

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ظرفیت فروریزش سازه یکی از عوامل اصلی در محاسبه ریسک فروریزش است که در مهندسی بر اساس عملکرد به آن پرداخته می‌شود. محاسبه ظرفیت فروریزش سازه معمولاً با روش‌های زمان‌بر تحلیل‌های دینامیکی افزایشی انجام می‌شود اما در سال‌های اخیر روش‌های جایگزین بهینه بر مبنای استفاده از منحنی رفتار سازه ارائه شده است که در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر محاسبه ظرفیت فروریزش مورد تقاضای ساختگاه به صورتی که ریسک فروریزش سازه در محدوده آیین‌نامه باشد حائز اهمیت است. مخصوصاً در ساختگاه‌های حوزه نزدیک، به علت ویژگی‌های وجود پالس و جهت‌پذیری اهتمام ویژه‌ای به ظرفیت فروریزش تقاضای ساختگاه لازم است. با توجه به این که شکل‌پذیری سازه و نسبت پریرود پالس حوزه نزدیک به پریرود پایه سازه به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک شناخته شده‌اند، اثر این دو عامل به صورت عددی بر ظرفیت فروریزش سازه بررسی شده و سپس با توجه به آن ظرفیت فروریزش تقاضای ساختگاه در حوزه نزدیک برآورد گردیده است. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق افزایش ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک و در حوزه دور را با افزایش شکل‌پذیری نشان می‌دهد. همچنین کاهش ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک با افزایش نسبت پریرود پالس به پریرود پایه سازه مشاهده گردیده است. سپس محاسبه نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک به حوزه دور با لحاظ دو عامل ذکر شده صورت گرفته و ۷ نامیده شده است. از ۷ در برآورد تقاضای ظرفیت فروریزش ساختگاه حوزه نزدیک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای محاسبه ظرفیت فروریزش تقاضای ساختگاه استفاده از مقدار حد پایین نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک به حوزه دور که مربوط به شکل‌پذیری کمتر و نسبت پریرود پالس بالاتر می‌باشد به اندازه کافی محافظه کارانه بوده و افزایش تقاضای ساختگاه با افزایش این پارامتر شیب زیاد ندارد.

واژگان کلیدی: ریسک فروریزش، ظرفیت فروریزش، حوزه نزدیک، حوزه دور، پالس، جهت‌پذیری، شکل‌پذیری.

ارزیابی نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک گسل به حوزه دور و اثر آن بر ریسک فروریزش با لحاظ پریرود پالس و شکل‌پذیری

هما شانه‌ساززاده

دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

محسن تهرانی‌زاده (نویسنده مسئول)

استاد، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، tehranizadeh@aut.ac.ir

لیلا حاج نجفی

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست

۱- مقدمه

ریسک فروریزش به صورت صریح در طراحی ساختمان‌ها قرار گرفته‌اند و پیش از آن به صورت ضمنی ریسک فروریزش لحاظ می‌شد (Luco et al., 2007; ASCE, 2016; ATC, 2009; Kohrangi et al., 2021).

ریسک فروریزش دو مؤلفه‌ی اصلی دارد: خطر ساختگاه و

امروزه روش‌های تصمیم‌گیری بر اساس ریسک در حوزه‌های مختلف مورد توجه مهندسان قرار گرفته است (Ellingwood & Wen, 2005). در مهندسی بر اساس عملکرد یکی از موارد مهم مورد بحث، ارزیابی ریسک فروریزش می‌باشد و آیین‌نامه‌های طراحی نیز از سال ۲۰۱۲ در مسیر لحاظ

عبارت جهت‌پذیری پیش‌رونده معمولاً به صورت جهت‌پذیری نیز بیان می‌گردد و در مناطق نزدیک به گسل مورد توجه مهندسين می‌باشد. از آنجایی که تمایز رویدادهای نزدیک به گسل در پدیده جهت‌پذیری قابل توجه است، عبارت حوزه نزدیک به تاریخچه‌زمانی‌های دارای پالس و عبارت حوزه دور یا معمولی^۴ به موارد بدون پالس اطلاق می‌گردد (Abrahamson, 1998; Somerville et al., 1997; Cox & Ashford, 2002).

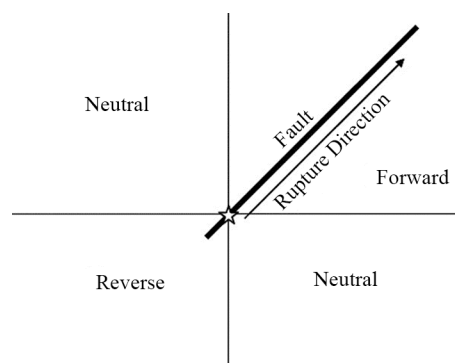
نگاشت سرعت دارای پالس تبعات ویژه‌ای ایجاد می‌کند و توجه ویژه‌ی مهندسان را در زمینه ظرفیت فروریزش به خود جلب کرده است (Baker, 2007; Baker & Cornell, 2008; Tehranizadeh & Shanesazzadeh, 2012, 2013). از این رو روش‌های تحلیل خطر احتمالاتی در حوزه نزدیک نیز ارتقا یافته است (Yousefi & Taghikhany, 2014; Shahi & Baker, 2014). در میان تحقیقاتی که به منحنی شکنندگی و توزیع ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک پرداخته‌اند (Liel et al., 2011; Haselton et al., 2011) در بعضی به تأثیر نسبت پریود پالس به پریود سازه، در ظرفیت فروریزش سازه تحت رکوردهای دارای پالس اشاره شده است اما معمولاً از روش‌های زمان‌بر تحلیل افزایش دینامیکی استفاده شده که فراهم کردن دید جامع در این زمینه را بسیار زمان‌بر و طولانی می‌کند؛ اما به‌طور کلی مشاهده شده است که روند و مقدار کاهش ظرفیت سازه در حوزه نزدیک گسل نسبت به حوزه دور با توجه به نسبت پریود پالس می‌تواند متفاوت باشد (Champion & Liel, 2012).

از سوی دیگر شکل‌پذیری سازه نقش مهمی در ظرفیت فروریزش سازه دارد. این موضوع در کدهای طراحی ساختمان نیز مدنظر قرار گرفته است (Haselton et al., 2011; Champion & Liel, 2012). اگر شکل‌پذیری سازه به اندازه کافی باشد کمک می‌کند تا سازه بتواند به ظرفیت فروریزش لازم برای ساختگاه مورد نظر برسد (Liel et al., 2011; Champion & Liel, 2012). شکل‌پذیری سازه می‌تواند توسط پارامترهای منحنی رفتار سازه تعریف شود (ATC, 2009).

تحقیقات پیشین نشان داده است که منحنی رفتار سازه، رابطه

ظرفیت فروریزش سازه. از بین روش‌های مختلف محاسبه ریسک فروریزش، استفاده از مشتق منحنی شکنندگی در انتگرال ریسک دقیق‌تر از استفاده از مشتق منحنی خطر می‌باشد (Judd & Charney, 2014). منحنی خطر ساختگاه که از محاسبات تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای (PSHA) محاسبه می‌شود و در انتگرال ریسک با منحنی ظرفیت فروریزش ترکیب شده و ریسک فروریزش را نتیجه می‌دهد (Luco et al., 2007). در ساختگاه‌های نزدیک به گسل با توجه به مکانیسم شکست و جهت انتشار موج و شکست گسل، سه دسته رویداد می‌تواند رخ دهد (شکل ۱) (Abrahamson, 1998; Somerville et al., 1997; Cox & Ashford, 2002):

۱. رویداد جهت‌پذیری پیش‌رونده^۱: هنگامی که جهت انتشار شکست در گسل هم جهت با انتشار انرژی زلزله باشد باعث ایجاد جبهه موج با انرژی زیاد می‌گردد. در این حالت انرژی زیاد به صورت موج با دامنه قابل توجه در ابتدای رکورد سرعت مشاهده می‌گردد.
۲. رویداد جهت‌پذیری پس‌رونده^۲: در این حالت جهت انتشار شکست بر خلاف جهت انتشار انرژی زلزله بوده و باعث ایجاد دامنه‌های قابل توجه در تاریخچه زمانی‌های زلزله نمی‌گردد.
۳. رویداد جهت‌پذیری خنثی^۳: در این حالت جهت انتشار شکست نسبت به انتشار انرژی زلزله خنثی بوده و رویدادهایی مشابه تاریخچه‌زمانی‌های دور از گسل مشاهده می‌گردد.



شکل (۱): انواع نواحی در پدیده جهت‌پذیری (Somerville et al., 1997).

(Champion & Liel, 2012).

$$\lambda(S_a > x) = \lambda(S_a > x | \text{no pulse}) + \lambda(S_a > x | \text{pulse}) \quad (1)$$

که در آن، $\lambda(S_a > x)$ خطر یا احتمال فراگذشت مقدار شتاب می‌باشد که معمولاً به صورت سالیانه بیان می‌شود. خطر ساختمانی در حوزه نزدیک به صورت ترکیبی از حالت وقوع پالس و بدون وقوع پالس طبق رابطه (۱) بیان می‌شود.

مقدار ریسک فروریزش از انتگرال ریسک محاسبه می‌شود که ترکیبی از خطر ساختمانی $\lambda(S_a > x)$ و ظرفیت فروریزش سازه $p[\text{collapse}|S_a]$ می‌باشد. ظرفیت فروریزش سازه به صورت احتمال فروریزش شرطی (به شرط مقدار شتاب طیفی S_a) نیز نامیده می‌شود زیرا احتمال فروریزش سازه را به ازای وقوع شتاب‌های طیفی ارائه می‌دهد. طبق تحقیقات انجام شده در زمینه ریسک (Luco et al., 2007) و (ASCE-7-16) (2016) لازم است رابطه (۲) که انتگرال ریسک است، در سطح زلزله‌ی ماکزیمم برابر با ۱ درصد در ۵۰ سال شود؛ یعنی احتمال فروریزش سازه که ریسک نامیده می‌شود و به صورت $p[\text{collapse}]$ نشان داده می‌شود برابر با ۱ درصد در ۵۰ سال تحت زلزله‌ی ماکزیمم شود.

$$P[\text{collapse}] = \int p[\text{collapse}|S_a] \lambda(S_a) dS_a \quad (2)$$

با توجه به روابط (۱) و (۲)، رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$P[\text{collapse}] = \int p[\text{collapse}|S_a, \text{no pulse}] \lambda(S_a | \text{no pulse}) dS_a + \int p[\text{collapse}|S_a, \text{pulse}] \lambda(S_a | \text{pulse}) dS_a \quad (3)$$

که در آن، مقادیر پارامترهای $\lambda(S_a | \text{no pulse})$ و $\lambda(S_a | \text{pulse})$ از تفکیک سناریوی تحلیل خطر ساختمانی معلوم می‌باشد و لازم است مقادیر ظرفیت فروریزش در شرایط بدون پالس (یا به عبارتی احتمال فروریزش به شرط شتاب طیفی در شرایط بدون پالس) $p[\text{collapse}|S_a, \text{no pulse}]$ و ظرفیت فروریزش در شرایط پالس (یا به عبارتی احتمال فروریزش به شرط شتاب طیفی در شرایط وقوع پالس) $p[\text{collapse}|S_a, \text{pulse}]$ محاسبه گردد تا در صورت نیاز، سازه واقع در ساختمانی حوزه نزدیک با توجه

مستقیم با نمودار ظرفیت فروریزش سازه دارد. از این رو تحقیقاتی در این زمینه توسط وامواتسیکاس و کرنل (Vamvatsikos, 2002; Vamvatsikos & Cornell, 2006) آغاز شد و توسط محققین دیگر مانند لوکا و همکاران (De Luca et al., 2012) و بالتزوپولوس (Baltzopoulos, 2015) برای حوزه دور و همچنین بالتزوپولوس و همکاران (Baltzopoulos & Vamvatsikos, 2016) و بالتزوپولوس (Baltzopoulos, 2015)، برای حوزه نزدیک، انجام شده که روشی را ارائه می‌دهد که از روی پارامترهای منحنی رفتار سازه می‌توان برآورد خوبی از ظرفیت فروریزش سازه داشت. این روش به صورت کدی در MATLAB نوشته شده و ارائه گردیده است و در تحقیقات مختلف (Liel et al., 2015; Eads et al., 2012) با روش تحلیل دینامیکی افزایشی صحت‌سنجی شده و مشاهده شده است که نتایج را با دقت خوبی ارائه می‌دهد.

