

تحلیل هزینه - فایده‌ی ساخت و بازسازی قاب‌های فولادی مهاربندی شده دارای میان‌قاب با استفاده از منحنی‌های شکنندگی خسارت لرزه‌یی

معصومه احمدی بازوکی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حمزه شکیب* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

پرستو محمدی (استادیار)

گروه مهندسی اقتصادی - اجتماعی، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۴ (ص. ۵۱-۵۹)
دربی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۵۱-۵۹

هزینه‌ی سازه شامل مجموع هزینه‌های ساخت به علاوه‌ی هزینه‌های مربوط به بازسازی خسارت ناشی از زلزله، نگهداری و مدیریت سازه در طول عمر مفید آن است. ساخت سازه در سطوح عملکرد مختلف از لحاظ هزینه متفاوت است. در این نوشتار، برخی معیارهای طراحی برای عملکرد مناسب ساختمان با مقایسه‌ی هزینه‌های ساخت و بازسازی خسارت ناشی از زلزله در سطوح عملکرد مختلف توسعه داده شده است. سازه‌های مورد مطالعه، قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب با مهاربندی X هستند. با انجام تحلیل دینامیکی فزاینده، سطوح عملکرد روی منحنی‌های IDA تعیین و سپس با استفاده از توابع شکنندگی، منحنی احتمال تجاوز سازه از سطح عملکرد طراحی به دست آمده است. همچنین برای بررسی اثر میان‌قاب در رفتار احتمالاتی سازه، منحنی‌های شکنندگی قاب‌های طراحی شده در حالت حذف میان‌قاب نیز تولید شده است. تخمین خسارت و ارزیابی اقتصادی قاب‌های دارای میان‌قاب به روش «نسبت منافع به مخارج» انجام شده است، که نشان می‌دهد در شرایط اقتصادی موجود، انتخاب سطح عملکرد مطلوب‌تر، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است و نتایج حساسیت‌چندانی به تغییرات کمینه‌ی نرخ جذب و عمر مفید سازه ندارد.

واژگان کلیدی: تحلیل هزینه‌ی فایده، قاب‌های فولادی مهاربندی شده دارای میان‌قاب، تحلیل دینامیکی فزاینده، منحنی شکنندگی.

۱. مقدمه

طراحی عملکرد لرزه‌یی سازه‌ها نیازمند مطالعات اقتصادی و فنی دقیق است. ملاحظات اقتصادی در طراحی عملکرد لرزه‌یی سازه‌ها نخستین دلیل لزوم ترکیب علم اقتصاد و مهندسی سازه است. تصمیم‌گیری و امکان‌سنجی طراحی و ساخت سازه‌ها در سطوح عملکرد مختلف باید بر پایه‌ی محاسبه‌ی هزینه‌های مالی باشد. یکی از روش‌های رایج در ارزیابی‌های اقتصادی، به‌کارگیری نسبت منافع به مخارج مورد انتظار جهت ساخت و ساز طرح است.

سازه‌های ساختمانی متشکل از اجزاء سازه‌یی و غیرسازه‌یی هستند، سطح عملکرد سازه با توجه به اثر توأم اجزاء سازه‌یی و غیرسازه‌یی تعیین می‌شود. یکی از رایج‌ترین فرم‌های ساختمان در کشور ما قاب سازه‌یی بتنی یا فولادی است، که درون آن با دیوارهای مصالح بتابی پر می‌شود. این دیوار در اصطلاح میان‌قاب

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۱۷، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۲۶

نماید می‌شود. علی‌رغم نقش سازه‌یی میان‌قاب‌ها، آنها را جزء اجزاء غیرسازه‌یی دسته‌بندی می‌کنند و در طراحی اولیه‌ی ساختمان‌ها نادیده می‌گیرند. در بسیاری موارد، میان‌قاب‌ها بهبود قابل توجهی در عملکرد سازه در هنگام زلزله ایجاد و در عین حال به قاب محیطی خود سختی اضافه تحمیل می‌کنند، در نتیجه هنگام زلزله ساختمان‌های دارای سیستم باربر سازه‌یی سهم بیشتری را از نیروی دینامیکی جذب می‌کنند. در این ساختمان‌ها نادیده‌گرفتن میان‌قاب‌ها می‌تواند در جهت عدم ایمنی و عدم اطمینان عملکرد سازه باشد. بدیهی است بسته به ویژگی‌های طیفی زلزله، طراحی رفتار دینامیکی این دو سیستم (قاب خالی و قاب دارای میان‌قاب) می‌تواند کاملاً متفاوت باشد.

در پژوهشی در سال ۲۰۰۰، مطالعه‌ی تحلیلی بر روی عملکرد لرزه‌یی قاب‌های دارای میان‌قاب انجام شد و این نتیجه به دست آمد که دخالت‌دادن اثر میان‌قاب‌ها در تحلیل قاب‌های مرکب موجب افزایش سختی آنها تا ۴۴٪ می‌شود.^[۱] در پژوهش دیگری با انجام مطالعات آزمایشگاهی نشان داده شد که در اثر میان

جدول ۱. مشخصات رکوردهای مورد استفاده.

ردیف	رخداد	ایستگاه	سال	فاصله (Km)	بزرگا (M_w)	PGA (g)
۱	Cape Mendocino	Rio	۱۹۹۲	۲۳٫۶	۷٫۱	۰٫۵۴۹
۲	Duzce	Lamont ۳۶۲	۱۹۹۹	۲۷٫۴	۷٫۱	۰٫۲۶
۳	Loma prieta	Anderson dam	۱۹۸۹	۱۹٫۹	۶٫۹	۰٫۲۴
۴	Northridge	Canyon Country	۱۹۹۴	۲۳٫۷	۶٫۷	۰٫۲۲۲
۵	San Fernando	Castaic	۱۹۷۱	۲۴٫۹	۶٫۶	۰٫۲۶۸
۶	Imperial valley	Chihuahua	۱۹۷۹	۲۸٫۷	۶٫۵	۰٫۲۷۶
۷	Morgan Hill	Gilroy	۱۹۸۴	۱۵٫۱	۶٫۲	۰٫۲۱۲

عمر مفید سازه در سطوح عملکرد مختلف، سطوح عملکرد بهینه، که هم معیارهای سازه‌ی و هم معیارهای اقتصادی را تأمین می‌کنند، معرفی شود.

