

ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های قاب خمشی فولادی جداسازی شده با رویکرد خسارت

مجید قلهکی* (دانشیار)

حسین پروینی نانی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهدی بنازاده (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (۵۱-۳۳-۲-۳۴، شماره ۴/۲، ص. ۱۳۳۳-۱۳۳۴)

در پژوهش حاضر سعی شده است عملکرد سازه‌های قاب خمشی فولادی جداسازی شده با استفاده از روش طراحی لرزه‌ی براساس عملکرد و برآورد خسارت ارائه شده در آیین‌نامه‌ی FEMA P-۵۸-۱ ارزیابی شوند. در این راستا، مدل سه بُعدی غیرخطی سازه‌ی ۴ طبقه‌ی قاب خمشی فولادی با جداساز لرزه‌ی و بدون آن تحت رکوردهای حوزه‌های دور و نزدیک در نرم‌افزار OpenSees تحلیل و عملکرد آن‌ها از دو دیدگاه فروریزش و خسارت، با نرم‌افزار PACT بررسی شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که میزان کاهش هزینه‌ی تعمیر سازه در صورت استفاده از جداساز، تحت اثر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی دور برابر با ۷۲٪ و تحت اثر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک برابر با ۶۷٪ است. همچنین تحلیل هزینه - سود جهت بررسی امکان‌سنجی اقتصادی انجام و مشاهده شده است که در صورت استفاده از سیستم جداساز، مدت زمان بازگشت هزینه در زلزله‌های حوزه‌ی دور، ۱۴ سال و برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، ۱۸ سال است.

واژگان کلیدی: طراحی لرزه‌ی براساس عملکرد، برآورد خسارت، ارزیابی عملکرد، جداساز لرزه‌ی، تحلیل هزینه - سود.

۱. مقدمه

زلزله‌ها موجب آسیب‌های جبران‌ناپذیر، خسارت‌های مالی و اختلال در عملکرد سازه‌ها می‌شوند. ثابت شده است که استفاده از جداسازهای لرزه‌ی، روشی مؤثر جهت کاهش تلفات جانی و هزینه‌های مالی ناشی از آسیب هستند.^[۱] جداسازها، به شکلی مؤثر و قابل ملاحظه، بسامد سازه را کاهش می‌دهند و در نتیجه‌ی آن، شتاب طبقات کاهش می‌یابد. ساختمان‌های با جداساز، تمایل به پاسخ همانند جرم صلب را دارند، به طوری که بیشتر تغییرشکل‌ها در لایه‌ی انعطاف‌پذیر جداساز رخ می‌دهد.^[۲] بنابراین سازه‌های جداسازی شده همانند سایر سازه‌ها می‌توانند دچار تغییرشکل‌های غیرکشسان و آسیب جدی تحت زمین‌لرزه‌های شدید شوند.^[۳] طراحی لرزه‌ی براساس عملکرد (PBSD) مفهومی است که اجازه‌ی طراحی ساختمان‌ها را با درک واقعی و قابل اطمینان از ریسک حیات، خسارت‌های مالی و جانی در نتیجه‌ی زلزله‌های آینده می‌دهد. مهندسی زلزله براساس عملکرد، تصمیم‌گیری^۲ در مورد ریسک لرزه‌ی را از طریق ارزیابی و روش‌های طراحی ارتقاء می‌بخشد و موجب می‌شود که کارفرمایان قادر به اتخاذ تصمیم‌های آگاهانه براساس ریسک لرزه‌ی و خسارت‌های مالی و جانی باشند.^[۵] PBSD به ارائه‌ی یک چارچوب مفید

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۷/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۶/۱/۲۹.

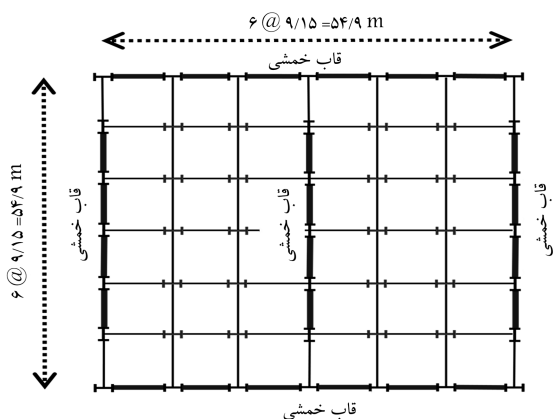
DOI:10.24200/J30.2019.1442

mgholhaki@semnan.ac.ir
hosseinp@aut.ac.ir
mbanazadeh@aut.ac.ir

جهت توسعه‌ی درک روابط میان مشخصه‌های زمین‌لرزه، روسازه و سیستم جداسازی و نیز ارزیابی توانایی رویکردهای مختلف طراحی و خصوصیات سیستم جداساز، جهت نیل به اهداف عملکردی می‌پردازد. همچنین روش برآورد خسارت لرزه‌ی به ترکیب خطر لرزه‌ی، پاسخ سازه‌ی، خرابی و پیامدهای آن، جهت کمی‌سازی ریسک لرزه‌ی براساس عملکرد لرزه‌ی ساختمان می‌پردازد.^[۶]

در سال ۲۰۱۰،^[۴] در بررسی هزینه - سود سازه‌های جداسازی شده، این نتیجه به‌دست آمد که استفاده از جداساز می‌تواند تا ۲۰٪ موجب کاهش هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سازه‌ی جداسازی شده شود، ولی در مطالعات مذکور، صدمات و تلفات جانی در روند ارزیابی خسارت لحاظ نشده بود. همچنین در سال ۲۰۱۴،^[۸] چند سازه‌ی بتنی معمولی و جداسازی شده با رویکرد خرابی و هزینه با یکدیگر بررسی و با در نظر گرفتن نیروهای لرزه‌ی متفاوت با استفاده از روش مهندسی زلزله براساس عملکرد با یکدیگر مقایسه شدند و با توجه به نتایج به‌دست آمده، بر عملکرد مناسب سازه‌های جداسازی شده از لحاظ خرابی نسبت به سازه‌های معمول تأکید شده است.

در سال ۲۰۱۵،^[۹] نیز به مقایسه‌ی پاسخ و عملکرد سازه‌های فولادی جداسازی شده با سازه‌های فولادی بدون جداساز پرداخته شده است که فقط برای بررسی پیشینه‌ی زلزله‌ی محتمل (MCE)^۳ بوده و با معرفی معیار خرابی به‌عنوان معیار عملکردی به بررسی حساسیت اعضاء غیرسازه‌ی نسبت به معیار خرابی پرداخته شده است.



شکل ۱. پلان ساختمان مدل سازی شده.

جدول ۱. مقاطع تیرها و ستون‌های قاب‌های خمشی مدل‌ها.