هدف از این مقاله به دست آوردن نسبت ظرفیت فروریزش سازه در حوزه‌ی نزدیک به ظرفیت فروریزش سازه در حوزه‌ی دور می‌باشد. از این نسبت در برآورد ظرفیت مورد تقاضای ساختمانی حوزه‌ی نزدیک استفاده شده و تفاوت‌های دو ساختمانی در ظرفیت فروریزش سازه‌های قرار گرفته در آنها بررسی می‌شود. همچنین در این مقاله از آنجایی که از روش مستقیم و بهینه ذکر شده در بالا استفاده می‌گردد، اثر شکل‌پذیری و نسبت پریود پالس در برآورد ظرفیت فروریزش سازه در حوزه‌ی نزدیک و دور مقایسه و مورد بررسی قرار خواهد گرفت که به‌عنوان مطالعه‌ای برای صحت‌سنجی استفاده از روش بهینه‌ی ارائه شده توسط بالتزوپولوس و همکاران (Baltzopoulos, 2015; Baltzopoulos & Vamvatsikos, 2016) در حوزه‌ی نزدیک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۲- متدولوژی

تفکیک سناریوی خطر در حوزه نزدیک بر اساس رابطه (۱) به دو قسمت دارای پالس (حوزه نزدیک) و بدون پالس (حوزه دور) تقسیم می‌شود (Yousefi & Taghikhany, 2014; Yousefi & Taghikhany, 2014).

می‌باشد که حجم و دشواری کار را به‌خصوص در حوزه نزدیک برای رکوردهای دارای پالس چند برابر می‌کند، بنابراین در این مطالعه از روش استفاده از منحنی پوش‌اور ارائه شده توسط بالتروپولوس و همکاران، استفاده می‌گردد.

۳- روش برآورد ظرفیت فروریزش سازه از منحنی

رفتار

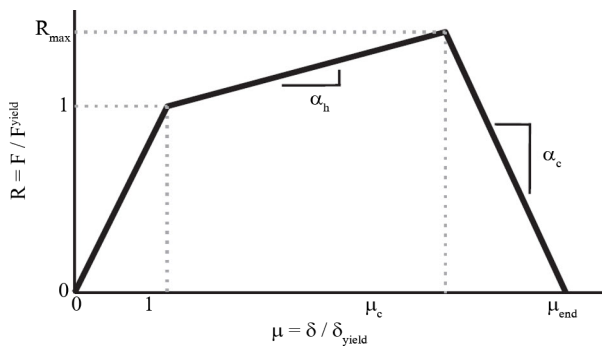
این روش از ارتباط مستقیم منحنی رفتار سازه با منحنی ظرفیت فروریزش سازه استفاده می‌کند و بر پایه شبیه‌سازی نتایج IDA بر اساس SPO (Static Push Over) می‌باشد. با تعیین پارامترهای منحنی استاتیکی افزایشی برای سازه مورد نظر و استفاده از روش معادل یک درجه آزادی برای سازه می‌توان برآورد خوبی از میانه ظرفیت فروریزش سازه به دست آورد. با توجه به این که توزیع ظرفیت فروریزش سازه با منحنی لگن نرمال هم‌خوانی دارد و مقدار انحراف از استاندارد متوسط ۰/۶ که در مراجع ذکر شده است (Luco et al., 2007)، می‌توان توزیع منحنی ظرفیت سازه را محاسبه کرد.

یکی از روش‌هایی که به‌صورت وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد تحلیل استاتیکی پوش‌اور می‌تواند باشد. این روش پاسخ لرزه‌ای غیرالاستیک سازه را به پاسخ سیستم یک درجه آزادی معادل ارتباط می‌دهد. وامواتسیکاس و کرنل (Vamvatsikos & Cornell, 2002) مجموعه‌ای از روابط تحلیلی - تجربی برای پیش‌بینی مقدار میانه و عدم قطعیت رکورد به رکورد حداکثر پاسخ لرزه‌ای نوسانگر یک درجه آزادی بر اساس مشخصات منحنی پوش‌اور آن ارائه کردند. این روابط از پرپود نوسانگر و مشخصه‌های منحنی پوش‌اور استاتیکی به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی استفاده می‌کند که در شکل (۲) نشان داده شده است و نتیجه آن برآورد مقادیر ۵۰ و ۱۶ و ۸۴ درصد منحنی IDA در مختصات $R-\mu$ می‌باشد. R مقدار مقاومت به مقاومت تسلیم و μ مقدار تغییر مکان به تغییر مکان در نقطه تسلیم است. این مجموعه روابط به‌صورت SPO2IDA نام‌گذاری شده‌اند. در شکل (۲) نتایج با مقادیر IDA حاصل از ۴۴ تاریخچه زمانی مقایسه شده است.

به تابع ظرفیت $p[\text{collapse}|S_a, \text{pulse}]$ طراحی شود تا پاسخگوی تقاضای زلزله‌های حوزه نزدیک باشد و ظرفیت لازم را داشته باشد. از آنجا که معمولاً اکثر نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک دارای پالس و اکثر نگاشت‌های حوزه‌ی دور بدون پالس هستند، شرایط وقوع پالس شرایط حوزه نزدیک و شرایط بدون پالس حوزه دور ذکر می‌گردد.

برای یافتن ظرفیت فروریزش لازم برای طراحی سازه در شرایط حوزه نزدیک، در این تحقیق سعی می‌شود تا ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک به‌صورت ضریبی از ظرفیت فروریزش حوزه دور (شرایط بدون پالس) لحاظ شود به این ترتیب با حل معادله (۳)، ظرفیت فروریزش برای حوزه دور و سپس ظرفیت فروریزش برای حوزه نزدیک به دست می‌آید. شایان توجه است که ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک نسبت به ظرفیت فروریزش حوزه دور برای هر سازه، با توجه به مشخصات دینامیکی سازه می‌تواند متفاوت باشد. از جمله تأثیرگذارترین ویژگی‌های سازه بر ظرفیت آن، مقدار پرپود پایه سازه می‌باشد که نسبت پرپود پالس به این متغیر (T_p/T) تأثیر زیادی بر ظرفیت فروریزش سازه خواهد داشت (Champion & Liel, 2012). همچنین شکل‌پذیری سازه پارامتر دیگری است که ظرفیت فروریزش سازه را در حوزه نزدیک تحت تأثیر قرار می‌دهد (Liel et al., 2011)؛ بنابراین نسبت ظرفیت فروریزش در حوزه نزدیک به ظرفیت فروریزش در حوزه دور برای سازه‌ها با پرپود پایه و شکل‌پذیری مختلف، مقدار متفاوت دارد.

در این خصوص می‌توان با توجه به نسبت ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک به ظرفیت فروریزش در حوزه دور، با شکل‌پذیری و پرپود پایه مختلف، مقادیر ظرفیت فروریزش مورد نیاز برای هر ساختگاه حوزه نزدیک را با روند ذکر شده به دست آورد. یکی از مهم‌ترین علل انتخاب روش مستقیم بهینه شده در این مقاله برای برآورد ظرفیت فروریزش این است که انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی برای محاسبه ظرفیت فروریزش سازه زمان‌بر است. همچنین در زمینه مورد بحث نیاز به ظرفیت فروریزش برای سازه‌های با شکل‌پذیری و پرپود پایه مختلف



شکل (۳): منحنی رفتار و سه پارامتر اصلی آن (De Luca et al., 2013).

تعریف شده و μ_{end} نیز از رابطه (۴) محاسبه می شود (Baltzopoulos & Vamvatsikos, 2016).

$$\mu_{end} = \mu_c + (1 + \mu_c \cdot \alpha_h - \alpha_h) / |\alpha_c| \quad (۴)$$

بنابراین می توان همه بخش های منحنی را با سه پارامتر α_h و μ_c و α_c بیان کرد. در حقیقت منحنی رفتار به صورت تابعی از برآیند این سه پارامتر تعیین می گردد (شکل ۳).

روند ذکر شده سپس توسط بالتزوپولوس و همکاران (Baltzopoulos & Vamvatsikos, 2016) برای رکوردهای حوزه نزدیک نیز تکمیل شده و استفاده می گردد.

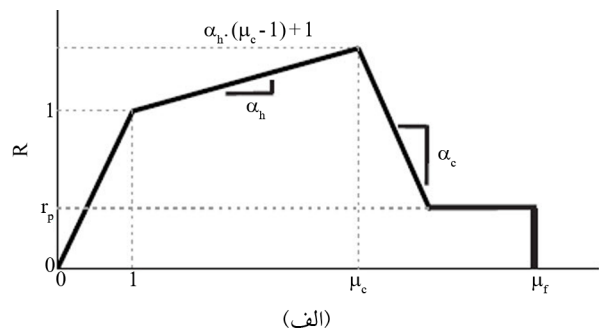
۴- محاسبه مقدار نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک به حوزه دور با توجه به نسبت پریود و شکل پذیری

۴-۱- سازه یک درجه آزادی

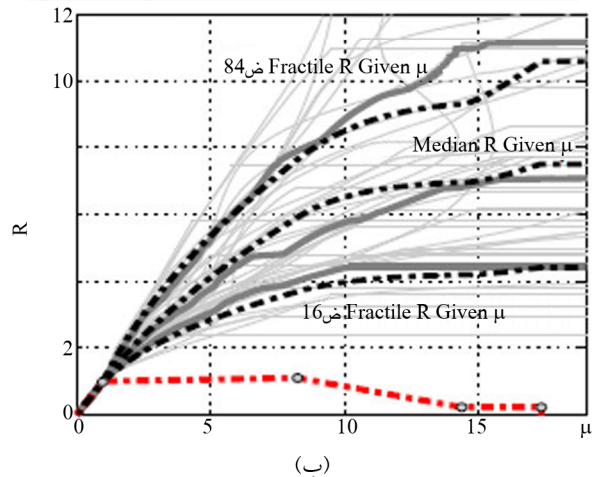
در ادامه مقدار میانه ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک نسبت به میانه ظرفیت فروریزش حوزه دور با پارامتر γ نشان داده می شود و تغییرات این پارامتر با نسبت پریود پالس و شکل پذیری بررسی می گردد.