۲. حرکت زمین

برای ارزیابی نیاز لرزه‌ی سازه‌های طراحی شده در سطوح عملکرد مختلف از رکوردهای واقعی زلزله استفاده شده است. در این نوشتار، برای خاک نوع II از آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، مؤلفه‌ی جهت X مربوط به ۷ رکورد لرزه‌ی از بانک اطلاعات زمین لرزه PEER (مرکز تحقیقات مهندسی زلزله‌ی پاسیفیک)^[۹] استخراج شده است. زلزله‌های انتخاب شده دارای مشخصات دور از گسل هستند (جدول ۱). رکوردهای انتخابی در سطوح شدت لرزه‌ی مختلف به‌طور فزاینده برای تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳. سیستم سازه‌ی

قاب‌های مورد مطالعه، ۳ و ۶ طبقه و همگی ۳ دهانه‌ی ۵ متری دارند و ارتفاع طبقات ۳ متر است. میان‌قاب‌ها متشکل از واحدهای آجر فشاری به همراه ملات ماسه سیمان هستند، که با در نظر گرفتن ابعاد آجرها ضخامت ۲۰ سانتی‌متر برای آن‌ها حاصل می‌شود. نام‌گذاری مدل‌ها با این الگو انجام شده است، که ابتدا تعداد طبقات و سپس سطح عملکردی که قاب برای آن سطح طراحی شده است، مشخص شده است. همچنین عبارت IBF برای معرفی قاب‌های دارای میان‌قاب و عبارت BF برای معرفی حالتی است که میان‌قاب‌ها از قاب‌های مورد مطالعه حذف شده باشند. جمعاً ۶ مدل قاب دارای میان‌قاب برای سطوح عملکرد متفاوت طراحی شده‌اند. برای مدل‌ها 750 kg/m^2 بار مرده و 200 kg/m^2 بار زنده در نظر گرفته شده است، که با فرض ۴ متر عرض دهانه‌ی بارگیر برای تیرها بارگذاری انجام شده است. وزن دیوارها با توجه به مشخصات در نظر گرفته شده در حالت با و بدون میان‌قاب محاسبه و به‌صورت بار مرده در روند طراحی اعمال و همچنین در محاسبه‌ی وزن کلی رعایت شده است.

از مقاطع (IPB) برای ستون‌ها و از مقاطع (IPE) برای تیرها استفاده و جنس مصالح فولاد ST۳۷ در نظر گرفته شده است. سازه‌ها در نرم‌افزار Perform۳D^[۱۰]

پُر بودن قاب، بیش از ۴ برابر افزایش سختی و نیز ۷۰٪ افزایش مقاومت و تا حدود ۴ برابر شکل‌پذیری بیشتر مشاهده می‌شود، و نتیجه گرفته شد که وجود میان‌قاب به‌طور مؤثری نیاز شکل‌پذیری قاب‌ها را کاهش می‌دهد.^[۱۱] این مطلب بیانگر عملکرد مطلوب قاب‌های دارای میان‌قاب در زلزله‌های متوسط است، حتی اگر ساختمان برای تحمل بارهای زلزله طراحی نشده باشد.

همچنین پژوهشگران دیگری مقاومت‌های بتن مسلح را از لحاظ اقتصادی مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که مقاومت‌سازی در برخی موارد به خصوص سازه‌های بتنی بدون دیوار تا ۸ برابر نسبت هزینه - فایده را افزایش می‌دهد.^[۱۲] در پژوهش دیگری نیز مقایسه‌ی اقتصادی طراحی براساس عملکرد و روش طراحی آیین‌نامه‌ی یونان انجام شد و نتایج آن نشان داد که طراحی سازه‌ها براساس عملکرد، توجیه اقتصادی بیشتری دارد.^[۱۳]

در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ نیز تحلیل هزینه - فایده برای ارزیابی اقتصادی انواع جداسازهای لرزه‌ی استفاده و نشان داده شد که استفاده از جداسازهای لرزه‌ی تا ۲۰٪ هزینه‌ی طول عمر سازه را کاهش می‌دهد و جداسازهای دو خطی در زلزله‌های نزدیک گسل از لحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر هستند.^[۱۴]

پژوهشگرانی نیز روش‌های مختلف بهسازی لرزه‌ی قاب‌های فولادی مهاربندی شده را از دیدگاه اقتصادی بررسی کردند و نشان دادند که روش‌های بهسازی لرزه‌ی از لحاظ اقتصادی به‌صرفه است و بهسازی توسط مهاربند اقتصادی‌تر است.^[۱۵] در سال ۲۰۱۱ نیز در یک مطالعه‌ی فنی و اقتصادی، قاب‌های خمشی ویژه و قاب‌های مهاربندی هم‌محور دو بعدی بررسی و نشان داده شد که ساخت سازه‌ها برای تأمین سطوح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه و ایمنی جانی به روش قاب خمشی ویژه در مقایسه با قاب فولادی مهاربندی اقتصادی‌تر است.^[۱۶]

در مطالعه‌ی دیگری هم در سال ۲۰۱۳، روشی برای برآورد نسبت هزینه‌ی فایده‌ی بهسازی لرزه‌ی ساختمان مدارس در منطقه‌ی وسیعی از کشورهای آمریکای لاتین ارائه شد.^[۱۷]

همان‌گونه که اشاره شد، پژوهشگران در بسیاری از کشورها به منظور کاهش تلفات جانی و مالی در برابر زلزله‌های آتی روش‌های مختلفی مانند: مقاومت‌سازی، طراحی براساس عملکرد، مقایسه‌ی روش‌های طراحی، استفاده از انواع جداسازهای لرزه‌ی و غیره، را به‌طور تجربی و تحلیلی به کار بسته‌اند. در این نوشتار سعی شده است با مقایسه‌ی هزینه‌های ساخت و بازسازی ناشی از وقوع زلزله‌های احتمالی در طول

به دست می‌آید. در ادامه، مبانی کاربردی منحنی شکنندگی به طور مختصر بیان شده است.