مدل	طبقه	ستون‌ها	تیرها
SMRF	بام	W14 × 233	W30 × 108
	۳	W14 × 370	W33 × 130
	۲ و ۱	W14 × 398	W33 × 152
I - IMRF	بام	W14 × 233	W27 × 102
	۳	W14 × 283	W30 × 108
	۲ و ۱	W14 × 370	W33 × 141

جدول ۲. مشخصات تکیه‌گاه‌های سربی - لاستیکی طراحی شده.

مقدار	مشخصات
۸°	قطر بیرونی (cm)
۱۴	قطر هسته‌ی سربی (cm)
۲°	ارتفاع کل لایه‌های لاستیکی (cm)
۳۷	تعداد لایه‌های لاستیکی
۰٫۵۴	ضخامت یک لایه لاستیکی (cm)
۰٫۴۴	ضخامت یک صفحه فولادی (cm)
۴۲٫۲۲	ارتفاع کلی (cm)
۱۲۳	مقاومت مشخصه (kN)
۱۲۸۰۰	سختی اولیه (kN/m)
۹۸۴	سختی پس از تسلیم (kN/m)
۱۶۰۰	سختی برشی معادل (kN/m)
۲۳٫۲	نسبت میرایی معادل (%)

همچنین ساختمان جداسازی شده براساس یک قاب خمشی متوسط (I-IMRF)^۵ با استفاده از اتصال‌های مستقیم تیر به ستون لحاظ شده‌اند. بدین ترتیب ضریب رفتار برای سازه‌ی خمشی، برابر با ۸ و برای سازه‌ی جداسازی شده، برابر با ۲ در نظر گرفته شده‌اند. مقدار تغییرمکان جانبی نسبی طراحی برای سازه‌ی خمشی برابر ۲٪ و برای سازه‌ی جداسازی شده برابر ۱٫۷۵٪ و طراحی ساختمان‌ها براساس کنترل تغییرمکان جانبی نسبی بوده است. مقاطع فولادی طراحی شده برای اعضای قاب خمشی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. جداسازهای لرزه‌ی از نوع جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی^۶، مطابق با جدول ۲ براساس آیین‌نامه‌ی ASCEY-۱۰^[۱۴] و محصولات تولیدی شرکت بریجستون^۷ طراحی شده‌اند.

همچنین برخی پژوهشگران در همان سال^[۱۰] اقدام به مطالعه و مقایسه‌ی سازه‌های فولادی جداسازی شده و سازه‌های فولادی متعارف برای دو شتاب‌نگاشت کوبه و ال‌سنتر کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از جداساز، موجب کاهش هزینه‌ی تعمیرات برای اعضای غیرسازه‌ی تا ۴۰٪/۵۰٪ نسبت به سازه‌های بدون جداساز می‌شود. در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۵)^[۱۱] نیز با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده برای شتاب‌نگاشت‌های یک منطقه، مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی و شتاب طبقات برای قاب‌های دو بُعدی محاسبه و در نهایت، خسارت سالیانه‌ی محتمل محاسبه شده است. در مطالعه‌ی مشابه نیز در سال ۲۰۱۶^[۱۲] عملکرد سازه‌های بلند قاب خمشی فولادی براساس خسارت ارزیابی شد. همچنین در همان سال، برخی دیگر از پژوهشگران سازه‌های با جداساز و میراگر و اسکوز (در تراز جداساز) را تحلیل هزینه سود کردند و با استفاده از مهندسی زلزله براساس عملکرد، روشی برای تخمین خسارت برای این سازه‌ها ارائه دادند.^[۱۳]

لذا جهت ارزیابی عملکرد مناسب سازه‌های جداسازی شده و بررسی امکان‌سنجی فنی و اقتصادی جداساز در سازه‌ها، باید بررسی شود که آیا هزینه‌ی اولیه‌ی قابل توجه سیستم مذکور در سازه‌ها به‌وسیله‌ی کاهش خسارت‌های لرزه‌ی در طول عمر مفید سازه جبران خواهد شد؟ و همچنین آیا تحلیل هزینه - سود، امکان مقایسه و امکان‌سنجی اقتصادی سازه‌های جداسازی شده با سازه‌های بدون جداساز را ممکن می‌سازد؟

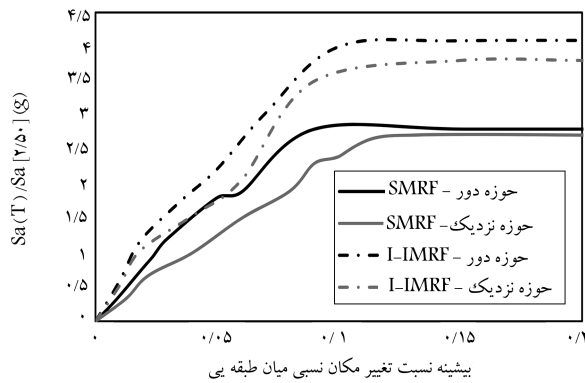
به این منظور در مطالعه‌ی حاضر به بررسی مشخصه‌های احتمالاتی عملکرد لرزه‌ی سازه‌ی فولادی جداسازی شده‌ی غیرکشسان تحت رکوردهای زمین‌لرزه‌ی حوزه‌های دور و نزدیک پرداخته و عملکرد سازه‌ی جداسازی شده با استفاده از روش برآورد خسارت ارزیابی شده است. در این راستا، یک سازه‌ی ۴ طبقه با کاربری اداری با رفتار غیرخطی همراه با جداساز به صورت سه بُعدی مدل‌سازی و عملکرد لرزه‌ی آن از دیدگاه فروریزش بررسی شده است. همچنین با استفاده از روش برآورد خسارت، میزان تلفات جانی و خسارت‌های مالی آن محاسبه و با مقادیر متناظر آن با سازه‌ی بدون جداساز تحت رکوردهای حوزه‌های دور و نزدیک مقایسه شده است. در نهایت، با استفاده از تحلیل هزینه - سود، امکان‌سنجی اقتصادی جداساز بررسی شده است.