برای محاسبه ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک و در حوزه دور با استفاده از منحنی رفتار سازه (پوش اور) و روش بالتزوپولوس، همان طور که در مقدمه ذکر شد، لازم است سه پارامتر اصلی این منحنی مشخص باشد. این سه پارامتر عبارتند از شیب سخت شونده α_h ، شیب نرم شونده α_c و شکل پذیری مربوط به نقطه حداکثر مقاومت μ_c (شکل ۳).

مقدار شکل پذیری طبق تعریف فما $\mu_v = \frac{0.8 \delta_{end}}{\delta_{yield}}$ می باشد



شکل (۲): (الف) مشخصه های منحنی پوش اور استاتیکی را نشان می دهد و (ب) مطابقت نتایج روش SPO2FRAG را با نتایج مشاهده می شود (Baltzopoulos et al., 2017).



شکل (۲): (الف) مشخصه های منحنی پوش اور استاتیکی را نشان می دهد و (ب) مطابقت نتایج روش SPO2FRAG را با نتایج مشاهده می شود (Baltzopoulos et al., 2017).

در این روند ارتباط مستقیم رفتار سازه و مشخصه های منحنی پوش اور استاتیکی با بخش های مختلف منحنی IDA مشاهده شده است. همچنین مشاهده می شود که نتایج حاصل از IDA برای مقادیر میانه و یک انحراف استاندارد کمتر و بیشتر (متناظر با مقادیر احتمال ۱۶ و ۸۴ درصد) مطابقت خوبی با نتایج حاصل از روش تحلیلی دارد.

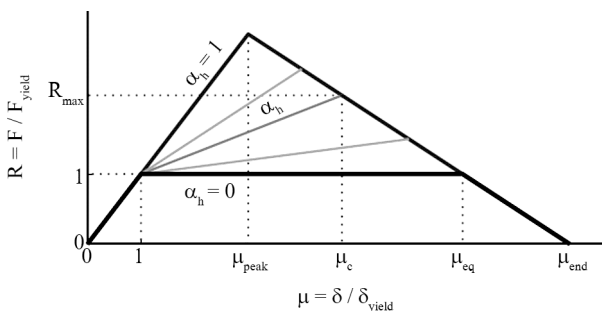
منحنی رفتار سازه با سه پارامتر اصلی بیان می گردد که در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل هر دو محور نسبت به مقادیر نقطه تسلیم نرمال شده است. پارامترهای تعریف کننده منحنی عبارتند از: شیب پس از تسلیم که بخش سخت شونده α_h نامیده می شود، شاخه نرم شونده با شیب منفی α_c و شکل پذیری نقطه مقاومت حداکثر μ_c که شاخه سخت شونده را از نرم شونده جدا می کند. μ_c به صورت شکل پذیری در نقطه مقاومت حداکثر

و به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود. این رابطه برابر با $0/8$ برابر متغیر μ_{end} است که این پارامتر در منحنی رفتار تعریف شده است

$$\ln \mu_{x\%} = \frac{a_{x\%} \cdot \ln^2 R + b_{x\%} \cdot \ln R}{c_{x\%} \cdot \ln R + d_{x\%}} \quad (7)$$

$$a_{x\%}, b_{x\%}, c_{x\%}, d_{x\%} = g\left(\alpha_h, \frac{T}{T_p}, T\right)$$

ضرایب a , b , c و d مقادیری است که از تابع g به دست می‌آید. این تابع در کد تعبیه شده و ضرایب را بر اساس نسبت پریرود پایه سازه به پریرود پالس، پریرود پایه سازه و پارامترهایی از منحنی رفتار سازه ارائه می‌دهد. همچنین μ_{peak} و μ_{eq} که پارامترهای کمکی منحنی رفتار می‌باشد در شکل نشان داده شده است.



شکل (۴): پارامترهای کمکی به کار رفته در کد برای منحنی رفتار سازه (Baltzopoulos et al., 2016).

در ذیل نتایج به دست آمده برای ظرفیت فروریزش با فرضیات ذکر شده ارائه می‌گردد.

در شکل (۵) تغییرات $R_{cap, 50\%}$ با متغیر شکل‌پذیری μ_{end} برای نسبت‌های پریرود پالس مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شکل‌پذیری، ظرفیت فروریزش افزایش می‌یابد. همچنین برای نسبت‌های پریرود بزرگ‌تر از ۱، با افزایش نسبت پریرود پالس، ظرفیت فروریزش کاهش می‌یابد. این کاهش ظرفیت، در نسبت‌های پریرود بالاتر برای شکل‌پذیری بیشتر قابل ملاحظه‌تر است. مثلاً در مقایسه نسبت پریرود ۲ با ۳ یا ۵، کاهش ظرفیت فروریزش در شکل‌پذیری‌های بالاتر از ۷ بیشتر مشاهده می‌شود و نمودارها از هم فاصله بیشتری می‌گیرند.

مقدار $\mu_c = 3$ و شیب سخت‌شوندگی برابر با $0/05$ μ_h فرض می‌شود. این مقادیر با توجه به مشخصات هر سازه می‌تواند متفاوت باشد. مقدار شیب نرم‌شوندگی از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$\alpha_h = \frac{R_{max}^{-1}}{\mu_{c-1}} \rightarrow R_{max} = \alpha_h (\mu_{c-1}) + 1 \quad (4)$$

$$\alpha_c = \frac{R_{max}}{\mu_{end}^{\mu_c}} = \frac{\alpha_h (\mu_{c-1}) + 1}{\mu_{end}^{\mu_c}} \quad (5)$$

مقدار میانه شتاب طیفی فروریزش به شتاب طیفی تسلیم در حوزه نزدیک با $R_{cap} \text{ NF}, 50\%$ بیان شده است. در اینجا پریرود پایه سازه ۱ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. پریرود ۱ ثانیه در آیین‌نامه‌های طراحی یکی از پریرودهایی می‌باشد که به‌عنوان پریرود مبنا جهت محاسبه‌ی مقادیر طیف طراحی استفاده می‌گردد.

در ادامه با فرض پارامترهای منحنی رفتار ذکر شده در بالا و پریرود پایه یک ثانیه، مقادیر نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک برای نسبت‌های پریرود پالس، مختلف توسط کد MATLAB مربوط به روش بالتزوپولوس و همکاران (Baltzopoulos & Vamvatsikos, 2016) محاسبه می‌گردد.

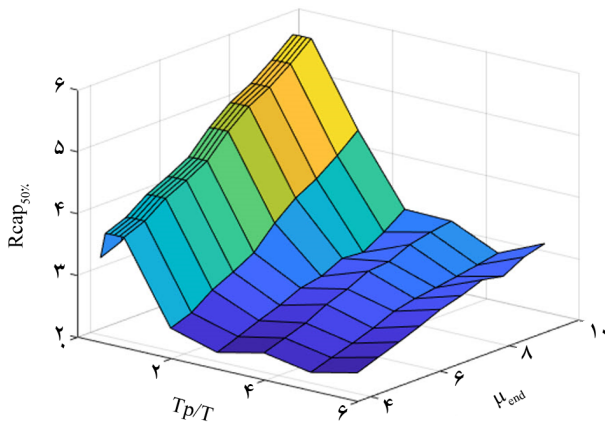
برای این محاسبات از رابطه زیر در کد مربوطه استفاده می‌شود:

$$R_{cap, x\%} = \left(1 + d_{x\%} \cdot \frac{\mu_c - 1}{\mu_{eq} - 1}\right) \times \left[R_{x\%}^0(\mu_c) + \mu_{peak} \cdot \exp\left(\frac{a_{x\%} \cdot \ln \mu_{cap(100-x)\%}}{\ln \mu_{cap(100-x)\%} + b_{x\%}}\right) \right] \quad (6)$$

$$x = \{16, 50, 84\}, d_{x\%} = g\left(\mu_{eq}, |\alpha_c|, \frac{T}{T_p}, T\right),$$

$$a_{x\%}, b_{x\%} = g\left(|\alpha_c|, \frac{T}{T_p}, T\right)$$

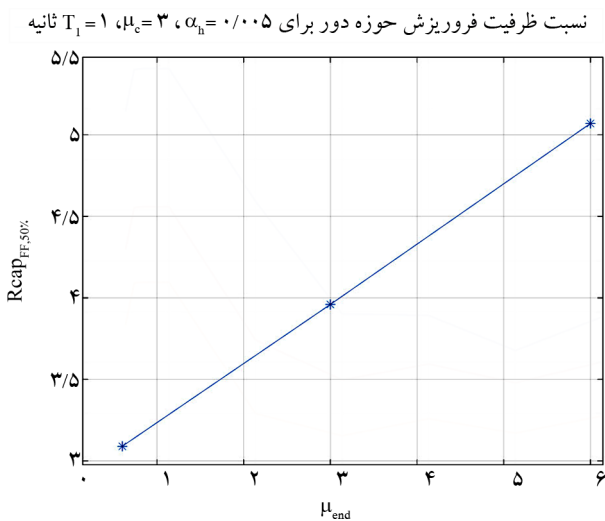
$$R_{x\%}^0(\mu_c) = \hat{R}_{x\%}(\mu_c) - \mu_{peak} \cdot \exp\left(\frac{a_{x\%} \cdot \ln \mu_c}{\ln \mu_c + b_{x\%}}\right)$$



شکل (۷): تغییرات $R_{cap_{NF,50\%}}$ با توجه به دو پارامتر شکل پذیری و نسبت پریود پالس.

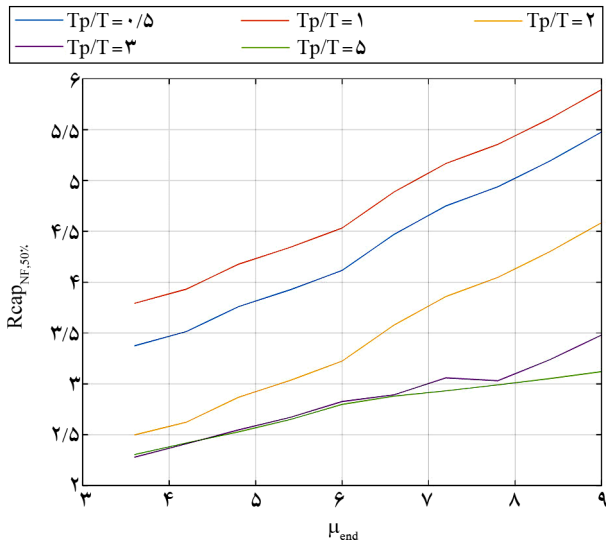
در ادامه لازم است مقادیر مشابه برای حوزه دور نیز محاسبه شود. این مقادیر با استفاده از نرم افزار SPO2FRAG با لحاظ پریود پایه ۱ ثانیه برای سازه و مقادیر ذکر شده برای پارامترهای منحنی رفتار به دست می آید. نتایج به دست آمده برای شکل پذیری های مورد نظر در شکل (۸) آورده شده که نشان می دهد با افزایش شکل پذیری ظرفیت فروریزش حوزه دور افزایش می یابد.

همچنین در جدول های (۱) و (۲) مقادیر محاسبه شده متناظر برای حوزه دور آورده شده است. همچنین مقادیر حوزه نزدیک در نسبت پریودهای مختلف و مقادیر ضریب γ نیز برای نسبت $T_p/T = 2$ و $T_p/T = 3$ به ترتیب در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل (۸): تغییرات $R_{cap_{FF,50\%}}$ با متغیر شکل پذیری μ_{end} .

نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک برای $T_1 = 1$ ، $\mu_p = 3$ ، $\alpha_p = 0.005$ ثانیه

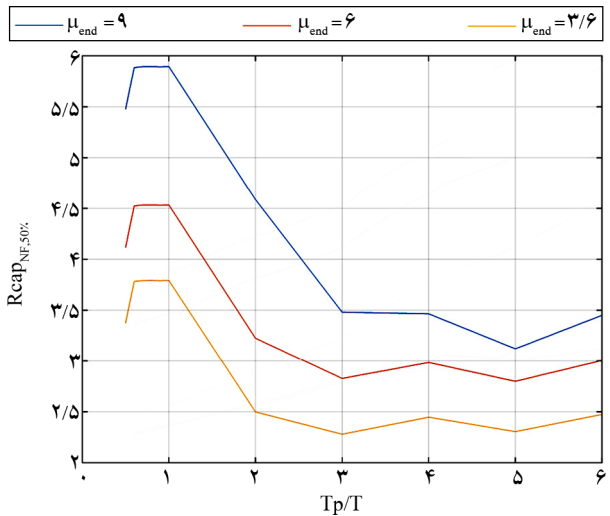


شکل (۵): تغییرات $R_{cap_{NF,50\%}}$ با متغیر شکل پذیری μ_{end} برای نسبت های پریود پالس مختلف.

در شکل (۶) تغییرات $R_{cap_{NF,50\%}}$ با نسبت پریود پالس برای سه مقدار μ_{end} نشان داده شده است. مشاهده می شود برای مقادیر نسبت پریود پالس بزرگ تر از یک، در هر شکل پذیری با افزایش نسبت پریود پالس، کاهش ظرفیت ایجاد می گردد.

در شکل (۷) تغییرات $R_{cap_{NF,50\%}}$ با توجه به هر دو پارامتر شکل پذیری و نسبت پریود پالس نشان داده شده است. روندهای ذکر شده در هر دو شکل های (۵) و (۶) به طور مشابه در شکل (۷) نیز دیده می شود.

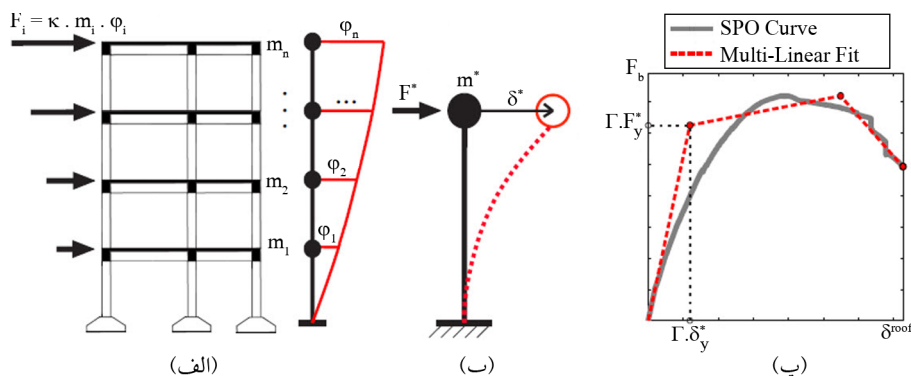
نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک برای $T_1 = 1$ ، $\mu_p = 3$ ، $\alpha_p = 0.005$ ثانیه



شکل (۶): تغییرات $R_{cap_{NF,50\%}}$ با نسبت پریود پالس برای سه مقدار μ_{end} .

طراحی شده است. سپس سازه در OpenSEES با استفاده از روش مفصل متمرکز مدل شده و شرط‌هایی که برای استفاده از روش استاتیکی معادل در نشریه ۳۶۰ دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (Publicacion No. 360, 2014) ذکر شده است مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به منظم بودن سازه تأیید شده است. غیرخطی بودن در مصالح (با ضریب ترک‌خوردگی و همچنین در رفتار مفاصل) و غیرخطی بودن هندسی در مدل‌سازی لحاظ شده که در شروع فروریزش تحت تحلیل بار افزون استاتیکی مؤثر است. تحلیل بار افزون استاتیکی بر روی قاب اعمال شده و سپس منحنی پاسخ به دست آمده است. بعد از آن با استفاده از روش SPO2FRAG توزیع احتمال فروریزش برای شکل‌پذیری‌های مختلف حساب شده و سپس با استفاده از روش بالتزوپولوس و همکاران توزیع احتمال فروریزش برای رخ دادن پالس‌های پی‌ریود مختلف قابل محاسبه است. در سازه ۱۲ طبقه مد نظر پی‌ریود پایه برابر با ۱/۵۸ ثانیه می‌باشد. انتخاب سیستم یک درجه آزادی معادل برای سازه مورد نظر بر پایه روش‌های تحلیل بر اساس پوش‌اور استاتیکی می‌باشد.

با توجه به شکل (۹) فرض می‌شود که یک قاب ساختمانی n طبقه تحت پروفیل بار جانبی $F_i = K_i \cdot m_i \cdot \phi_i$ قرار می‌گیرد. F_i نیرویی است که در طبقه ام اعمال می‌شود. m_i جرم هر طبقه و ϕ_i پروفیل تغییر مکان بدون بعد است که به صورت ثابت با مقدار واحد در بام می‌باشد. K ضریب مقیاس با بعد شتاب است.



شکل (۹): تعریف سیستم یک درجه آزادی معادل. (الف) تحلیل پوش‌اور سازه، (ب) تعریف مشخصه‌های دینامیکی سیستم یک درجه آزادی و (پ) تعریف منحنی بک‌بن سیستم یک درجه آزادی بر اساس منحنی پوش‌اور استاتیکی (Baltzopoulos et al., 2017).

جدول (۱): مقادیر γ و مقادیر متناظر ظرفیت فروریزش در حوزه دور و حوزه نزدیک در نسبت پی‌ریود ۲.

μ_{end}		
۹	۶	۳/۶
۴/۵۹	۲/۲۳	۲/۵۰
Rcap,NF,50% for $T_p/T=2$		
۵/۰۷	۳/۹۶	۳/۰۹
Rcap,FF,50%		
۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۸۱
$\gamma = Rcap,NF,50\%/Rcap,FF,50\%$		

جدول (۲): مقادیر γ و مقادیر متناظر ظرفیت فروریزش در حوزه دور و حوزه نزدیک در نسبت پی‌ریود ۳.

μ_{end}		
۹	۶	۳/۶
۳/۴۸	۲/۸۳	۲/۲۸
Rcap,NF,50% for $T_p/T=3$		
۵/۰۷	۳/۹۶	۳/۰۹
Rcap,FF,50%		
۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۴
$\gamma = Rcap,NF,50\%/Rcap,FF,50\%$		

مشاهده می‌شود که با تغییر شکل‌پذیری تفاوت ضریب γ ، بیشتر از ۱۰ درصد نیست (۰/۸۱ تا ۰/۹). برای نسبت پی‌ریود ۲ و با افزایش نسبت پی‌ریود از ۲ به ۳ (۰/۷۴ تا ۰/۶۹)، این تفاوت کمتر هم می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش نسبت پی‌ریود از ۲ به ۳، مقدار ضریب γ کاهش می‌یابد.

۲-۴- سازه چند درجه آزادی، قاب خمشی ۱۲ طبقه بتن آرمه

در این بخش سازه قاب ساختمانی بتن آرمه ۱۲ طبقه، با استفاده از مقادیر ASCE7-16 و استاندارد ۲۸۰۰ (BHRC, Standard No. 2800, 2015) بارگذاری شده و با استفاده از ACI318-14 (ACI, 2019) به صورت خمشی ویژه

اولیه منحنی رفتار دارد و این قسمت از رفتار را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که در حوزه نزدیک عامل تعیین کننده مقدار نسبت پریود پالس است و اگر نسبت پریود پالس ثابت باشد تغییر پریود پایه در نتایج با منحنی رفتار ثابت، تغییری ایجاد نمی‌کند؛ اما در حوزه دور با افزایش پریود پایه (یا به عبارتی کاهش سختی اولیه)، ظرفیت فروریزش سازه بالا می‌رود و این باعث می‌شود تا نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک به ظرفیت فروریزش حوزه دور γ ، کاهش یابد، همان‌طور که مشاهده می‌شود برای نسبت پریود ۲، میانگین ضریب γ در جدول (۴) که برای پریود پایه ۱/۸ ثانیه است برابر با ۰/۷۳ است که میانگین این نسبت در جدول (۱) که برای پریود پایه یک ثانیه برابر با ۰/۸۴ بوده است. همچنین برای نسبت پریود ۳، این مقادیر برای پریود پایه ۱/۸ ثانیه و ۱ ثانیه به ترتیب برابر ۰/۶۲ و ۰/۷۱ شده است.

بنابراین کاهش ضریب γ در سازه ۱۲ طبقه مذکور به مقادیر جدول‌های (۴) و (۵)، به علت افزایش پریود پایه معادل یک درجه آزادی دور از انتظار نیست.

جدول (۴): مقادیر نسبت ظرفیت فروریزش در حوزه دور و حوزه نزدیک برای سازه یک درجه آزادی معادل با پریود ۱/۸ ثانیه در نسبت پریود ۲.

$\mu_c = 3/89$			μ_{end}
$\alpha_h = 0/006$			
۹	۶	۳/۶	
۴/۵۹	۳/۲۲	۲/۵۰	Rcap,NF,50% for Tp/T=۲
۶/۴۴	۴/۶۷	۳/۲۲	Rcap,FF,50%
۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۸	$\gamma = Rcap,NF,50\%/Rcap,FF,50\%$

جدول (۵): مقادیر نسبت ظرفیت فروریزش در حوزه دور و حوزه نزدیک برای سازه یک درجه آزادی معادل با پریود ۱/۸ ثانیه در نسبت پریود ۳.

$\mu_c = 3/89$			μ_{end}
$\alpha_h = 0/006$			
۹	۶	۳/۶	
۳/۴۸	۲/۸۳	۲/۲۸	Rcap,NF,50% for Tp/T=۳
۶/۴۴	۴/۶۷	۳/۲۲	Rcap,FF,50%
۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۷۱	$\gamma = Rcap,NF,50\%/Rcap,FF,50\%$

با افزایش ضریب مقیاس، پاسخ تغییر مکان سازه در تغییر مکان بام δ^{roof} ثبت شده و نمودار برش پایه بر اساس تغییر مکان بام منحنی پوش‌آور را می‌دهد. این منحنی برای تعیین بک‌بن سیستم یک درجه آزادی با جرم m^* به صورت تابعی از جرم طبقات به صورت $m^* = \sum_{i=1}^n m_i \phi_i$ می‌باشد. F^* و δ^* نیز به ترتیب مربوط به برش پایه و تغییر مکان بام است که تقسیم بر ضریب مشارکت مودال می‌گردد. در ذیل روابط محاسبه‌ی پارامترهای معادل یک درجه آزادی Γ ، F^* ، δ^* و T^* بیان شده است (Baltzopoulos et al., 2017).

$$\Gamma = m^* / \sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2 \quad (8)$$

$$F^* = F_b / \Gamma \quad (9)$$

$$\delta^* = \delta^{roof} / \Gamma \quad (10)$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{m^* \delta_y^* / F_y^*} \quad (11)$$

مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای $\Gamma = 1/323$ و $T^* = 1/8$ می‌باشد. پارامترهای منحنی رفتار با توجه به منحنی پوش‌آور سازه به این شرح است: $\mu_c = 3/89$ ، $\alpha_h = 0/006$ و $\alpha_c = 0/138$.