۵. منحنی شکنندگی

فرایند تولید منحنی شکنندگی در روش تحلیل دینامیکی افزایشی به این گونه است که ابتدا مجموعه‌ای پاسخ‌های سازه به ازاء هر کدام از زمین‌لرزه‌ها تا فروریزش سازه به دست می‌آید. سپس با توجه به مقدار آستانه‌ی در نظر گرفته شده برای تقاضای هر یک از حالت‌های خسارت، احتمال تجمعی وقوع حالت خسارت مورد نظر مشخص می‌شود. در نهایت، با برازش نقاط احتمال تجمعی حاصل به توزیع تجمعی لگاریتمی نرمال، منحنی شکنندگی به دست می‌آید، که رابطه‌ی مورد استفاده برای تولید آن، به صورت رابطه‌ی ۶ است:

$$P[EDP < edp | IM] = \Phi \left[\frac{\ln(IM) - \ln(\mu)}{\sigma} \right] \quad (6)$$

که در آن، IM ، معیار اندازه‌ی شدت زمین‌لرزه است که در این مطالعه، بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) در نظر گرفته شده است. σ و μ به ترتیب میانه و انحراف استاندارد پاسخ‌های سازه در یک PGA خاص برازش داده شده با تابع چگالی احتمال لگاریتمی نرمال و ϕ تابع توزیع نرمال استاندارد، EDP پارامتر نیاز و edp مقدار آستانه‌ی انتخابی برای پارامتر نیاز سازه‌ی مورد نظر است. برای مثال، جابجایی که در آن سازه از سطح عملکرد LS تجاوز می‌کند با edp_{LS} بیان می‌شود.

۶. روش ارزیابی اقتصادی طرح

در مقایسه‌ی گزینه‌ها، از روش تجزیه و تحلیل سرمایه‌گذاری اضافی استفاده می‌شود. به این ترتیب برای بررسی یک گزینه، نسبت اختلاف منافع به اختلاف مخارج محاسبه می‌شود و در صورتی که این نسبت از عدد ۱ بزرگ‌تر باشد، انتخاب گزینه با هزینه‌ی بیشتر از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود؛ اما اگر نسبت به دست آمده از ۱ کوچک‌تر شود، سرمایه‌گذاری و صرف هزینه بیشتر جهت ساخت سازه با سطح عملکرد مطلوب‌تر توجیه اقتصادی نخواهد داشت.

جهت ارزیابی دقیق‌تر اقتصادی و اجتماعی ساخت سازه‌ها، نیازمند اطلاعات بسیاری از جمله خسارت ناشی از تلفات جانی هستیم که به علت عدم شفافیت و سهولت دسترسی به این اطلاعات در این مطالعه، فقط به هزینه‌های مستقیم ناشی از آسیب سازه بسنده شده است.

در این مطالعه، هزینه‌ی جایگزینی در واقع هزینه‌ی ریالی ساخت سازه‌ی جدید با مشخصات سازه‌ی تخریب شده در زلزله است. در تحلیل‌های اقتصادی، کمیته‌ی نرخ جذب از جمله پارامترهای مؤثر در نتایج است. همچنین در این مطالعه، میانگین وزنی نرخ تورم سالانه‌ی ساخت و ساز، با توجه به سهم هر یک از مصالح و کارهای خدماتی ساختمان در هزینه‌ی کل ساخت محاسبه و به کار گرفته شده است. کمیته‌ی نرخ جذب، کمیته‌ی نرخ ممکن برای جلب مشارکت سرمایه‌گذار پروژه است. چون این نرخ برای سرمایه‌گذاران متفاوت است و با توجه به ماهیت این مطالعه، جهت مقایسه‌ی سطوح عملکرد این نرخ با استفاده از رابطه‌ی ۷،^[۱۳] محاسبه شده است:

$$i_f = i + \Delta f + i \times \Delta f \quad (7)$$

که در آن، i_f کمیته‌ی نرخ جذب، i نرخ سود، و Δf اختلاف نرخ تورم عمومی است. نرخ تورم سالانه‌ی ساخت و ساز خسارت سازه نیز از حاصل ضرب هزینه‌ی جایگزینی

مدل‌سازی و در سطوح عملکرد مختلف طراحی و همچنین میان‌قاب‌های آجری بدون بازشو در نظر گرفته شده‌اند. برای مشخصات مقاومتی مصالح دیوار از روابط به کار رفته در مطالعه‌ی انجام شده در سال ۲۰۰۴،^[۱۱] استفاده شده است (روابط ۱ الی ۵):

$$f'_{m-0} = 4.4 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{مقاومت فشاری مصالح دیوار در جهت عمود بر بستر}) \quad (1)$$

$$f'_{m-90} = 3.08 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{مقاومت فشاری مصالح دیوار در جهت موازی بستر}) \quad (2)$$

$$E_{90} = 3080 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{مدول کشسانی مصالح در جهت عمود بر بستر}) \quad (3)$$

$$G_{90} = 4.4 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{مدول برشی مصالح دیوار در جهت عمود بر بستر}) \quad (4)$$

$$W = 10.85 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{وزن واحد طول دیوار}) \quad (5)$$

این تذکر لازم است که صحت‌سنجی مدل‌سازی نشان داده است که نمودار پوش سازه‌ها با سازه‌های مشابه مطابقت قابل قبولی دارد.

۴. تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)

IDA یک تحلیل پارامتری است. این تحلیل با هدف بررسی عملکرد سازه تحت بار زلزله ابداع و با ارائه‌ی روش‌های مختلف توسط پژوهشگران در حال تکمیل شدن است. IDA با اعمال یک یا چند شتاب‌نگاشت مقیاس شده با شدت‌های متفاوت به یک سازه انجام می‌شود و نتیجه‌ی آن به دست آوردن یک یا چند منحنی است، که در آنها پارامتر خسارت بر حسب شدت بیان می‌شود.