۲. طراحی و فرضیات مدل سازی

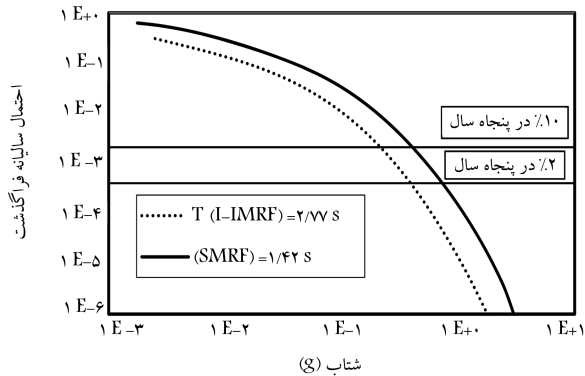
۲.۱. فرضیات طراحی

جهت ارزیابی عملکرد، یک ساختمان اداری ۴ طبقه (گروه ریسک لرزه‌ی III و ضریب اهمیت لرزه‌ی ۱٫۲۵) ($I = 1.25$) مطابق با آیین‌نامه‌ی ASCEY-۱۰ انتخاب شده است.^[۱۴] ارتفاع طبقه‌ی پایین مدل مذکور برابر با ۵٫۴ متر، ارتفاع تپ طبقات ۴٫۵ متر و فاصله‌ی بین ستون‌ها برابر ۹٫۱۵ متر در هر جهت بوده است. مطابق با شکل ۱، سیستم باربر جانبی توسط دو عدد قاب خمشی پیرامونی ۶ دهانه در جهت X و دو عدد قاب خمشی پیرامونی ۴ دهانه و یک قاب خمشی داخلی ۴ دهانه در جهت Y تأمین شده است.

مدل‌های اولیه‌ی سازه‌ی خمشی و سازه‌ی جداسازی شده، با استفاده از نرم‌افزار ETABS-۲۰۱۵^[۱۵] براساس آیین‌نامه‌ی AISC 360-۱۰^[۱۶] طراحی شده‌اند. ساختمان‌ها برای پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد (شتاب طیفی برای زمان تناوب یک ثانیه برابر با $0.733g$ و $S_1 = 0$ و برای زمان تناوب کوتاه برابر با $2.111g$) (S_s) و بر روی زمین سخت (با کلاس خاک D و سرعت موج برشی ۱۸۰ تا ۳۶۰ متر بر ثانیه) در نظر گرفته شده‌اند. مدل اولیه به صورت قاب خمشی ویژه (SMRF)^۴ و



شکل ۳. صدک ۵۰٪ منحنی های IDA برای کلیه ی مدل ها.

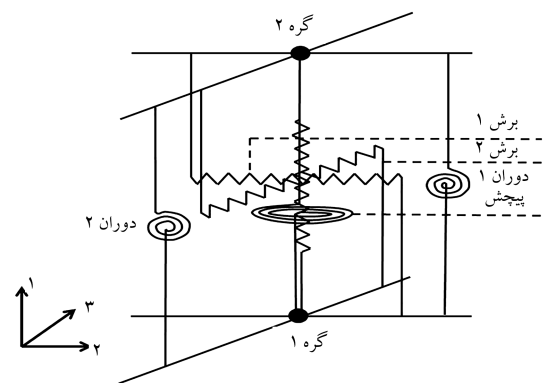


شکل ۴. منحنی های خطر برای مدل ها (محورها با مقیاس لگاریتمیک).

حوزه های دور و نزدیک ارائه شده است که در آن ها $T_1(s)$ زمان تناوب مد اول، $[Sa]_{collapse}$ شتاب طیفی فروریزش، $Sa_{2.5\%}[T_1]$ شتاب طیفی با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال، $P[C|SAMCE]$ احتمال فروریزش در بیشینه ی شتاب طیفی منظور شده، $\lambda_{collapse}$ احتمال سالیانه ی فروریزش که از انتگرال گیری منحنی شکنندگی فروریزش همراه با منحنی خطر ویژه ساخت گاه (شکل ۴) حاصل می شود، CMR نسبت حاشیه یی فروریزش که به صورت نسبت شتاب طیفی میانه ی فروریزش به شتاب طیفی با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال تعریف می شود و RDR_{col} و IDR_{Rcol} شاخص های مرتبط با شکل پذیری هستند که به ترتیب: معرف نسبت تغییر مکان جانبی نسبی بام و بیشینه ی نسبت تغییر مکان جانبی نسبی بین طبقه یی در فروریزش هستند.

شکل های ۵ و ۶ به ترتیب منحنی های شکنندگی فروریزش را برای مدل ها تحت زمین لرزه های حوزه های دور و نزدیک نشان می دهند، که در آن ها محور افقی با $Sa_{[2.5\%]}$ هم پایه شده است. احتمال فروریزش در بیشینه ی شتاب طیفی مورد نظر در محدوده ی ۲٪ الی ۱۳٫۸ درصد متغیر است.

$\lambda_{collapse}$ مطلوب ترین شاخص جهت مقایسه ی ایمنی فروریزش مدل هاست. با مراجعه به شکل ۴ مشاهده می شود که میانگین سالیانه ی فراوانی فراگذشت برای مدل با جداساز نسبت به مدل بدون جداساز کاهش یافته و در نتیجه کاربرد سیستم جداسازی منجر به $\lambda_{collapse}$ پایین تر و CMR بالاتر نسبت به سازی بدون جداساز شده است. همچنین سازه با جداساز در زمین لرزه های حوزه ی نزدیک، $\lambda_{collapse}$ بالاتر و CMR پایین تر در مقایسه با زمین لرزه های حوزه ی دور را دارد؛ بنابراین اثر بخشی جداسازی پایه در زمین لرزه های حوزه ی نزدیک از نقطه نظر فروریزش کاهش می یابد.



شکل ۲. مدل فیزیکی جداسازها در نرم افزار. [۲۱]

از نرم افزار OpenSees، [۱۷] جهت مدل سازی سازه ها استفاده شده است. با وجود تقارن پلان در هر دو جهت، به منظور مدل سازی پیش تصادفی، مرکزهای جرم به اندازه ۵٪ بعد در پلان در هر دو جهت جابه جا شده اند. قاب خمشی با استفاده از المان های حالت خمیری متمرکز به صورت مفصل خمیری در تیرها و ستون ها مدل سازی، [۱۸] و فنرهای دورانی در هر یک از دو انتهای عضو توسط مدل اصلاح شده ی ایبارا - مدینا - کراوینکار (IMK) تعریف شده اند. [۱۹] روابط تنش - کرنش و لنگر - انحناء فولاد به صورت دو خطی همراه با یک نسبت سخت شونده ی کرنشی ۳٪ فرض شده اند. اتلاف انرژی با استفاده از میرایی متناسب با سختی به گونه یی لحاظ شده است که میرایی ۲٫۵٪ را در نخستین مد بسامد مرتبط آن ها به دست دهد. [۲۰] جداسازها زیر هر ستون، با استفاده از المان LeadRubberX در نرم افزار OpenSees مدل شده اند. این مدل فیزیکی مطابق با شکل ۲ به عنوان یک المان دو گره یی با ۱۲ درجه آزادی در نظر گرفته شده است. دو گره مذکور با ۶ فنر که رفتار مکانیکی را در ۶ جهت اصلی یک تکیه گاه به نمایش می گذارند، اتصال یافته اند. [۲۱]