نتایج ضریب γ برای سازه ۱۲ طبقه مورد نظر در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): مقادیر ضریب γ برای سازه ۱۲ طبقه برای نسبت پریود ۲ و ۳.

Sa_Collapse NF/Sa_Collapse FF	
۰/۶۹	Tp/T = ۲
۰/۵۱	Tp/T = ۳

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر این ضریب برای این قاب ساختمانی با $T^* = 1/8$ ثانیه، کمتر از سازه یک درجه آزادی با پریود ۱ ثانیه شده است. برای بررسی دقیق‌تر تغییر ظرفیت فروریزش به علت تغییر پریود پایه، مقدار ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک و حوزه دور با پارامترهای منحنی رفتار مفروض و فرض تغییر پریود پایه از یک ثانیه به ۱/۸ ثانیه، بررسی می‌شود. لازم به توضیح است که پارامتر پریود پایه ارتباط مستقیم به شیب

تحقیق، نقطه‌ای که کم‌ترین فاصله تا گسل شمال تبریز (۳ کیلومتر) و بیش‌ترین افزایش مقدار طیفی (Amplification) را دارد، در نظر گرفته شده است. مقادیر شتاب طیفی برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال (طیف خطر یکنواخت) در این مکان برای حوزه نزدیک ۰/۷۴ g و برای حوزه دور ۰/۶۳ g می‌باشد. همچنین این مقادیر برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال نیز ارائه شده که مقدار شتاب طیفی حوزه نزدیک ۰/۴ g و شتاب طیفی حوزه دور برابر با ۰/۳۵ g می‌باشد (Yousefi & Taghikhany, 2014). نمودار خطر در مقیاس لگاریتمی می‌تواند خطی فرض شود و به صورت رابطه (۱۲) لحاظ شود (مرجع Lazar & Dolcek, 2014):

$$H(im)=k_0 \cdot im^{-k} \quad (12)$$

در رابطه فوق H نشان‌دهنده خطر ساختگاه یا نرخ فراگذشت متغیر im است که im در اینجا شتاب طیفی در پریود ۱ ثانیه است. ضرایب k و k₀ مقادیر ثابتی هستند که با توجه به هر ساختگاه متفاوت خواهد بود؛ بنابراین با داشتن دو نقطه از منحنی خطر و رابطه ۱۲ می‌توان ضرایب ثابت را محاسبه کرد. محاسبات ضرایب منحنی خطر برای ساختگاه مورد نظر در ذیل آورده شده است. به این ترتیب نمودارهای خطر حوزه نزدیک و حوزه دور به صورت شکل (۱۰) به دست می‌آید.

۶- محاسبه نمودارهای ظرفیت مناسب برای طراحی در حوزه نزدیک بر اساس خطر ساختگاه و تأثیر پریود پالس و شکل پذیری

در این بخش با استفاده از نمودارهای خطر حاصل از تفکیک سناریوی حوزه دور و حوزه نزدیک برای ساختگاه نمونه و همچنین ضریب γ شرح داده شده در قسمت‌های پیشین منحنی

شایان ذکر است که مقدار $\gamma = 0.73$ که در این بخش برای نسبت پریود ۲ و پریود پایه ۱/۸ ثانیه محاسبه شده است با مقدار متناظر این ضریب در مرجع (Liel, et al., 2015) برای سازه قاب خمشی با پریود پایه مشابه (۱/۸ ثانیه) که برابر ۰/۷ شده است همخوانی دارد.

بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که اگر در ساختگاهی پریود پالس غالب ساختگاه مشخص باشد، می‌توان با استفاده از ضریب γ به دست آمده متناظر، منحنی ظرفیت فروریزش نزدیک مناسب برای ساختگاه را با توجه به خطر ساختگاه محاسبه کرد. منظور از پریود غالب، پریود پالسی است که در محاسبات تفکیک سناریوی تحلیل خطر حوزه نزدیک برای پریود پالس، دارای بیشترین مقدار مشارکت، یا به عبارتی بیشترین احتمال وقوع می‌باشد (Yousefi & Taghikhany, 2014). در ادامه برای یک ساختگاه حوزه نزدیک نمونه (تبریز)، منحنی ظرفیت فروریزش با استفاده از رابطه (۳) برای پریود پایه ۱ ثانیه و دو مقدار میانگین جدول (۱) (نسبت پریود پالس برابر با ۲) یعنی $\gamma = 0.84$ و مقدار میانگین جدول (۲) (نسبت پریود پالس برابر با ۳) یعنی $\gamma = 0.71$ محاسبه می‌گردد. با توجه به این که در رابطه (۳) از منحنی‌های خطر حوزه نزدیک و حوزه دور استفاده می‌شود، مختصری از روش برآورد منحنی‌های خطر حوزه دور و حوزه نزدیک برای ساختگاه نمونه بیان می‌گردد.

۵- برآورد نمودارهای خطر در ساختگاه نمونه برای حوزه نزدیک و حوزه دور

تحلیل خطر حوزه نزدیک و تفکیک سناریو برای شهر تبریز انجام شده است (Yousefi & Taghikhany, 2014). در این

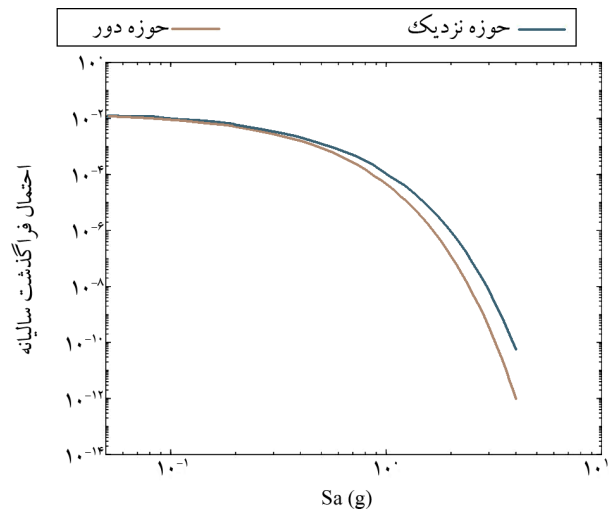
For Near-Fault				
Sa (g)	Return Period (Years)	Exceedance Probability in 50 Years	Annual Probability of Exceedance	k = 4.855 - k ₀ = 0.01468 = - k ₀ (e ^{0.74}) ^{-k} = - k ₀ (e ^{0.4}) ^{-k}
0.74	2475	0.020	0.00040	
0.4	475	0.100	0.00211	
For Far-Fault				
Sa (g)	Return Period (Years)	Exceedance Probability in 50 Years	Annual Probability of Exceedance	k = 5.895 - k ₀ = 0.01657 = - k ₀ (e ^{0.63}) ^{-k} = - k ₀ (e ^{0.35}) ^{-k}
0.63	2475	0.020	0.00040	
0.35	475	0.100	0.00211	

سازه در حوزه نزدیک ۱۶ درصد نسبت به ظرفیت فروریزش در حوزه دور کاهش می‌یابد. پس در طراحی لازم است ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور ۱۶ درصد بیشتر در نظر گرفته شود؛ بنابراین در محاسبات ظرفیت فروریزش مناسب برای طراحی، ظرفیت فروریزش طراحی در حوزه نزدیک $1/7$ برابر ظرفیت فروریزش طراحی در حوزه دور لحاظ می‌گردد و رابطه (۱۳) به صورت زیر استفاده می‌گردد:

$$P[\text{collapse}] = \int \ln(Sa_{FF}, \beta) \lambda(S_a | \text{no pulse}) dS_a + \int \ln(Sa_{FF} / \gamma, \beta) \lambda(S_a | \text{pulse}) dS_a \quad (14)$$

به این ترتیب ظرفیت سازه طراحی شده برای حوزه نزدیک بیش تر خواهد بود و انتظار می‌رود در صورت وقوع رویدادهای دارای پالس حوزه نزدیک، افت ظرفیت سازه منجر به فروریزش آن نگردد. شایان ذکر است که ضریب γ با لحاظ اثر نسبت پریود پالس و شکل‌پذیری در بخش‌های قبل محاسبه شده و به طور میانگین برای نسبت پریود ۲ برابر 0.84 و برای نسبت پریود ۳ برابر با 0.71 لحاظ می‌گردد.

در ادامه محاسبات برای یک ساختمان نمونه، تبریز، آورده شده است. در صورتی که تنها منحنی خطر حوزه دور در نظر گرفته شود، مقدار میانه ظرفیت فروریزش متناسب با ساختمان برابر با $1/24$ g به دست می‌آید. در شکل (۱۱) زیر منحنی‌های مربوط به محاسبات منحنی فروریزش متناسب با ساختمان، بدون لحاظ شرایط حوزه نزدیک و با توجه به مقدار ریسک ۱ درصد در ۵۰ سال آورده شده است که معادل مقدار ریسک فروریزش زلزله‌ی سطح طراحی می‌باشد. نمودار اول منحنی خطر حوزه دور ساختمان است. نمودار دوم منحنی توزیع چگالی ظرفیت فروریزش می‌باشد. در نمودار سوم، حاصل ضرب نقطه به نقطه نمودار اول و دوم آورده شده است و در نمودار چهارم مساحت نمودار در هر نقطه حساب شده که نقطه پایانی آن مقدار انتگرال ریسک را نتیجه می‌دهد. نمودار پنجم نتیجه تبدیل نمودار چهارم از مقدار احتمال سالیانه به احتمال در ۵۰ سال است که با استفاده از رابطه پواسون، رابطه (۱۵)، انجام شده است. رابطه (۱۵) (Luco et al., 2007) نشان می‌دهد که احتمال فروریزش



شکل (۱۰): نمودار خطر در حوزه نزدیک و حوزه دور برای ساختمان مورد نظر.