تعیین سطح عملکرد در تحلیل دینامیکی فزاینده، یکی از گام‌های اساسی نتیجه‌گیری از منحنی‌های IDA است. در آیین‌نامه‌ی FEMA ۳۵،^[۱۲] به صورت کتبی تعاریف سطوح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه (IO) و آستانه‌ی فروریزش (CP) قاب‌های خمشی فولادی ارائه شده است. طبق این آیین‌نامه، بهترین نقطه‌ی که در طول منحنی IDA می‌تواند معرف تقاضا در سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش باشد، نقطه‌ی است که منحنی شروع به نرم‌شدگی در جهت ناپایداری کلی دینامیکی سازه می‌کند. نقطه‌ی که ۲۰٪ شیب ناحیه‌ی کشسان را در طول منحنی IDA داشته باشد یا بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی ($\theta_{max} = 1\%$) (هر کدام زودتر در محور IM اتفاق افتاد)، به منزله‌ی تقاضای زلزله در سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش شناخته می‌شود.

در این مطالعه، آستانه‌ی عبور از سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش برای قاب‌های مورد بررسی، مطابق آیین‌نامه‌ی FEMA ۳۵،^[۱۲] فرض شده است. مقدار جابجایی نسبی، که در آن اولین المان سازه‌ی از سطح عملکرد IO عبور می‌کند، به عنوان سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه‌ی کل سازه در نظر گرفته شده است. با توجه به تعاریف مختلف جهت تعیین تقاضا در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) در مراجع مختلف، FEMA ۳۵،^[۱۲] متوسط عددی دو سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش و قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه را به عنوان نیاز لرزه‌ی متناظر با سطح عملکرد ایمنی جانی در تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده معرفی کرده است. پس از به دست آوردن منحنی‌های IDA و تعیین تغییرمکان متناظر با هر سطح عملکرد، برای هر سازه منحنی شکنندگی، که احتمال تجاوز سازه از سطح عملکرد طراحی را نشان می‌دهد،

اگر برای تمامی شتاب‌های بیشینه‌ی زلزله، که احتمال رخداد آن در منطقه وجود دارد، نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ را محاسبه کنیم، مشخص می‌شود که در زلزله‌های با شتاب‌های بیشینه‌ی مختلف، کدام سازه خسارت کمتری می‌بیند.

نکته‌ی قابل توجه این است که احتمال رخداد زلزله با شدت‌های مختلف، با توجه به خطر لرزه‌خیزی منطقه متفاوت خواهد بود و باید تصمیم‌گیری نهایی بر پایه‌ی فراوانی هر یک از زلزله‌های احتمالی با شتاب‌های مختلف زمین باشد؛ به طوری که هر زلزله با شتاب بیشینه‌ی مشخص برحسب تعداد رخداد سالیانه‌ی محتمل در منطقه‌ی مورد بررسی در تصمیم‌گیری نقش داشته باشد. در این صورت می‌توان برای هر قاب یک نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ داشت و مقایسه‌ی گزینه‌ها را از طریق بررسی این نسبت انجام داد. از این رو برای به‌دست‌آوردن تعداد رخداد سالیانه‌ی زلزله‌ها با شتاب‌های بیشینه‌ی متفاوت باید از نتایج تحلیل خطر لرزه‌ی منطقه استفاده شود. اگر N_j فراوانی زلزله‌ها با شتاب بیشینه‌ی Z_j باشد، آنگاه $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ از رابطه‌ی ۱۲ به‌دست می‌آید: [۱۴]

$$\frac{\Delta B_t}{\Delta C} = \sum_{j=0}^1 N_j \left(\frac{\Delta B_t}{\Delta C} \right) \quad (12)$$

که در آن، $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ عبارت از نسبت تفاضل منافع به مخارج کل است.

۷. ارزیابی رفتار سازه

در این مطالعه، مقادیر بیشینه‌ی شتاب متناسب با هر سطح عملکرد به عنوان پارامتر موردنظر از روی منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی انتخاب شده است. در این حالت برای تولید منحنی شکنندگی دوگام وجود دارد: ۱. برازش نقاط به تابع چگالی احتمال لوگ نرمال، میانه و انحراف معیار استاندارد برای هر سطح عملکرد به‌دست می‌آید؛ ۲. با استفاده از میانه و انحراف معیار استاندارد حاصله‌ی منحنی و تابع تجمعی لوگ نرمال، منحنی شکنندگی خسارت سازه حاصل می‌شود.

در شکل ۲، پس از برازش مقادیر بیشینه‌ی شتاب زمین متناسب با سطح عملکرد طراحی قاب‌های دارای میان‌قاب و بدون میان‌قاب با تابع توزیع تجمعی لوگ نرمال و با استفاده از میانه و انحراف معیار استاندارد حاصل از برازش، منحنی شکنندگی تولید شده است. حال با استفاده از منحنی شکنندگی حاصله به‌راحتی می‌توان اطلاعات کاملی در مورد احتمال رسیدن سازه به سطح عملکردی که برای آن طراحی شده است، به‌دست آورد. جهت بررسی دقیق‌تر اثر میان‌قاب در رفتار سازه، تمامی مراحل برای قاب‌ها در حالت حذف میان‌قاب نیز انجام شده است.

در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در زمان رخداد زلزله‌ی $PGA = 0.75$ ، سازه‌ی دارای میان‌قاب به احتمال ۵۰٪ از سطح عملکرد طراحی عبور می‌کند، در حالی که سازه‌ی بدون میان‌قاب به احتمال ۸۳٪ از این محدوده تجاوز خواهد کرد. منحنی شکنندگی سازه‌ی دارای میان‌قاب، شیب کمتری نسبت به منحنی شکنندگی سازه‌ی بدون میان‌قاب دارد. در واقع میان‌قاب، احتمال رسیدن سازه‌ی ۳ طبقه‌ی طراحی شده برای سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش به سطح عملکرد موردنظر را ۳۰٪ کاهش می‌دهد. در سازه‌های سه طبقه، که برای سطوح عملکرد IO و LS طراحی شده‌اند، نیز با افزایش PGA احتمال اینکه سازه از سطح عملکرد مورد انتظار عبور کند، افزایش می‌یابد. این روند در مورد قاب‌های دارای میان‌قاب و بدون میان‌قاب نیز برقرار است. همان‌طور که در تمامی منحنی‌ها مشاهده می‌شود، میان‌قاب اثر مثبتی در رفتار سازه دارد و با کاهش تغییرمکان جانبی، احتمال تجاوز از سطح عملکرد مورد انتظار سازه‌ی دارای میان‌قاب را نسبت به حالت بدون میان‌قاب کاهش می‌دهد.