۲.۲. انتخاب رکوردها

فرایند ارزیابی عملکرد، نیازمند مجموعه یی از رکوردهای زلزله است، که بتوانند جهت تحلیل دینامیکی فزاینده ی (IDA) ساختمان ها به کار آیند. [۲۲] در مطالعه ی حاضر، مجموعه ی رکوردهای حوزه ی دور شامل ۲۲ جفت رکورد (۴۴ مؤلفه ی منفرد) و مجموعه ی رکوردهای حوزه ی نزدیک نیز شامل ۲۸ جفت رکورد (۵۶ مؤلفه ی منفرد) بوده است که از پایگاه داده PEER NGA براساس آیین نامه ی FEMA P-۶۹۵ انتخاب شده اند. [۲۳] همچنین $S_a(T_1, 0.5)$ به عنوان شتاب طیفی در زمان تناوب مود اول همراه با ۵٪ میرایی برای نمایش شاخص شدت انتخاب شده است.

۳. نتایج ارزیابی فروریزش

تحلیل دینامیکی فزاینده شامل چند تحلیل تاریخچه ی پاسخ برای رکوردهای مشخص با افزایش شدت رکورد تا زمانی است که فروریزش رخ دهد. فروریزش در محاسبات عددی زمانی رخ می دهد که ناپایداری عددی یا صاف شدگی نمودارهای IDA به وجود آمده و یا نسبت تغییر مکان جانبی نسبی میان طبقات از ۱۰٪ بیشتر شود. [۲۴] صدک ۵۰٪ منحنی های IDA برای کلیه ی مدل ها در شکل ۳ نمایش داده شده است که در آن محور قائم با $Sa_{[2.5\%]}$ هم پایه شده است. در جدول های ۳ و ۴ به ترتیب نتایج ارزیابی فروریزش برای زمین لرزه های

جدول ۳. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده برای مدل‌ها تحت رکوردهای حوزه‌ی دور.

مدل	$T_1(s)$	$[S_a]_{collapse}$	$Sa_{\tau,50}[T_1]$	$P[C Sa_{MCE}]$	$\lambda_{collapse} \times [10^{-4}]$	CMR	RDR_{col}	IDR_{col}
SMRF	۱٫۴۲	۱٫۷۸	۰٫۷۴۹	۰٫۱۲۵	۰٫۹۴۳	۲٫۳۸	۰٫۰۴۳	۰٫۰۴۳
I-IMRF	۲٫۷۷	۱٫۶۴	۰٫۳۹۴	۰٫۰۰۲	۰٫۱۵۷	۴٫۱۶	۰٫۰۳۲	۰٫۰۳۴

جدول ۴. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده برای مدل‌ها تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک.

مدل	$T_1(s)$	$[S_a]_{collapse}$	$Sa_{\tau,50}[T_1]$	$P[C Sa_{MCE}]$	$\lambda_{collapse} \times [10^{-4}]$	CMR	RDR_{col}	IDR_{col}
SMRF	۱٫۴۲	۱٫۶۹	۰٫۷۴۹	۰٫۱۳۸	۱٫۵۰۷	۲٫۲۶	۰٫۰۶۱	۰٫۰۶۲
I-IMRF	۲٫۷۷	۱٫۴۵	۰٫۳۹۴	۰٫۰۰۴۹	۰٫۲۹۶	۳٫۶۸	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۵

۱-۵۸-P-FEMA^[۲۰] جهت ارزیابی تلفات مالی و جانی استفاده شده است. روش PACT، مبتنی بر منحنی‌های شکنندگی جهت تعریف خرابی‌های حاصل از زلزله به اجزاء سازه‌ی و غیرسازه‌ی است. منحنی‌های شکنندگی، توابع توزیع احتمالاتی هستند که با داشتن پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) مانند تغییر مکان جانبی نسبی، شتاب یا سرعت ایجاد شده در هر طبقه توسط زلزله، احتمال فراگذشت یک حالت خرابی خاص را در جزء مرتبط به دست می‌دهند ($P[DM|EDP]$). با داشتن حالت‌های خرابی و به‌کارگیری توابع پیامد در شکل توابع توزیع متغیرهای تصمیم (DV)^{۱۰}، به‌عنوان خسارت‌های محتمل مالی و جانی می‌توانند ارزیابی شوند ($P[DV|DM]$) با استفاده از قضیه‌ی کلی احتمال، نرخ میانگین وقوع سالیانه‌ی متغیر تصمیم $\lambda[DV]$ را می‌توان با انتگرال‌گیری $P[DV|DM]$ ، $P[DM|EDP]$ و $P[EDP|IM]$ حاصل از تحلیل سازه‌ی و میانگین سالیانه‌ی فراگذشت معیار شدت $\lambda[IM]$ به‌طور هم‌زمان به دست آورد (رابطه‌ی ۱):^[۳۱]

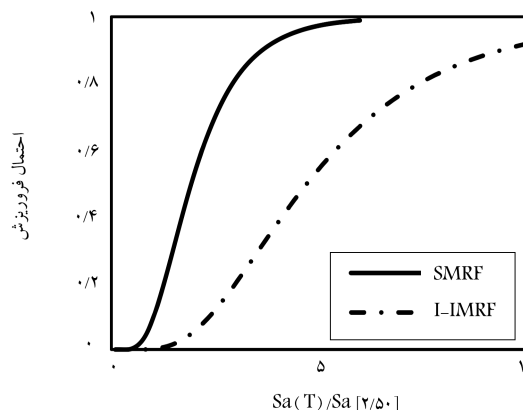
$$[DV] = \iiint P(DV|DM)P(DM|EDP)P(EDP|IM).\lambda(IM).dDM.dEDP.DIM \quad (۱)$$

متغیرهای تصمیم در مطالعه‌ی حاضر به صورت خسارت‌های مالی سالیانه‌ی موردانتظار (EAL)^{۱۱}، تلفات جانی سالیانه‌ی موردانتظار (EAF)^{۱۲} تعریف شده‌اند. از آنجا که پارامترهای موردانتظار سالیانه، تلفات مالی و جانی را در سطوح مختلف شدت و نیز احتمال وقوع آن‌ها را لحاظ می‌کنند، جامع‌ترین شاخص‌ها برای مقایسه‌ی عملکرد سازه‌های مختلف هستند. مقادیر سالیانه‌ی میانگین در مطالعات هزینه - سود و برای تعیین مقادیر مالی بیمه در ساختمان‌ها مفید هستند. این مقادیر با انتگرال‌گیری نمودار متغیر تصمیم موردانتظار $E(DV)$ در برابر شدت، همراه با منحنی خطر ویژه ساخت‌گاه به دست می‌آیند. رابطه‌ی میان $E(DV)$ به شرط IM ، با توابع آسیب‌پذیری برقرار می‌شود. باید متذکر شد که کمی‌سازی شاخص‌های عملکرد دقیق نیست و بنابراین باید از چارچوب احتمالاتی استفاده کرد. مطابق با قضیه‌ی احتمالاتی، خسارت‌های مالی و جانی نهایی را می‌توان از رابطه‌ی ۲ با توجه به دو حالت محتمل، فروریزش (C) و عدم فروریزش (NC) به دست آورد:

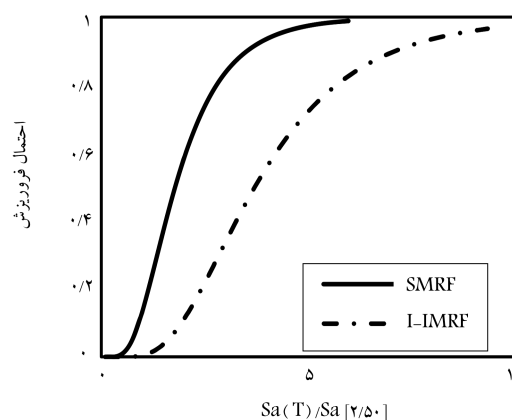
$$E(DV|IM) = E(DV|IM\&NC) \times (1 - P(C|IM)) + E(DV|IM\&C) \times P(C|IM) \quad (۲)$$

با به‌کارگیری توابع آسیب‌پذیری، مقدار EAL، به صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$EAL = \lambda_0 \iiint E[RC|IM]P[IM|IM \geq im_0]dIM \quad (۳)$$



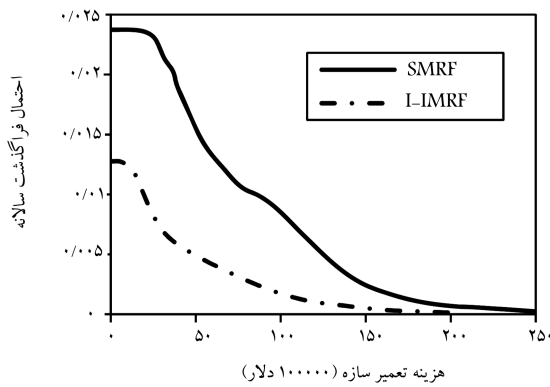
شکل ۵. منحنی‌های شکنندگی فروریزش برای رکوردهای حوزه‌ی دور.



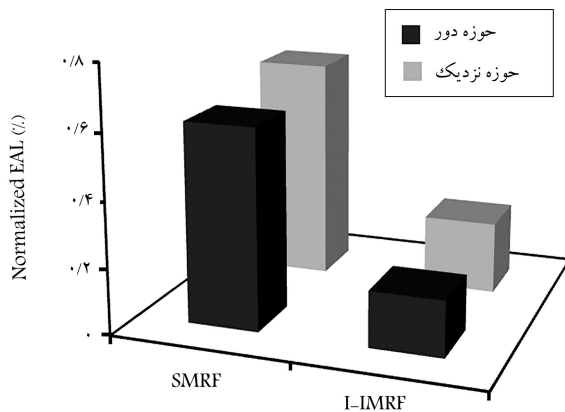
شکل ۶. منحنی‌های شکنندگی فروریزش برای رکوردهای حوزه‌ی نزدیک.

۴. برآورد خسارت حاصل از زلزله

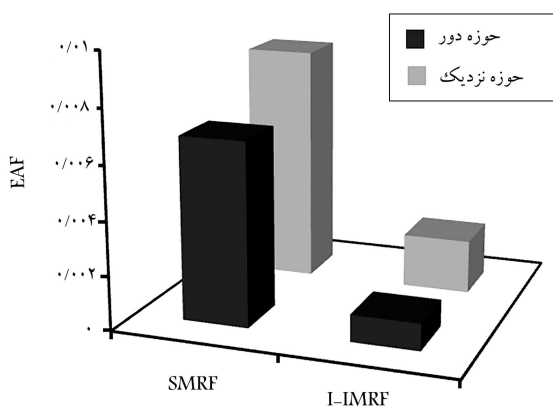
ارزیابی فروریزش برای مقایسه‌ی عملکرد لرزه‌ی در سازه‌ها کافی نیست، زیرا تغییرات در شتاب‌ها، سرعت‌ها، تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، مغایرت در تعداد ساکنان و توزیع آن‌ها، نوع و هزینه‌ی اقلام و اجزاء موجود موجب می‌شود که ساختمان‌ها حتی با عملکرد فروریزش یکسان، دچار تلفات در سطوح مختلف مالی و جانی در زلزله‌ها شوند.^[۲۵] ابزار محاسبه‌ی ارزیابی عملکرد (PACT)^[۲۶] در ارزیابی عملکرد لرزه‌ی و برآورد خسارت ساختمان‌ها کاربرد فراوانی دارد.^[۲۵، ۲۷-۲۹] و در مطالعه‌ی حاضر از نرم‌افزار PACT (نسخه‌ی ۲) و رویکرد برآورد خسارت PBSD در آیین‌نامه‌ی



شکل ۷. منحنی احتمال فراگذشت سالیانه هزینه تعمیر سازه برای رکوردهای حوزه دور.



شکل ۸. خسارت‌های مالی سالیانه موردانتظار (EAL) هم‌پایه شده، برای مدل‌های تحت زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک.



شکل ۹. تلفات سالیانه موردانتظار (EAF) برای مدل‌های تحت زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک.

ایجاد شده در یک ساختمان در طی یک زلزله در رابطه‌ی مستقیم با EDP ‌های توسعه‌یافته در المان‌های سازه‌ی و غیرسازه‌ی هستند. مقادیر تقاضا با استفاده از سیستم جداسازی به شکلی قابل ملاحظه کاهش می‌یابند و در نتیجه، خسارت‌های مالی نیز کاهش می‌یابند. ۲. EAL عمدتاً متأثر از آسیب المان‌های غیرسازه‌ی در شتاب‌های طیفی پائین همراه با فراوانی فراگذشت بالاست و کمتر تحت تأثیر شتاب‌های طیفی بالا و فروریزش ساختمان‌ها قرار می‌گیرد.^[۳۴] بنابراین، مقادیر

که در آن، λ_0 نرخ میانگین سالیانه رویدادها با $IM \geq im_0$ است یک رویداد آستانه است که تحت آن EAL یا EAF ناچیز در نظر گرفته می‌شوند و در مطالعه‌ی حاضر به صورت ۲٪ شدت فروریزش لحاظ شده و $P[IM|IM \geq im_0]$ احتمال شرطی وقوع IM است.^[۲۶]

۱.۴. فرضیات برآورد خسارت

پیش از انجام برآورد خسارت، برخی فرضیات لازم با توجه به اجزاء قابل آسیب، تعداد و هزینه‌های آن‌ها و توزیع افراد ساکن باید صورت‌گیرند. در جدول ۵، فهرست مؤلفه‌های قابل آسیب لحاظ شده در مطالعه‌ی حاضر و توابع مرتبط شکنندگی و حالت‌های شکست براساس طبقه‌بندی (NISTIR)^[۳۱] ارائه شده است. به‌منظور برآورد تعداد محتمل افراد ساکن در زمان وقوع زلزله، از مدل جمعیتی ساختمان‌های اداری موجود در PACT استفاده شده است.