ظرفیت مناسب برای طراحی در ساختمان مورد نظر از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. در محاسبه منحنی ظرفیت فروریزش مناسب برای طراحی با توجه به خطر ساختمان، از ضریب γ استفاده می‌شود تا رابطه (۳) قابل حل باشد. در بخش‌های قبل ظرفیت فروریزش سازه‌ها در حوزه نزدیک به صورت ضریبی از ظرفیت فروریزش سازه در حوزه دور برآورد شده است که با γ نشان داده شده است. ظرفیت فروریزش سازه در حوزه نزدیک به صورت توزیع منحنی لگ نرمال با میانه Sa_{NF} و انحراف استاندارد β در نظر گرفته می‌شود و ظرفیت فروریزش سازه در حوزه دور به صورت توزیع منحنی لگ نرمال با میانه Sa_{FF} و همان انحراف استاندارد β لحاظ گردد (از اختلاف کم انحراف استاندارد حوزه دور و حوزه نزدیک صرف نظر شده است زیرا معمولاً تغییرات این پارامتر منجر به تغییر قابل توجهی در توزیع ظرفیت فروریزش نمی‌گردد (Luco et al., 2007) رابطه (۳) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$P[\text{collapse}] = \int \ln(Sa_{FF}, \beta) \lambda(S_a | \text{no pulse}) dS_a + \int \ln(Sa_{NF}, \beta) \lambda(S_a | \text{pulse}) dS_a \quad (13)$$

همان‌طور که اشاره شد پارامتر γ نشان می‌دهد که میانه ظرفیت سازه در حوزه نزدیک چه درصدی از میانه ظرفیت سازه در حوزه دور است. مثلاً ضریب 0.84 نشان می‌دهد که ظرفیت فروریزش

$$P[\text{collapse in } y \text{ years}] = 1 - (1 - P[\text{collapse}])^y \quad (15)$$

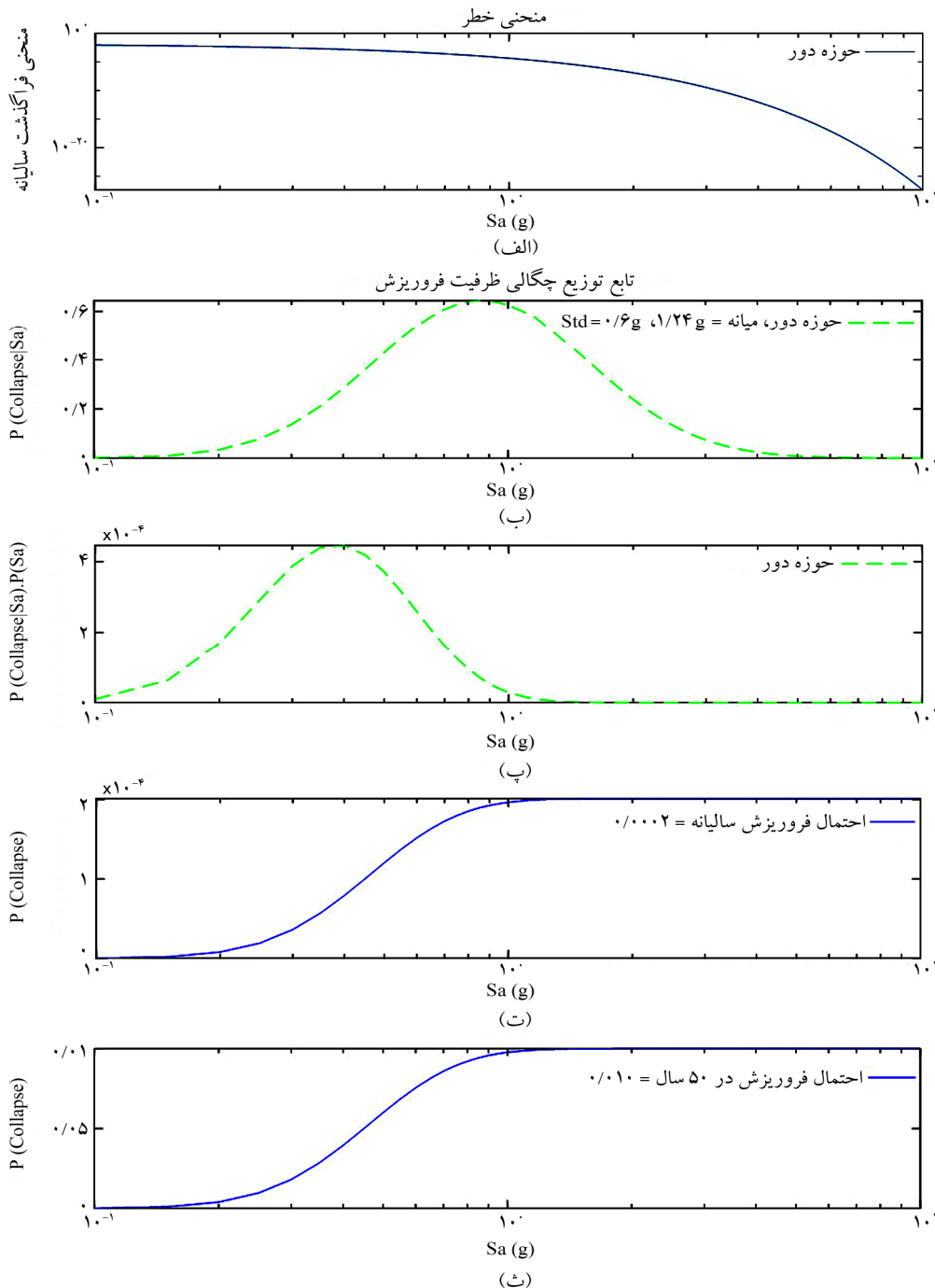
y سال برابر است با یک منهای احتمال این که فروریزش در

$$P[\text{collapse in } y \text{ years}] = 1 - e^{P1-y} \quad (16)$$

y سال نباشد. احتمال این که در y سال فروریزش نباشد برابر

مقادیر نشان داده شده در شکل (۱۱)، مقادیر نهایی به دست آمده از محاسبات است که طی آن از یک مقدار اولیه برای میانه نمودار ظرفیت فروریزش استفاده شده و با سعی و اصلاح آن

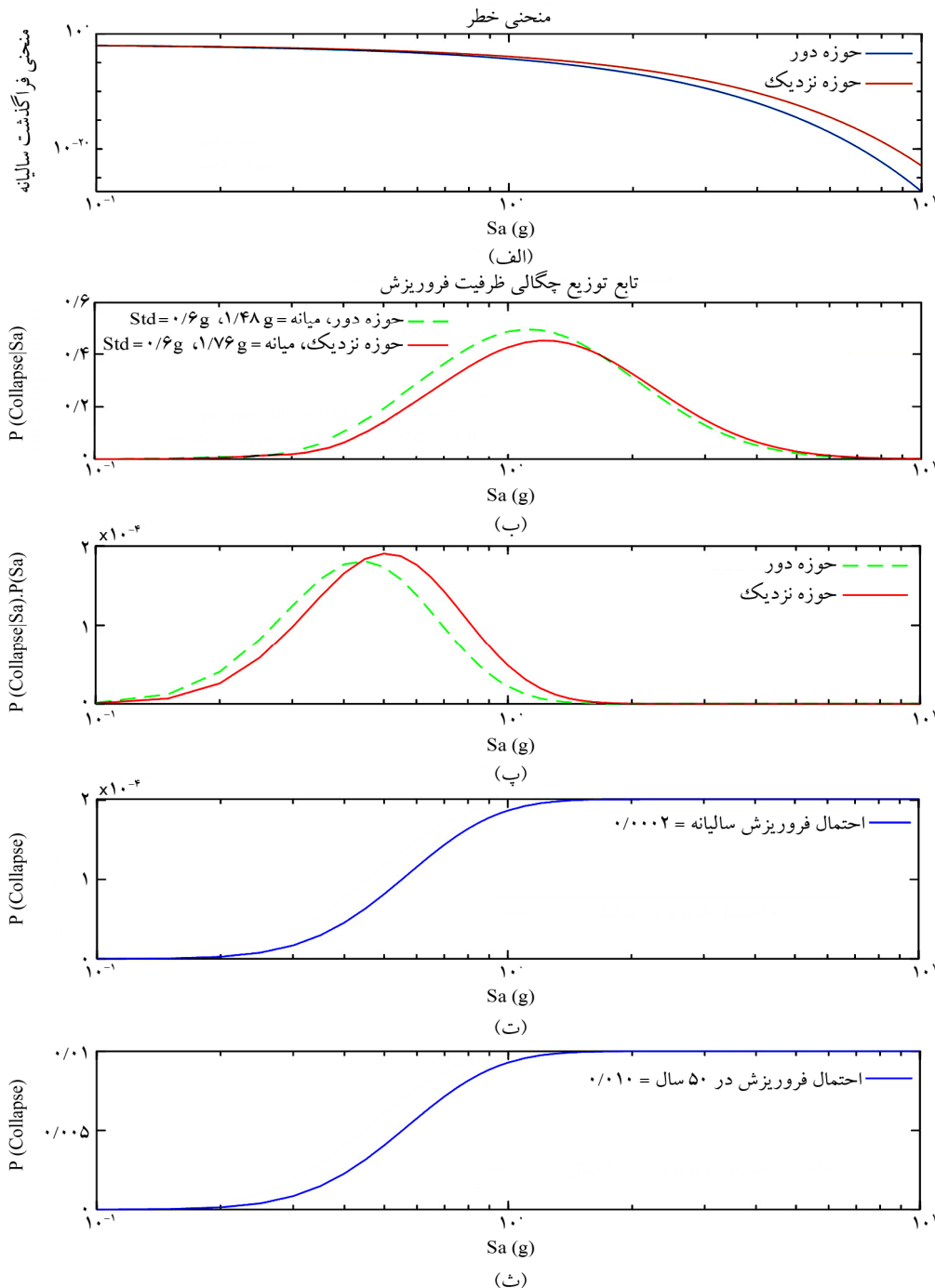
است با یک منهای احتمال فروریزش سالیانه که y بار در خودش ضرب شود (یا به توان y برسد). رابطه (۱۶) بیان دیگری از رابطه (۱۵) می‌باشد که در آن PI مقدار احتمال سالیانه است.