(RC) در عامل خسارت میانگین سازه (DMV) به‌دست می‌آید (رابطه‌ی ۸). [۱۴] عامل خسارت میانگین (DMV)، درصد خسارت احتمالی سازه را در یک زلزله با بیشینه‌ی شتاب مشخص نشان می‌دهد، که از رابطه‌ی ۹ قابل محاسبه است:

$$DM = RC \times DMV \quad (8)$$

$$DMV = PK \times DCI \quad (9)$$

که در آن، PK احتمال تجاوز از سطح عملکرد K ام (حاصل از منحنی شکنندگی) و DCI شاخص خسارت مرکزی در سطح عملکرد K ام است.

مفهوم شاخص خسارت میانگین در شکل ۱ نشان داده شده است. عددی که به‌عنوان شاخص خسارت در نظر گرفته شده است، مشخص‌کننده‌ی خسارت ریالی وارد بر سازه در هر یک از سطوح عملکرد است، که به‌صورت درصدی از هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت است. در این مطالعه، مطابق فرض ارائه‌شده در FEMA ۲۲۷، [۱۵] و FEMA ۳۵۶، [۱۶] شاخص خسارت میانگین تجاوز از سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه، ایمنی جانی، و آستانه‌ی فروریزش به ترتیب برابر ۲۰٪، ۴۵٪، و ۸۴٪ هزینه‌ی جایگزینی در نظر گرفته شده است.

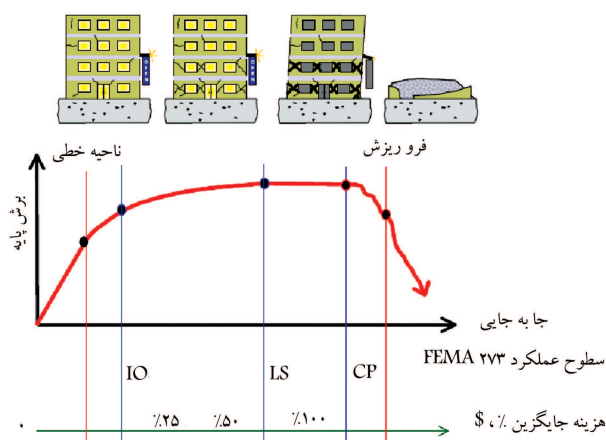
جهت محاسبه‌ی اقتصادی بودن ۲ گزینه‌ی طراحی شده، که برای مقایسه موردنظر قرار گرفته‌اند، از رابطه‌ی ۱۰، [۱۴] که اختلاف درصد خسارت احتمالی دو گزینه‌ی طراحی را بیان می‌کند، استفاده می‌شود:

$$RL = D_{MV}^1 - D_{MV}^2 \quad (10)$$

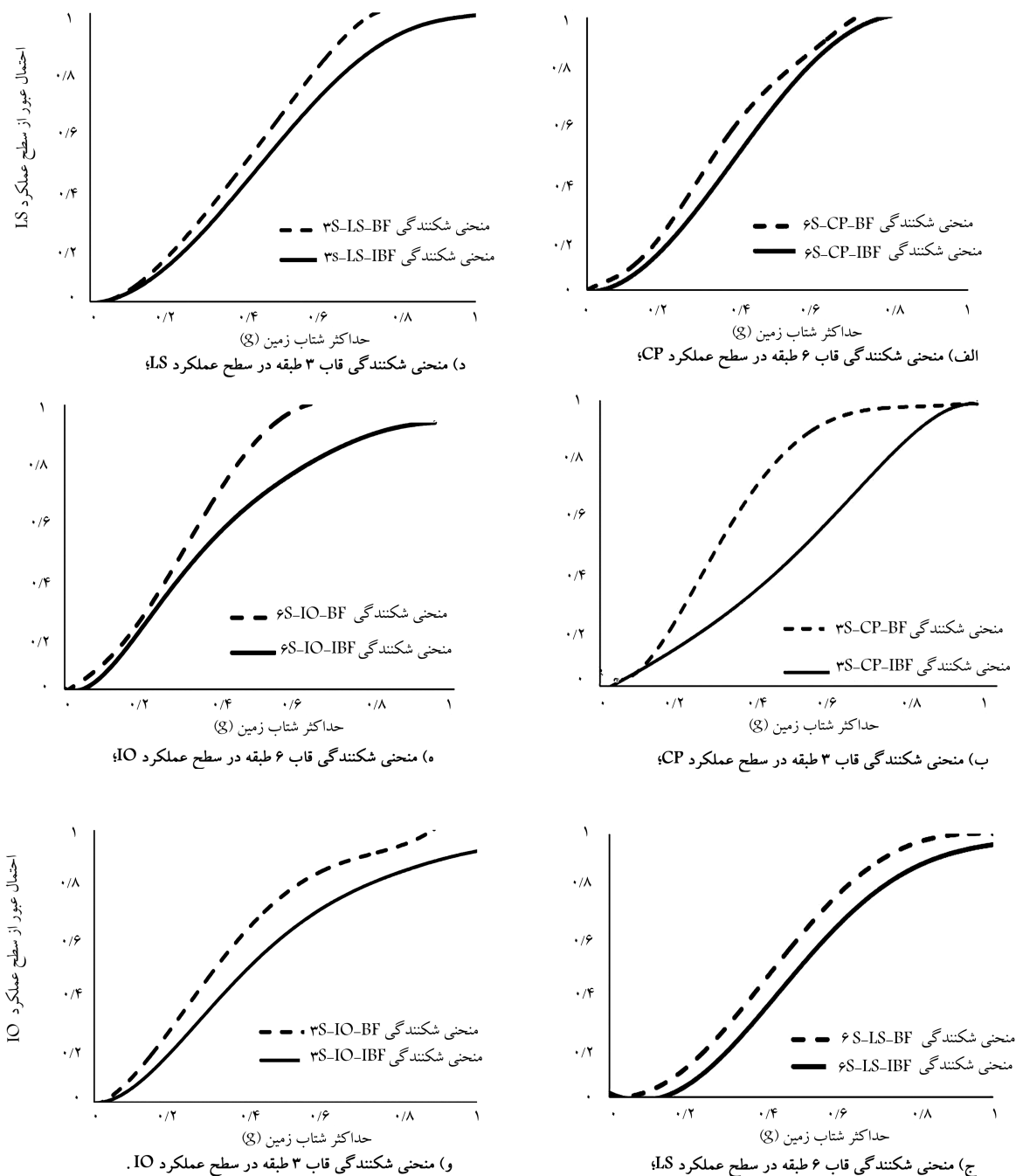
که در آن، RL منفعت بالقوه، D_{MV}^1 عامل خسارت میانگین گزینه‌ی ۱ طراحی (مثلاً CP)، و D_{MV}^2 عامل خسارت میانگین گزینه‌ی ۲ طراحی (مثلاً LS) هستند. نسبت هزینه - فایده از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود، [۱۴] که در آن عمر مفید سازه، کمیته‌ی نرخ جذب، و ارزش اسقاط، که معرف درآمد حاصل از فروش مصالح قابل بازیافت باقی‌مانده از ساختمان آسیب‌دیده هستند، لحاظ شده است:

$$\frac{\Delta B_t}{\Delta C} = \left(\frac{RL + \Delta VS}{\Delta RC} \right) \times \frac{1 - (1 + if)^{-t}}{if} \quad (11)$$

که در آن، t عمر مفید سازه؛ ΔVS تفاوت در ارزش اسقاط دو گزینه‌ی مورد بررسی (۱۰٪ هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت هر قاب)؛ [۱۴] ΔB_t منفعت بالقوه‌ی سطح عملکرد مطلوب‌تر، و ΔC تفاوت هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت سازه‌ها هستند.



شکل ۱. نمایش درصد خسارت سازه در هر یک از سطوح عملکرد.



شکل ۲. منحنی شکنندگی قاب‌های ۳ و ۶ طبقه در سطوح عملکرد CP، LS و IO.

۸. تحلیل اقتصادی

پس از به دست آوردن منحنی‌های شکنندگی برای محاسبه‌ی نسبت تفاضل منافع به مخارج، در گام اول مطالعات اقتصادی باید هزینه‌ی تمام شده‌ی ساخت هر قاب محاسبه شود. خلاصه‌ی نتایج حاصل در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تفاوت در هزینه‌ی ساخت هر سطح عملکرد و سطح عملکرد مطلوب‌تر در قاب‌های ۳ طبقه حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد و در قاب‌های ۶ طبقه حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد است.

طبق طراحی‌های فنی، ساخت مدل‌ها برای تأمین سطوح عملکرد مختلف، هزینه‌های اولیه‌ی متفاوتی را طلب می‌کند که به عنوان مخارج طرح‌ها در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر، این مدل‌ها خسارت‌های مختلفی را تحت خطر زمین‌لرزه‌های مختلف متحمل می‌شوند. بیشترین خسارت در سازه با سطح عملکرد CP به وجود می‌آید. از این رو تفاوت خسارت‌ها با این سطح عملکرد به عنوان منفعت بالقوه برای آن طرح در نظر گرفته می‌شود. جهت انجام تحلیل اقتصادی با توجه به نتایج حاصل از طراحی و ریالی کردن هزینه‌ی ساخت هر مدل، هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت سازه مشخص می‌شود. در گام دوم از مطالعه، خسارت‌های به وجود آمده

جدول ۲. هزینه‌ی تمام‌شده‌ی ساخت قاب‌ها (ریال).

مدل‌های مورد تحقیق	هزینه‌ی ساخت	
	سطح عملکرد	تعداد طبقات (ریال)
IO	۶۵۸۶۷۶۳۲	۳
	۱۸۱۳۰۰۵۲۱	۶
LS	۵۹۸۵۶۰۱۲	۳
	۱۶۱۷۰۷۵۰	۶
CP	۵۱۱۹۵۱۵۲	۳
	۱۴۹۴۸۱۶۳۳	۶

جدول ۳. محدوده‌ی کیفی سطوح عملکرد با توجه به FEMA۲۲۷ [۱۵] و FEMA۳۵۶ [۱۶].

سطح عملکرد طراحی	IO	LS	CP
شاخص خسارت متوسط	٪۲۰	٪۴۵	٪۸۴

جدول ۴. درصد وزنی هر یک از مصالح و خدمات استفاده‌شده.

۳S-CP-IBF	درصد وزنی هزینه کل	نرخ تورم
مصالح ساختمانی فلزی	۶۱٫۳۸	۱۱٫۶
مصالح ساختمانی غیرفلزی	۲۴٫۱۹	۱۳٫۱
دستمزد خدمات ساختمانی	۱۴٫۴۲	۱۵٫۳

در مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های خسارت مرکزی در نظر گرفته شده و داده‌های حاصل از منحنی شکنندگی تعیین شده‌اند. جدول ۳، شاخص‌های خسارت مرکزی استفاده‌شده در سطوح عملکرد را نشان می‌دهد.

گام سوم انجام مطالعات، تعیین کمیته‌ی نرخ جذب و عمر مفید سازه است. با توجه به ماهیت این مطالعه که به تحلیل سرمایه‌گذاری اضافی با لحاظ کردن منفعت بالقوه‌ی ناشی از به‌کارگیری سطح عملکرد بالاتر می‌پردازد، در محاسبه‌ی کمیته‌ی نرخ جذب به تقاضای نرخ تورم عمومی و نرخ تورم سالانه‌ی ساخت و ساز توجه شده است.