جهت ارزیابی هزینه‌ی جایگزینی هر یک از اجزاء سازه‌ی و غیرسازه‌ی، می‌توان از ابزار محاسبه‌ی هزینه‌ی R.S. Square Foot Costs استفاده کرد.^[۳۳] بر این اساس هزینه‌های جایگزینی کل که شامل هزینه‌ی اجزاء سازه‌ی (طراحی، نظارت و اجرا) و اجزاء غیرسازه‌ی اشاره‌شده در جدول ۵ است، برای $SMRF$ و $I-IMRF$ به ترتیب برابر ۳۵/۸ و ۳۰/۶ میلیون دلار برآورد شده‌اند.

مودهای فروریزش راه‌ها و شکل‌های محتمل را که سازه‌ی مستعد فروریزش در آن است، نشان می‌دهند.^[۳۰] در مطالعه‌ی حاضر، ۴ مود فروریزش در نظر گرفته شده است: ۱. فروریزش کلی در همه‌ی طبقات، ۲. فروریزش طبقه‌ی دوم به روی طبقه‌ی اول، ۳. فروریزش طبقه‌ی سوم به روی طبقه‌ی دوم، ۴. فروریزش طبقه‌ی چهارم به روی طبقه‌ی سوم. در صورتی که مود اول اتفاق بیفتد، بیشینه‌ی خسارت‌های مالی و جانی رخ می‌دهد، در حالی که سایر مودها موجب خسارت‌های مالی و جانی کمتری می‌شوند. احتمال وقوع هر یک از حالت‌های فوق باید براساس قضاوت مهندسی تعیین شود. در ضمن مجموع احتمال وقوع کلیه‌ی مودها باید برابر با ۱ باشد. احتمال وقوع مود اول در سازه‌ها نسبت به سایر مودها، که نوعی از خرابی پیش‌رونده هستند، بیشتر است. بدین ترتیب احتمال فروریزش مود اول برابر با ۵۵٪ و سایر مودها برابر با ۱۵٪ فرض شده است.

۵. برآورد خسارت

شکل ۷، منحنی احتمال فراگذشت سالیانه‌ی خسارت‌های مالی (هزینه‌ی تعمیر سازه) مدل‌ها را تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور نمایش می‌دهد، که گویای تأثیر جداسازی در کاهش هزینه‌ی تعمیرات سازه است. خسارت‌های مالی سالیانه‌ی موردانتظار (EAL) که با هزینه‌ی جایگزینی کل هم‌پایه شده‌اند، در شکل ۸ و مقادیر تلفات جانی سالیانه‌ی موردانتظار (EAF) در شکل ۹ برای مدل‌های تحت رکوردهای حوزه‌های دور و نزدیک با یکدیگر مقایسه شده‌اند. خسارت‌های مالی سالیانه‌ی موردانتظار (EAL) هم‌پایه شده برای مدل‌ها در محدوده‌ی ۰/۱۷٪ الی ۰/۶۸٪ تغییر می‌کند. بیشینه‌ی مقدار EAL برای $SMRF$ در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک و مقدار کمینه‌ی برای $I-IMRF$ در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی دور است.

مشاهده می‌شود که EAL به شکلی قابل ملاحظه در صورت استفاده از سیستم جداسازی، کاهش می‌یابد. میزان این کاهش تحت اثر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی دور، برابر با ۷۲٪ و تحت اثر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، برابر با ۶۷٪ است. کاهش مذکور در مقادیر EAL در نتیجه‌ی ۳ عامل است: ۱. خسارت‌های مالی

جدول ۵. اجزاء قابل آسیب فرض شده و توابع آن.

میانگین خرابی (EDP)	حالات خرابی	EDP	نام جزء
٪۴ ٪۸	تسلیم شدن پارگی	* IDR	اتصالات مفصلی
٪۴ ٪۷ ٪۱۰	ترک اولیه گسترش ترک‌ها شکست	IDR	ورق پای ستون
٪۴ ٪۷ ٪۱۰	ترک در جوش شکست در جان شکست کامل	IDR	وصاله‌ی ستون
٪۳ ٪۴ ٪۵	کمانش محلی کمانش جانبی شکست خستگی	IDR	اتصال‌های خمشی
٪۰٫۲۵ ٪۰٫۵۲ ۲٫۵۲	ترک جدایشگی شکست	IDR	دیوارهای پیرامونی
٪۰٫۲۱ ٪۰٫۷۱ ٪۱٫۲	ترک کم ترک متوسط ترک شدید	IDR	دیوارهای داخلی
۰٫۳۵ g ۰٫۵۵ g ۰٫۸ g	٪۰٫۵ خرابی ٪۰٫۳ خرابی فروریزش	** PFA	سقف کاذب
۰٫۴ g	شکست	*** PGA	آسانسور
۲٫۲۵ g ۴٫۱ g	سوراخ شدگی شکست لوله	PFA	لوله‌کشی آب سرد
۰٫۵۵ g ۱٫۱ g	سوراخ شدگی شکست لوله	PFA	لوله‌کشی آب گرم
۱٫۵ g ۲٫۲۵ g	شکست نگه‌دارنده‌ها فروریزش	PFA	داکت
۰٫۵ g ۰٫۵ g ۰٫۷ g ۰٫۴ g	غیرقابل استفاده غیرقابل استفاده غیرقابل استفاده غیرقابل استفاده	PFA	چپار برج خنک‌کن فن رایانه و سرور
۰٫۲۵ m/s ۰٫۵۲ m/s	فروریزش فروریزش	**** PFV PFV	مخزن‌های کتاب کمد و کابینت

* Interstory Drift Ratio ** Peak Floor Acceleration *** Peak Ground Acceleration

**** Peak Floor Velocity

$$NPV = A \times \left(\frac{1 - \frac{1}{(1+i)^t}}{i} \right) \quad (4)$$

که در آن، A کل کاهش در مقادیر خسارت سالیانه، t زمان در واحد سال و i نرخ سود است. جهت سهولت در تحلیل هزینه - سود از تلفات جانی سالیانه‌ی مورد انتظار (EAF) صرف‌نظر شده است. باید توجه داشت که در مطالعه‌ی حاضر، استفاده از سیستم جداساز موجب افزایش هزینه‌ها به مقدار ۵/۲ میلیون دلار شده است و با در نظر گرفتن نرخ سود ۷٪، شکل ۱۰ ارزش خالص فعلی (NPV) در طی سال‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از سیستم جداساز، مدت زمان بازگشت هزینه در زلزله‌های حوزه‌ی دور، ۱۴ سال و برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، ۱۸ سال است.