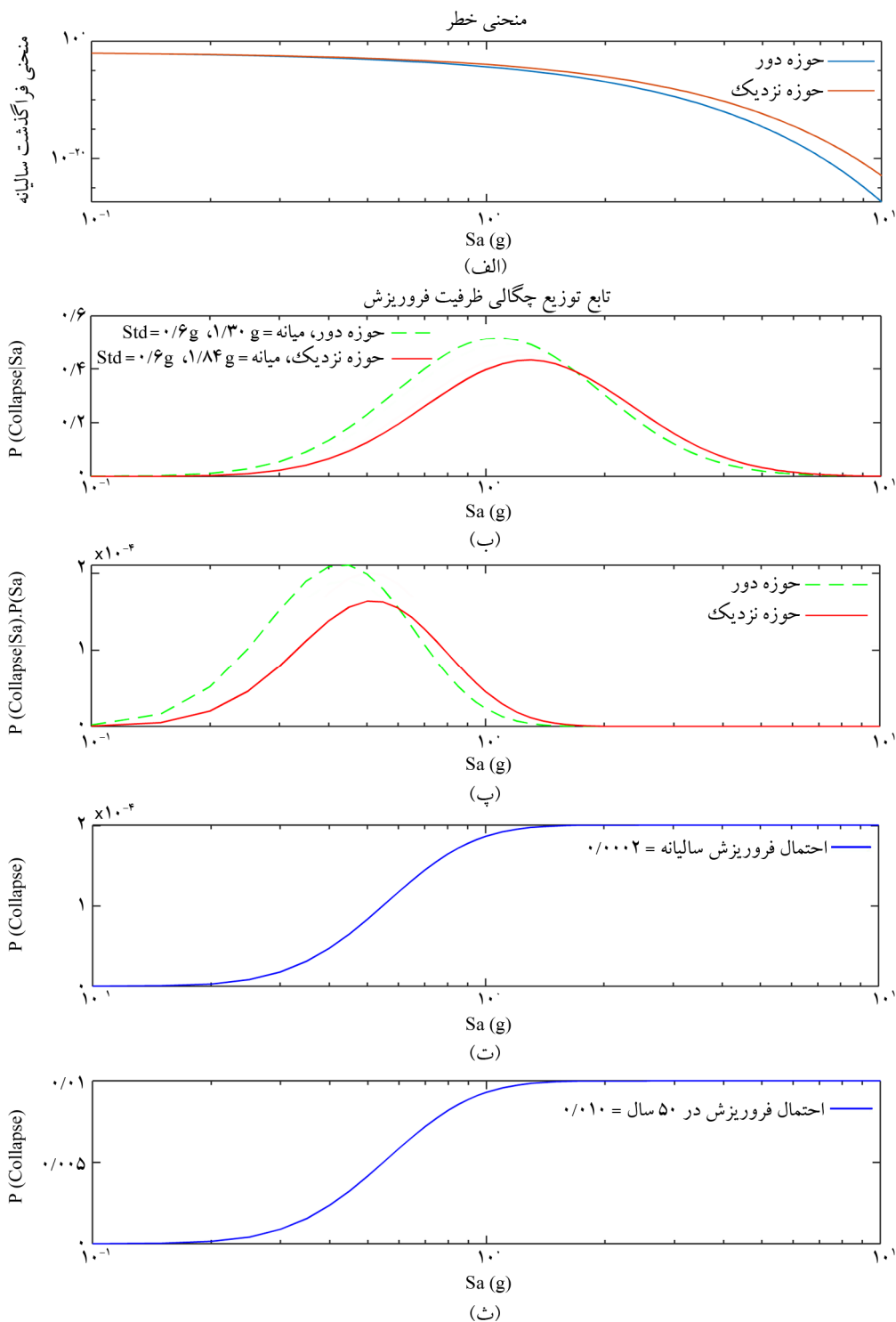
شکل (۱۱): به دست آوردن منحنی ظرفیت فروریزش ساختمان برای حوزه دور. (الف) منحنی خطر حوزه دور برای ساختمان، (ب) منحنی چگالی ظرفیت فروریزش، (پ) حاصل ضرب نمودار (الف) و (ب)، (ت) مساحت زیر نمودار (پ) در هر نقطه که نقطه پایان آن برابر با انگوار ریسک است، (ث) نمودار (ت) که از مقدار سالیانه با استفاده از رابطه (۱۶) به مقدار درصد در ۵۰ سال تبدیل شده است.

حاصل از جدول (۱) منحنی ظرفیت فروریزش متناسب با ساختگاه با لحاظ خطر و ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک محاسبه شده و محاسبات و نتایج در شکل (۱۲) آورده شده است. همچنین نتایج برای $\gamma = 0.71$ (به دست آمده از مقدار متوسط حاصل از جدول (۲) نیز به طور مشابه در شکل (۱۳) ارائه شده است.

مقدار ریسک ۱ درصد در ۵۰ سال به دست آمده است. در این سعی و اصلاح، در صورتی که مقدار میانه در نظر گرفته شده ریسک بالاتر از ۱ درصد در ۵۰ سال را بدهد بدان معناست که ظرفیت لحاظ شده کم است و باید افزایش یابد تا ریسک کم شود و به عکس. در ادامه با مقدار $\gamma = 0.84$ (به دست آمده از مقدار متوسط



شکل (۱۲): به دست آوردن منحنی ظرفیت فروریزش ساختگاه برای حوزه نزدیک $(\gamma = 0.84)$. (الف) منحنی های خطر حوزه دور و حوزه نزدیک برای ساختگاه، (ب) منحنی چگالی ظرفیت فروریزش حوزه دور و حوزه نزدیک، (پ) حاصل ضرب نمودارهای (الف) و (ب) متناظر، (ت) مساحت زیر نمودار (پ) در هر نقطه که پایان آن برابر با انتگرال ریسک است و (ث) نمودار (پ) از مقدار سالیانه با استفاده از رابطه (۱۶) به مقدار احتمال در ۵۰ سال تبدیل شده است.



شکل (۱۳): به‌دست آوردن منحنی ظرفیت فروریزش ساختمان برای حوزه نزدیک ($\gamma=0/71$). (الف) منحنی‌های خطر حوزه دور و حوزه نزدیک برای ساختمان، (ب) منحنی چگالی ظرفیت فروریزش حوزه دور و حوزه نزدیک، (پ) حاصل ضرب نمودارهای (الف) و (ب) متناظر، (ت) مساحت زیر نمودار (پ) در هر نقطه که پایان آن برابر با انتگرال ریسک است و (ث) نمودار (پ) از مقدار سالیانه با استفاده از رابطه (۱۶) به مقدار احتمال در ۵۰ سال تبدیل شده است.

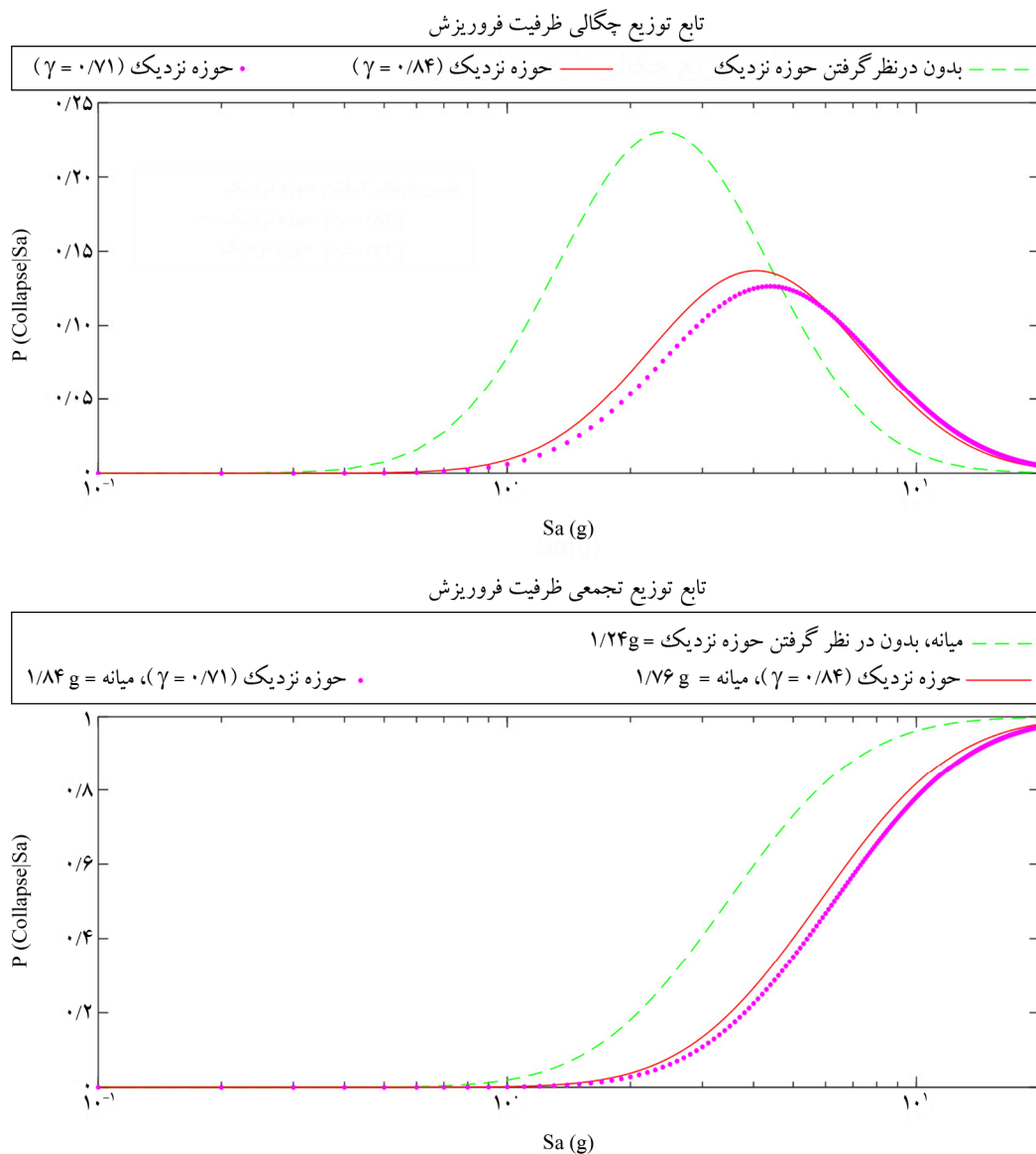
لحاظ شده است (روابط ۱۳ و ۱۴). روند سعی اصلاح گفته شده در بخش قبل برای این قسمت نیز به کار گرفته شده است. مشاهده می‌شود که میانه ظرفیت فروریزش طراحی برای

روند محاسبات شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مانند توضیحات ارائه شده برای شکل (۱۱) است با این تفاوت که در رابطه (۳) میانه ظرفیت فروریزش حوزه دور ۷ برابر حوزه نزدیک برای طراحی

(شکل های ۱۱ و ۱۲) نشان می دهد که در نظر نگرفتن ظرفیت و خطر حوزه نزدیک باعث می شود تا مقدار ظرفیت لازم برای طراحی سازه ۴۸ درصد کمتر برآورد گردد که این می تواند باعث فروریزش سازه هنگام وقوع رویداد دارای پالس حوزه نزدیک گردد زیرا در این حالت سازه ظرفیت مورد تقاضای ساختگاه را نمی تواند برآورده سازد. برای مشاهده بهتر این موضوع، منحنی های ظرفیت طراحی سازه برای حالت بدون لحاظ منحنی های حوزه نزدیک و همچنین با لحاظ منحنی حوزه نزدیک با $\gamma = 0.71$ و $\gamma = 0.84$ در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

حوزه نزدیک برای $\gamma = 0.84$ برابر با $1/76$ g و برای $\gamma = 0.71$ این مقدار برابر با $1/84$ g می باشد. در حقیقت ۱۵ درصد کاهش γ باعث تنها ۵ درصد افزایش ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک شده است؛ بنابراین می توان به طور محافظه کارانه از مقدار کمتر γ برای محاسبه منحنی ظرفیت مناسب برای طراحی در ساختگاه استفاده کرد.

همچنین مقایسه میانه ظرفیت فروریزش در حالتی که منحنی خطر و ظرفیت در حوزه نزدیک لحاظ نگردد با حالتی که خطر و ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک در نظر گرفته شود



شکل (۱۴): مقایسه نمودارهای ظرفیت فروریزش در حالت بدون لحاظ خطر و ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک و با لحاظ خطر و ظرفیت حوزه نزدیک برای $\gamma = 0.71$ و $\gamma = 0.84$ (نمودار اول منحنی توزیع چگالی احتمال و نمودار دوم توزیع تجمعی احتمال است و در مقیاس لگاریتمی برای $Sa(g)$ رسم شده است).

۷- نتیجه‌گیری

مراجع

Abrahamson, N. (1998). Seismological aspects of near-fault ground motions. *Proceedings of the 5th Caltrans Seismic Research Workshop*. Sacramento, CA, United States of America: California Department of Transportation Engineering Service Center.

ACI (2019). ACI 318-19 Building Code requirements for structural concrete and commentary. *American Concrete Institute eBooks*. Farmington Hills, MI, United States of America: American Concrete International. <https://doi.org/10.14359/51716937>.

ASCE (2016). Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE-SEI 7-16. *American Society of Civil Engineers eBooks*. Author. <https://doi.org/10.1061/9780784412916>.