ارزبایی اقتصادی این مطالعه مبتنی بر این فرض است که نرخ رشد شاخص‌های استفاده‌شده برای ۵۰ سال عمر مفید سازه برابر میانگین دوره‌ی ۱۳۷۶-۱۳۸۹ باشد. نرخ تورم مورد نیاز براساس میانگین هندسی رشد شاخص‌های عمده‌فروشی مصالح ساختمانی فلزی و غیرفلزی، شاخص‌های خدمات ساختمانی و همچنین شاخص‌های کالاهای مصرفی خانوار شهری سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۸۹ به‌دست آمده است. آمار نشان می‌دهد که شاخص قیمت مصالح ساختمانی فلزی، غیرفلزی و نیز دستمزد خدمات ساختمانی طی این دوره به‌طور متوسط هر سال به ترتیب ۱۱٫۶٪، ۱۳٫۱٪ و ۱۵٫۳٪ رشد کرده است. برای محاسبه‌ی میانگین وزنی نرخ تورم سالانه‌ی ساخت و ساز، درصد وزنی هر یک از هزینه‌های انجام‌شده‌ی مربوط به ساخت سازه نسبت به هزینه‌ی کل محاسبه شده است. درصد‌های مربوط به سازه‌ی ۳ طبقه دارای میان‌قاب در سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش به همراه نرخ تورم محاسبه‌شده در جدول ۴ ارائه شده است. به دلیل تفاوت نه‌چندان زیاد این درصد‌ها برای بقیه‌ی سازه‌ها، درصد وزنی هزینه‌ی سایر سازه‌ها نیز با تقریب مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است.

با توجه به اعداد و ارقام ارائه‌شده در جدول ۴، محاسبه‌ی میانگین وزنی نرخ

تورم سالانه‌ی ساخت و ساز به این قرار خواهد بود:

$$F = (0,6138 \times 0,116) + (0,2419 \times 0,131) + (0,1442 \times 0,153) = 0,12,4$$

که در آن، F میانگین وزنی نرخ تورم سالانه‌ی ساخت و ساز برای دوره‌ی ۱۳۷۶-۱۳۸۹ است.

میانگین نرخ تورم شاخص کالاهای مصرفی خانوار شهری برای دوره‌ی ۱۳۷۶-۱۳۸۹ براساس سال پایه‌ی ۱۳۸۳ با استفاده از آمار ارائه‌شده توسط بانک مرکزی ج.ا.ا. [۱۷]، ۱۲٫۶٪ به‌دست آمده است، که در این مطالعه از آن به عنوان نرخ تورم عمومی نام برده شده است. کمیته‌ی نرخ جذب از رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$i_f = i + (f - F) + i \times (f - F) \quad (13)$$

که در آن، i نرخ سود، i_f کمیته‌ی نرخ جذب برآوردی، f نرخ تورم عمومی، و F نرخ تورم سالانه‌ی ساخت و ساز هستند.

$$i_f = 0,045 + (0,126 - 0,124) + 0,045 \times 0,002 = 0,047$$

در این نوشتار، نرخ سود واقعی از تفاضل تقریبی متوسط نرخ سود سپرده‌های بلندمدت بانکی در دوره‌ی ۱۳۷۶-۱۳۸۹ (برابر ۱۷٫۲۵ درصد) با متوسط نرخ تورم عمومی (برابر ۱۲٫۶ درصد) در همان دوره به‌دست آمده است، قابل ذکر است که این شیوه‌ی محاسبه‌ی نرخ جذب برآوردی براساس اهداف این مطالعه، که محاسبه‌ی منافعی بالقوه‌ی سطوح عملکردی موردنظر بوده انتخاب شده است. در نتیجه، این شیوه‌ی محاسبه ممکن است قابل به‌کارگیری در مطالعاتی که اهداف دیگری را دنبال می‌کنند، نباشد.

حال با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده در تحلیل آسیب‌پذیری، نسبت تفاضل منافعی به مخارج را برای مقادیر مختلف بیشینه‌ی شتاب زمین محاسبه می‌کنیم. در این مطالعه، سازه‌ی LS و CP با هم و سازه‌ی IO و LS نیز با هم مقایسه شده‌اند. جدول‌های ۵ و ۶، نسبت $\frac{\Delta B}{\Delta C}$ را برای سازه‌های ۳ و ۶ طبقه‌ی بررسی‌شده در PGAهای مختلف نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود برای سازه‌های ۳ طبقه، نسبت $\frac{\Delta B}{\Delta C}$ در مقایسه‌ی دو طرح ساخت LS و CP صعودی است و با افزایش بیشینه‌ی شتاب زمین افزایش می‌یابد. در $PGA=0,8$ ، $\frac{\Delta B}{\Delta C}$ کمتر از ۱ بوده است و در نتیجه ساخت سازه در سطح عملکرد LS اقتصادی نیست، که دلیل آن رami توان ناشی از کمتر بودن منفعت بالقوه‌ی ساخت سازه در دو سطح عملکرد LS و CP و خسارت احتمالاتی نزدیک به یکدیگر این دو سازه در زلزله‌ی با بیشینه‌ی شتاب $g=0,8$ دانست. برای مقادیر $g > 0,8$ ، $\frac{\Delta B}{\Delta C}$ بزرگ‌تر از ۱ است، که می‌توان نتیجه گرفت سازه‌ی CP در این محدوده از شتاب زمین خسارت بیشتری نسبت به سازه‌ی LS خواهد دید، به طوری که احتمال خسارت زیاد سازه‌ی CP، سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بیشتر را از لحاظ اقتصادی توجیه می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رود، به علت احتمالاتی بودن محاسبات، نمی‌توان روند تغییر مشخصی (کاهش یا افزایش) را برای نسبت تفاضل منافعی به مخارج در نظر گرفت. در مقایسه‌ی دو طرح LS و IO مشاهده می‌شود که این نسبت در PGA کوچک‌تر یا مساوی $g=0,2$ منفی است و دلیل آن ناشی از خسارت بیشتر سازه‌ی با طرح IO نسبت به سازه‌ی با طرح LS در این سطوح شدت زمین‌لرزه است. در حالت $g > 0,2$ ، PGA، روند صعودی نسبت $\frac{\Delta B}{\Delta C}$ مشاهده می‌شود.