۷. نتیجه‌گیری

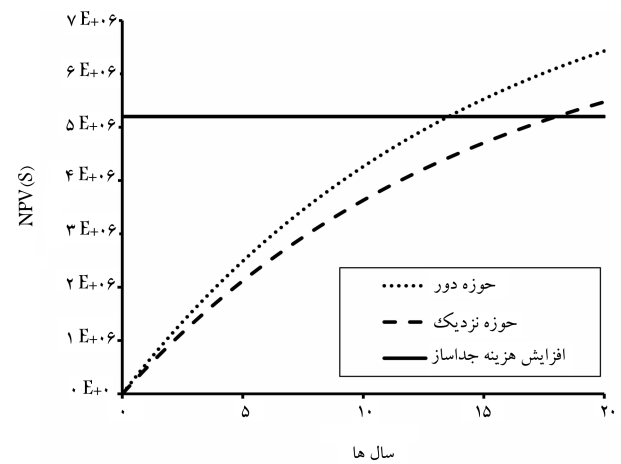
مطالعه‌ی حاضر به بررسی مشخصه‌های احتمالاتی عملکرد لرزه‌ی سازی جداسازی شده‌ی غیرکشنان تحت رکوردهای زمین لرزه‌ی حوزه‌های دور و نزدیک، و همچنین ارزیابی عملکرد سازی جداسازی شده با استفاده از روش برآورد خسارت پرداخته است. روش برآورد خسارت لرزه‌ی سازی به ترکیب خطر لرزه‌ی سازی، پاسخ سازه‌ی سازی و پیامدهای آن جهت کمی‌سازی ریسک لرزه‌ی سازی براساس عملکرد لرزه‌ی ساختمان پرداخته است. همچنین مزیت استفاده از روش مذکور، روشی مؤثر و کارا جهت ارزیابی سازه‌های جداسازی شده بر حسب برآورد خسارت و تعیین منطقی مقادیر خسارت‌های مالی و جانی سازه‌هاست.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که استفاده از جداسازی لرزه‌ی سازی، احتمال فروریزش در روسازه‌ها را به طور قابل ملاحظه کاهش می‌دهد و می‌تواند در کاهش ریسک لرزه‌ی سازی اثر بخش باشند. مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از سیستم جداسازی، EAL به شکلی قابل ملاحظه کاهش می‌یابد. میزان این کاهش تحت اثر زمین لرزه‌های حوزه‌ی دور، برابر با ۷۲٪ و تحت اثر زمین لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، برابر با ۶۷٪ است. علت این امر کاهش مقادیر تقاضا و در نتیجه کاهش آسیب به اعضاء سازه‌ی سازی و غیرسازه‌ی سازی و همچنین کاهش میزان خطر لرزه‌ی سازی در سازه‌های جداسازی شده است. همچنین اثربخشی جداسازی لرزه‌ی سازی در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه‌ی دور با رویکرد خسارت کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش پارامترهای تقاضا در رکوردهای ذکر شده و همچنین امکان افزایش شتاب طیفی در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در زمان تناوب بالاست.

از پارامترهای خسارت، همانند خسارت‌های مالی سالیانه‌ی موردانتظار (EAL) می‌توان برای مطالعات تحلیل هزینه - سود استفاده کرد. این تحلیل بیانگر توجه اقتصادی استفاده از سیستم جداساز با توجه به هزینه‌ی اولیه‌ی قابل توجه سیستم‌های مذکور است. تحلیل هزینه - سود، شامل مقایسه بین ارزش خالص فعلی (NPV) هزینه‌های میانگین سالیانه در برابر هزینه‌های اولیه‌ی سیستم جداساز است. مشاهده شده است که در صورت استفاده از سیستم جداساز، مدت زمان بازگشت هزینه در زلزله‌های حوزه‌ی دور، ۱۴ سال و برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، ۱۸ سال است.

پانویس‌ها

1. performance-based seismic design



شکل ۱۰. ارزش خالص فعلی (NPV) برای سازی با جداساز در زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک.

کمتر EDP در شتاب‌های طیفی با بیشترین آسیب و تکرار، دلیل اصلی کاهش EAL در آسیب‌های ناشی از زلزله هستند. ۳. به علاوه کاهش قابل ملاحظه در میزان خطر زلزله، منبع دیگر کاهش EAL برای مدل $I - IMRF$ است. تلفات جانی سالیانه‌ی موردانتظار (EAF) تابع عواملی از قبیل: عملکرد فروریزش سازه، کیفیت اجرا، گنجایش ساختمان، و زمان رخدادن زلزله و توانایی گروه‌ها و امداد‌های اضطراری در پاسخ سریع به رویداد زلزله است. فروریزش سازه‌ها، منشاء اصلی تلفات جانی است و نیز نخاله‌های حاصل از افتادن بخش‌هایی از اجزاء سازه‌ی سازی و غیرسازه‌ی سازی دیده می‌توانند منجر به جراحات جدی یا حتی مرگ شوند. اما در مطالعه‌ی حاضر فرض شده است که تلفات انسانی ناشی از زلزله فقط ناشی از فروریزش سازه‌ی سازی هستند. مقادیر EAF نشان داده شده در شکل ۹، اهمیت جداسازی لرزه‌ی سازی از نقطه‌نظر کاهش تلفات جانی به خوبی مشاهده می‌شود. همچنین در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، تأثیر عملکردی جداسازها کاهش می‌یابد، زیرا به دلیل افزایش پارامترهای تقاضا در رکوردهای مذکور و همچنین امکان افزایش شتاب طیفی در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در زمان تناوب بالا، مقدار EAL و EAF در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک افزایش می‌یابند.