ATC (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors: FEMA P69*. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL.

Baker, J.W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1486-1501. <https://doi.org/10.1785/0120060255>.

Baker, J. W., & Cornell, C. A. (2008). Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions. *Engineering Structures*, 30(4), 1048-1057. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.009>.

Baltzopoulos, G. (2015). *Structural Performance Evaluation in Near-Source Conditions* (Ph.D. Dissertation). Università degli Studi di Napoli Federico II.

Baltzopoulos, G., Baraschino, R., Iervolino, I., & Vamvatsikos, D. (2017). SPO2FRAG: software for seismic fragility assessment based on static pushover. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(10), 4399-4425. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0145-3>.

Baltzopoulos, G., & Vamvatsikos, D. (2016). Analytical modelling of near-source pulse-like seismic demand for multi-linear backbone oscillators. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(11), 1797-1815. <https://doi.org/10.1002/eqe.2729>.

BHRC (2015). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings: Standard No. 2800* (4th Edition). Building and Housing Research Center.

در این تحقیق با توجه به پارامترهای شکل‌پذیری و نسبت پریود پالس به پریود پایه سازه، ظرفیت فروریزش طراحی برای سازه در حوزه نزدیک و در حوزه دور با استفاده از روش بالتزوپولوس و همکاران برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد:

۱. ظرفیت فروریزش در حوزه نزدیک با زیاد شدن شکل‌پذیری، افزایش می‌یابد اما وقتی نسبت ظرفیت فروریزش در حوزه نزدیک به ظرفیت فروریزش حوزه دور لحاظ شود تغییرات نسبت ظرفیت با شکل‌پذیری محدود می‌شود و می‌توان از مقدار متوسط نسبت ظرفیت برای شکل‌پذیری‌های مختلف استفاده کرد. در واقع تغییرات پارامتر نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک به ظرفیت فروریزش حوزه دور با توجه به متغیر شکل‌پذیری قابل توجه نیست.

۲. همچنین تغییرات ظرفیت فروریزش در حوزه نزدیک با نسبت پریود پالس به پریود پایه سازه نشان داده شده است و هرچه نسبت پریود پالس افزایش یابد ظرفیت فروریزش کم می‌شود. مقدار متوسط نسبت ظرفیت فروریزش حوزه نزدیک به حوزه دور برای شکل‌پذیری‌های مختلف و دو نسبت پریود پالس ۲ و ۳ برای حل انتگرال ریسک در حوزه نزدیک و برآورد منحنی ظرفیت مناسب برای طراحی در ساختگاه استفاده شده است.

۳. محاسبات نشان می‌دهد که کاهش ۱۵ درصد ضریب γ (برای نسبت پریود پالس ۲ به ۳) تنها باعث افزایش ۴ درصدی میانگین ظرفیت فروریزش طراحی در حوزه نزدیک می‌گردد؛ بنابراین می‌توان برای یک ساختگاه به‌طور محافظه‌کارانه از حد پایین γ استفاده کرد و منحنی ظرفیت مناسب برای طراحی را برای ساختگاه به دست آورد.

۴. روش ارائه شده می‌تواند برای محاسبه ظرفیت فروریزش طراحی در ساختگاه حوزه نزدیک به کار رود. در این روش ظرفیت فروریزش طراحی متناسب با خطر ساختگاه و همچنین مشخصات سازه تعیین می‌گردد.

- Lazar, N., & Dolšek, M. (2014). A closed form solution for seismic risk assessment incorporating intensity bounds. *Engineering Structures*, 78, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.011>.
- Liel, A.B., Haselton, C.B., & Deierlein, G.G. (2011). Seismic Collapse Safety of reinforced concrete buildings. II: Comparative assessment of nonductile and ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 137(4), 492-502. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000275](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000275).
- Liel, A.B., Luco, N., Raghunandan, M., & Champion, C.P. (2015). Modifications to risk-targeted seismic design maps for subduction and near-fault hazards. *International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.14288/1.0076228>.
- Luco, N., Ellingwood, B.R., Hamburger, R.O., Hooper, J., Kimball, J., & Kircher, C.A. (2007). Risk-Targeted versus Current Seismic Design Maps for the Conterminous United States. *SEAOC 2007 Convention Proceedings*. Retrieved from <http://geohazards.usgs.gov/designmaps/us/inc/SEAOCConventionRevs.pdf>.
- Shahi, S.K., & Baker, J.W. (2014). An efficient algorithm to identify strong velocity pulses in multi-component ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2456-2466.
- Somerville, P., Smith, N.F., Graves, R., & Abrahamson, N.A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1), 199-222. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199>.
- Tehranizadeh, M., & Shanehsazzadeh, H. (2012). Directivity effect on near-fault amplification factor. *Iran-US Joint Seismic Workshop*.
- Tehranizadeh, M., & Shanehsazzadeh, H. (2013). Near-fault amplification factor by using wavelet method. *Research, Development and Practice in Structural Engineering and Construction*.
- Uniformly distributed random numbers - MATLAB rand. (n.d.). Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rand.html>.
- Vamvatsikos, D. (2002). *Seismic Performance, Capacity and Reliability of Structures as Seen Through Incremental Dynamic Analysis*. Retrieved from
- Champion, C.P., & Liel, A.B. (2012). The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(10), 1391-1409. <https://doi.org/10.1002/eqe.1188>.
- Cox, K., & Ashford, S.A. (2002). *Characterization of Large Velocity Pulses for Laboratory Testing*. Retrieved from https://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2002/0222.pdf.
- De Luca, F., Vamvatsikos, D., & Iervolino, I. (2012). Near-optimal piecewise linear fits of static pushover capacity curves for equivalent SDOF analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(4), 523-543. <https://doi.org/10.1002/eqe.2225>.
- Eads, L., Miranda, E., Krawinkler, H., & Lignos, D. G. (2012). An efficient method for estimating the collapse risk of structures in seismic regions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(1), 25-41. <https://doi.org/10.1002/eqe.2191>.
- Ellingwood, B.R., & Wen, Y.K. (2005). Risk-benefit-based design decisions for low-probability/high consequence earthquake events in Mid-America. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 56-70. <https://doi.org/10.1002/pse.191>.
- Haselton, C.B., Liel, A.B., Deierlein, G.G., Dean, B.S., & Chou, J.H. (2011). Seismic collapse Safety of reinforced concrete buildings. I: Assessment of ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 137(4), 481-491. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000318](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000318).
- Judd, J.P., & Charney, F.A. (2014). Earthquake risk analysis of structures. *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2014, Porto, Portugal*.
- Kohrangi, M., Bazzurro, P., & Vamvatsikos, D. (2021a). Seismic risk and loss estimation for the building stock in Isfahan. Part I: exposure and vulnerability. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(4), 1709-1737. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01036-2>.
- Kohrangi, M., Bazzurro, P., & Vamvatsikos, D. (2021b). Seismic risk and loss estimation for the building stock in Isfahan: part II—hazard analysis and risk assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(4), 1739-1763. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01037-1>.

<http://mortezarazi.persianguig.com/document/codes/IDA%20BOOK%20BY%20CORNELL.pdf>.

Vamvatsikos, D., & Cornell, C. (2002). The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*. Retrieved from <http://ci.nii.ac.jp/naid/10020952556>.

Vamvatsikos, D., & Cornell, C.A. (2006). Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9), 1097-1117. <https://doi.org/10.1002/eqe.573>.

Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision (2014). *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings: Publication No 360* (First Edition). Tehran, Iran (Islamic Republic of): Office of Deputy for Strategic Supervision, Department of Technical Affairs.

Yousefi, M., & Taghikhany, T. (2014). Incorporation of directivity effect in probabilistic seismic hazard analysis and disaggregation of Tabriz city. *Natural Hazards*, 73(2), 277-301. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1096-5>.

واژه نامه

Forward Directivity	۱- جهت پذیری پیش رونده
Backward or Reverse Directivity	۲- جهت پذیری پس رونده
Neutral Directivity	۳- جهت پذیری خنثی
Ordinary	۴- معمولی
Capping	۵- مقاومت حداکثر

Evaluation of the Collapse Capacity Ratio of the Near Fault to the Far Fault and Its Effect on Collapse Risk in Terms of Pulse Period and Formability

Homa Shanehsazzadeh¹, Mohsen Tehranizadeh^{2*} and Leila Hajnajafi³

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: tehranizadeh@aut.ac.ir
3. Assistant Professor, Islamic Azad University, Tehran South Branch, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Tehran, Iran

The seismic collapse capacity of a structure is a critical factor in earthquake risk assessment within engineering practices. Conventionally, evaluating this capacity involves intricate and time-consuming incremental dynamic analyses. However, recent progress has brought forth alternative, streamlined methodologies grounded in the use of structural behavior curves. This study employs the application of these innovative approaches to comprehensively assess the seismic collapse capacity of structures. Embracing advancements, it strives to enhance the efficiency and precision of seismic risk assessments in engineering practices.

In addition to the efficiency of assessment methodologies, it is imperative that the calculation of seismic collapse capacity aligns with the specific demands of the construction site. This ensures that the seismic risk falls within the established allowable limits. This consideration becomes particularly critical for construction sites located in close proximity to fault zones. In such areas, the presence of directivity pulses heightened attention to seismic collapse capacity. Recognizing that structural ductility and the pulse period ratio in the near-fault are primary factors influencing seismic collapse capacity, which is demanded in site, this study delves into a detailed numerical investigation of these critical elements. Subsequently, the seismic collapse capacity demanded in the near-fault is meticulously estimated based on these considerations.

The extensive investigations undertaken in this study yield insightful revelations. It is evident that heightened structural ductility correlates with an augmentation of seismic collapse capacity, both in the near-fault and far-fault scenarios. Conversely, a reduction in seismic collapse capacity in the near-fault is discerned as the pulse period ratio increases concerning the fundamental period of the structure. To conduct a comprehensive evaluation, the ratio of seismic collapse capacity in the near-fault to that in the far-fault is calculated, taking into account both ductility and pulse period ratio. This derived parameter, denoted as γ , is then employed to estimate the seismic collapse capacity demanded in the near-fault. This analysis contributes valuable insights to the understanding of seismic behavior in both near-fault and far-fault regions.

For the assessment of seismic collapse capacity demand at construction sites, the study recommends the utilization of a lower bound of the ratio of near-fault to far-fault seismic collapse capacity. This lower bound, associated with lower ductility and a higher pulse period ratio, is not just conservative but also robust. Importantly, this cautious approach ensures that an increase in this parameter does not significantly escalate the demand at the construction site. Such a calculated and conservative estimation of seismic collapse capacity demanded contributes to a more resilient seismic risk assessment for structures situated in near-fault zones.

In conclusion, the results indicate that for the assessment of seismic collapse capacity that is demanded at construction sites in near-fault zones, utilizing a lower bound of the ratio of near-fault to far-fault seismic collapse capacity, associated with lower ductility and higher pulse period ratio, is sufficiently conservative. Moreover, an increase in this parameter does not significantly escalate the demand at the construction site.

This approach ensures a cautious estimation of seismic collapse capacity demand, contributing to a more robust seismic risk assessment for structures in near-fault zones.

Keywords: Collapse Risk, Collapse Capacity, Near-Fault, Far-Fault, Pulse, Directivity, Ductility.