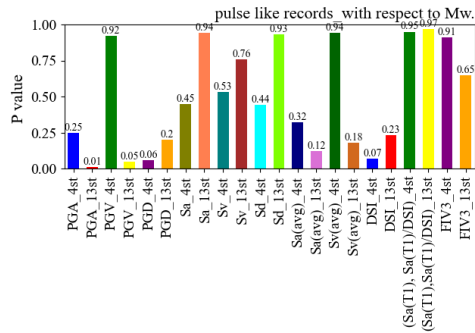
شکل ۷- نمودار مقادیر انحراف معیار به ترتیب از چپ برای رکوردهای زلزله‌ای با پالس و بدون پالس

جهت حصول کفایت، یک رگرسیون خطی ما بین معیار شدت و ویژگی رکورد زلزله انجام و از آزمون F-test جهت برآورد مقدار p value استفاده می‌شود. این مقدار اگر بزرگتر از ۰/۰۵ باشد به معنی کفایت معیار شدت است. در شکل ۸ مقادیر p value برای دو گروه رکورد زلزله و دو ویژگی Mw و Rjb نشان داده شده است. هر چه مقدار این عدد بزرگتر باشد بیانگر درصد بالاتری از کفایت است. مقادیر کفایت برای $(Sa(T_1), Sa(T_1)/DSI)$ نسبت به Mw و Rjb قابل قبول است. به این معنی که مقادیر این معیار شدت متأثر از ویژگی بزرگا و فاصله از مبدأ رکورد زلزله نیست.

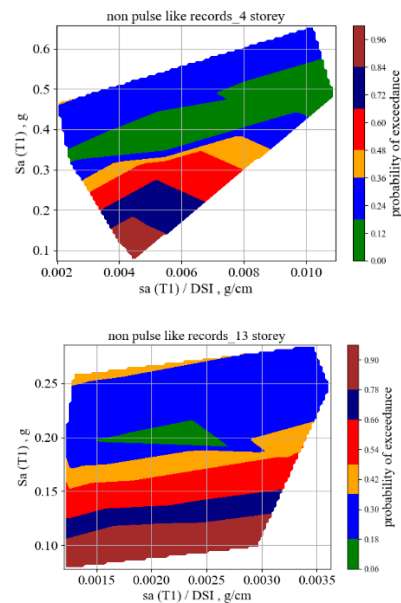
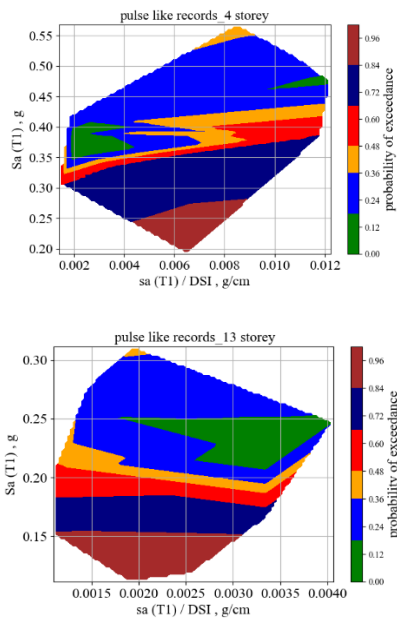
تابع شکنندگی برای معیار شدت دو مؤلفه‌ای از فرمول ۳ محاسبه شد [۵]

$$P(IM1_{LS} < im1 \mid LS, IM2 = im2) = \Phi \left(\frac{\ln(im1) - \mu_{\ln IM1_{LS} \mid IM2=im2}}{\sigma_{\ln IM1_{LS} \mid IM2}} \right) \quad (3)$$

μ و σ میانگین و انحراف از استاندارد $\ln IM1_{LS}$ هاست. شکل ۹ سطوح شکنندگی معیار شدت $(Sa(T_1), Sa(T_1)/DSI)$ را نشان می‌دهند. این سطوح احتمال فراگذشت سازه از ماگزیمم تغییر مکان بین طبقاتی ۰/۰۲ را نشان می‌دهند.



شکل ۸- مقادیر p value نسبت به Mw و Rjb



شکل ۹- سطوح شکنندگی برای معیار شدت $(Sa(T_1), Sa(T_1) / DSI)$

۶. نتیجه گیری

در این مقاله رفتار خطی و غیر خطی دو نوع سازه‌ی ۴ و ۱۳ طبقه با ویژگی قاب خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی از جمله تحلیل IDA مطالعه شد. رکوردهای زلزله برای ماگزیمم تغییر مکان بین طبقاتی ۲ درصد سازه مقیاس شدند و مقادیر ۱۱ معیار شدت زلزله محاسبه شد. بر اساس دو شاخص آماری کفایت و کارایی معیار شدت دو مؤلفه‌ای ($Sa(T_1)$, $Sa(T_1) / DSI$) به عنوان معیار شدت بهینه انتخاب شد. با استفاده از این معیار، آنالیز شکنندگی برای ماگزیمم تغییر مکان طبقاتی ۲ درصد سازه انجام شد و سطوح شکنندگی بدست آمد.

۷. منابع

- 1.Chen, X. (1995). Near field ground motion from the Landers earthquake. Thesis for the degree of civil engineer. *Califirnia institute of technology*.
2. Eads L, Miranda E, Lignos DG. Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment. *Earthquake Eng Struct Dyn* 2015;44(12):2057–73.
- 3.Zhang, Y., He, Z., & Yang, Y. (2018). A spectral-velocity-based combination-type earthquake intensity measure for super high-rise buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 643-677.
4. Bradley BA. Empirical equations for the prediction of displacement spectrum intensity and its correlation with other intensity measures. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2011;31(8):1182–91.
- 5.Amiri, M., & Yakhchalian, M. (2020, April). Performance of intensity measures for seismic collapse assessment of structures with vertical mass irregularity. In *Structures* (Vol. 24, pp. 728-741). Elsevier.
6. Dávalos, H., & Miranda, E. (2019). Filtered incremental velocity: A novel approach in intensity measures for seismic collapse estimation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(12), 1384-1405.
7. Yan, Y., Xia, Y., Yang, J., & Sun, L. (2022). Optimal selection of scalar and vector-valued seismic intensity measures based on Gaussian Process Regression. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 106961.
- 8.NIST GCR 17-917-46v2. Guidelines for Nonlinear Structural Analysis for Design of Buildings. Part IIa - Steel Moment Frames
- 9.He, X., & Lu, Z. (2019). Seismic fragility assessment of a super tall building with hybrid control strategy using IDA method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123, 278-291.
- 10.Patra, P., & Bhattacharya, B. (2011). An assessment of IS codal provisions for the design of low rise steel moment frames through incremental dynamic analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 581-602.
- 11.Nguyen, P. C., Tran, T. T., & Nghia-Nguyen, T. (2021). Nonlinear time-history earthquake analysis for steel frames. *Heliyon*, 7(8).