۶. تحلیل هزینه - سود

از پارامترهای خسارت همانند خسارت‌های مالی سالیانه‌ی موردانتظار (EAL) می‌توان برای مطالعات تحلیل هزینه - سود استفاده کرد. تحلیل هزینه - سود بیانگر توجه اقتصادی استفاده از سیستم جداساز با توجه به هزینه‌ی اولیه‌ی قابل توجه سیستم‌های مذکور است. تحلیل هزینه - سود شامل مقایسه بین ارزش خالص فعلی (NPV) هزینه‌های میانگین سالیانه در برابر هزینه‌های اولیه‌ی سیستم جداساز است. ارزش خالص فعلی براساس رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود: [۳۰]

2. decision-making
3. maximum credible earthquake
4. special moment-resisting frame
5. isolated-intermediate moment-resisting frame

6. lead rubber bearing (LRB)
7. Bridgestone®
8. ibarra-medina-krawinkler
9. engineering demand parameter
10. decision variable
11. expected annual loss
12. expected annual fatalities
13. net present value

منابع (References)

1. Morgan, T.A. and Mahin, S.A. "The use of base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives", Report No. 2011/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, California (2011).
2. Das, S., Gur, S., Mishra, S.K. and et al. "Optimal performance of base isolated building considering limitation on excessive isolator displacement", *Struct. Infrastruct. Eng.*, **11**(7), pp. 904-917 (2015).
3. Naeim, F. and Kelly, J.M., *Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice*, John Wiley and Sons, California (1999).
4. Goda, K., Lee, C.S. and Hong, H.P. "Lifecycle cost-benefit analysis of isolated buildings", *Struct. Saf.*, **32**(1), pp. 52-63 (2010).
5. FEMA. "Seismic Performance Assessment of Buildings, volume 1-methodology", FEMA P-58-1, Washington, D.C. (2012).
6. Krawinkler, H., Zareian, F., Medina, R.A. and et al. "Decision support for conceptual performance-based design", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **35**(1), pp. 115-133 (2006).
7. Williams, R.J., Gardoni, P. and Bracci, J.M. "Decision analysis for seismic retrofit of structures", *Struct. Saf.*, **31**(2), pp. 188-196 (2009).
8. Lashgari, M. "Comparative study of base-isolated and fixed-base buildings using a damage/cost approach", Doctoral Dissertation, College of Engineering at the University of Nebraska, United States (2014).
9. Chimamphant, S. and Kasai, K. "Comparative response and performance of base-isolated and fixed-base structures", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **45**(1), pp. 5-27 (2015).
10. Romano, F., Faggella, M., Gigliotti, R. and et al. "Components fragility functions and comparative seismic risk analysis of an older R/C building based on FEMA P-58", XVI Convegno ANIDIS Ingegneria Sismica in Italia, L'Aquila, Italy (Sept. 13-17, 2015).
11. Dong, Y. and Frangopol, D. "Performance-based seismic assessment of conventional and base-isolated steel buildings including environmental impact and resilience", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **45**(5), pp. 739-756 (2016).
12. Hutt, C.M., Almufti, I., Willford, M. and et al. "Seismic loss and downtime assessment of existing tall steel-framed buildings and strategies for increased resilience", *J. Struct. Eng.*, **142**(8), 12 p. (2016).
13. Banazadeh, M., Gholhaki, M. and Parvini Sani, H. "Cost-benefit analysis of seismic-isolated structures with viscous damper based on loss estimation", *Structure Infrastructure Engineering*, pp.1-11, DOI:10.1080/15732479.2016.1236131 (2016).
14. ASCE (American Society of Civil Engineering), "Minimum design loads for buildings and other structures", ASCE/SEI 7-10, Reston, Virginia, (2010).
15. ETABS 2015, "Analysis reference manual, computers and structures Inc.", Berkeley (CA, USA) (2015).
16. AISC (American Institute of Steel Construction), "Specification for structural steel buildings", ANSI/AISC 360-10, Chicago, IL (2010).
17. OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (Available from: <http://opensees.berkeley.edu>) (2015).
18. Kazantzi, A.K., Vamvatsikos, D. and Lignos, D.G. "Seismic performance of a steel moment-resisting frame subject to strength and ductility uncertainty", *Eng. Struct.*, **78**, pp. 69-77 (2014).
19. Lignos, D.G. and Krawinkler, H. "Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading", *J. Struct. Eng.*, **137**(11), pp. 1291-1302 (2010).
20. Sayani, P.J., Erduran, E. and Ryan, K.L. "Comparative response assessment of minimally compliant low-rise base-isolated and conventional steel moment-resisting frame buildings", *J. Struct. Eng.*, **137**(10), pp. 1118-1131 (2010).
21. Kumar, M., Whittaker, A.S. and Constantinou, M.C. "An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **43**(13), pp. 1955-1974 (2014).
22. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **31**(3), pp. 491-514 (2002).
23. FEMA (Federal Emergency Management Agency), "Quantification of building seismic performance factors", FEMA P695, Washington, DC (2009).
24. Baker, J.W. "Probabilistic structural response assessment using vector-valued intensity measures", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **36**(13), pp. 1861-1883 (2007).
25. Shokrabadi, M., Banazadeh, M., Shokrabadi, M. and et al. "Assessment of seismic risks in code conforming reinforced concrete frames", *Eng. Struct.*, **98**, pp. 14-28 (2015).
26. PACT (Performance Assessment Calculation Tool), Applied Technology Council, Redwood City, California (2012).
27. Banazadeh, M., Parvini Sani, H. and et al. "Decision-Making analysis for seismic retrofit based on risk management", *Asian J. Civil Eng.*, **14**(5), pp. 735-746 (2013).
28. Erberik, M.A. and Elnashai, A.S. "Loss estimation analysis of flat-slab structures", *Nat. Hazards Rev.*, **7**(1), pp. 26-37 (2006).

29. Parvini Sani, H., Gholhaki, M. and Banazadeh, M. "Seismic performance assessment of isolated low-rise steel structures based on loss estimation", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **31**(4):04017028, DOI: 10.1061/(ASCE CF.1943-5509.0001028 (2017).
30. FEMA (Federal Emergency Management Agency), "Seismic performance assessment of buildings, volume 1-methodology", FEMA P-58-1, Washington, DC (2012).
31. Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V. "Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering", CRC press, Boca Raton (2004).
32. Charette, R.P. and Marshall, H.E. "UNIFORMAT II elemental classification for building specifications, cost estimating, and cost analysis", Report No.6389, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland (1999).
33. Dyanati, M., Huang, Q. and Roke, D. "Life cycle cost-benefit evaluation of self-centering and conventional concentrically braced frames", *12th Int. Conf. Applications of Statistics and Probability in Civil Eng.*, Vancouver, Canada, Paper No:424 (July 12-15, 2015).
34. Mitrani-Reiser, J. "An ounce of prevention: probabilistic loss estimation for performance-based earthquake engineering", Doctoral Dissertation, California Institute of Technology, United States (2007).