جدول ۷. فراوانی رخداد زلزله‌های با شتاب‌های مختلف در شهر تهران. [۱۸، ۱۹]

تعداد رخداد سالیانه N_j	بیشینه‌ی شتاب زمین PGA
۰,۵۶۳	۰,۰۳ - ۰,۰۸
۱,۱۲۲	۰,۰۸ - ۰,۱۵
۰,۱۷۱	۰,۱۵ - ۰,۲۵
۰,۰۷۹	۰,۲۵ - ۰,۴۵
۰,۰۱۳	۰,۴۵ - ۰,۶
۰,۰۰۵	۰,۶ - ۰,۷۵
۰,۰۰۴	۰,۷۵ - ۰,۹
۰,۰۰۱	۰,۹ - ۱

جدول ۸. مقادیر نهایی $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$.

طبقه ۳	طبقه ۶	$\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$
۱,۴۹	۱,۷۵	IO-LS
۲,۳	۸,۴۲	LS-CP

-- بیشینه‌ی شتاب زمین استفاده شود. [۱۹] پس از انجام تبدیلات موردنظر، جدول ۷ به‌دست آمده است.

با استفاده از جدول ۷ و جداولی که در برابر PGA را برای سازه‌های ۳ و ۶ طبقه ارائه می‌دهد، یک مقدار $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ نهایی برای هر حالت مقایسه داریم که مطابق جدول ۸ به‌دست آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اینکه در برخی شتاب‌های بیشینه‌ی زمین لرزه‌ی، ساخت سطح عملکرد مطلوب‌تر توجیه اقتصادی ندارد، اما با لحاظ کردن فراوانی رخداد زلزله‌های محتمل تمامی این نسبت‌های $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ از ۱ بزرگ‌تر می‌شود.

با توجه به جدول ۸ می‌توان نتیجه گرفت که ساخت سازه با هزینه‌ی اولیه‌ی بیشتر، اقتصادی‌تر است و سطح عملکرد IO به‌عنوان سطح عملکرد اقتصادی‌تر نسبت به سطح عملکرد LS برای ساخت سازه‌های مهاربندی‌شده دارای میان‌قاب آجری ۳ و ۶ طبقه برآورد شده است. همچنین این نتیجه در خصوص سطح عملکرد LS نسبت به سطح عملکرد CP جهت ساخت سازه‌های مهاربندی‌شده دارای میان‌قاب آجری ۳ و ۶ طبقه صادق است. از اعداد موجود در جدول ۸ واضح است که نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه در زمانی که سطوح عملکرد LS و CP مورد مقایسه قرار می‌گیرند، بیشتر از حالت مقایسه‌ی اقتصادی ساخت سازه در سطوح عملکرد IO و LS است، می‌توان چنین برداشت کرد که هر چه این نسبت بزرگ‌تر باشد با ضریب اطمینان بالاتری می‌توان سازه با هزینه‌ی اولیه‌ی بیشتر را انتخاب کرد.

۹. تحلیل حساسیت

در این مرحله با انجام تحلیل حساسیت به این سؤال که تغییر کمیته‌ی نرخ جذب و عمر مفید سازه چه تأثیری در تحلیل هزینه - فایده‌ی انجام‌شده داشته است، پاسخ داده می‌شود. با تغییر عمر مفید سازه و کمیته‌ی نرخ جذب، تغییرات $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. محدوده‌ی تغییرات عمر مفید سازه ۴۰ تا ۶۰ سال و محدوده‌ی تغییرات کمیته‌ی نرخ جذب، ۰,۰۴۵ تا ۰,۱۷ است. شکل ۳، نتایج

جدول ۵. نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ برای سازه‌های ۳ طبقه‌ی مورد بررسی در برابر PGA.

$\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ (LS - CP)	$\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ (IO - LS)	PGA (g)
۰	۰	۰
۰,۳۱۱۶	-۲,۴۸۲۰	۰,۱
۶,۳۹۰۳	-۰,۲۱۲۳	۰,۲
۵,۱۴۹۵	۱۰,۴۴۲	۰,۳
۱,۶۵۹۵	۱۲,۵۲۲	۰,۴
۲,۶۱۰۷	۲۴,۳۰۹	۰,۵
۸,۵۷۳۸۳	۲۹,۶۱۴۱۲	۰,۶
۱۳,۷۷۱	۴۰,۳۵۶۹	۰,۷
۱۴,۷۰۳۹	۴۵,۷۹۷۶	۰,۸
۲۲,۱۰۵۲	۴۷,۱۲۹۳	۰,۹
۲۲,۳۹۱۵	۴۷,۱۰۹۴	۱

جدول ۶. نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ در برابر PGA برای سازه‌های ۶ طبقه.

$\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ (LS - CP)	$\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ (IO - LS)	PGA (g)
۰	۰	۰
-۳,۲۹	-۰,۳۰	۰,۱
-۳,۰۹	۲,۶۰	۰,۲
۲۲,۹۷	۵,۷۸	۰,۳
۳۹,۶۵	۵,۳۱	۰,۴
۳۴,۲۳	۹,۷۰	۰,۵
۲۲,۸۶	۱۴,۴۵	۰,۶
۲۶,۰۷	۱۹,۵۳	۰,۷
۲۵,۱۰	۲۲,۱۰	۰,۸
۲۶,۱۴	۲۲,۷۹	۰,۹
۲۳,۵۹	۲۷,۳۶	۱

تا اینجا نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ برای سازه‌های مورد بررسی در بیشینه‌ی شتاب ۰ تا ۱ به‌دست آمده است. اما آنچه مهم به نظر می‌رسد، تعداد رخداد‌های سالیانه‌ی زلزله‌ها با شتاب‌های بیشینه‌ی متفاوت است که می‌تواند مبنای ارزیابی قرار گیرد. به این ترتیب که با انجام مطالعات بر روی محل مورد بررسی می‌توان مبنای تصمیم‌گیری را مقدار نسبت هزینه - فایده در بیشینه‌ی شتابی که احتمال رخداد آن در منطقه بیشتر است، قرار داد.

در این مرحله با استفاده از تحلیل خطر لرزه‌ی تعداد زلزله‌ها با مقادیر PGA مختلف را به‌دست می‌آوریم و با استفاده از رابطه‌ی ۱۲، نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ را برای مقایسه‌ی سطوح عملکرد به‌دست می‌آوریم، تا بتوان قضاوت نهایی را انجام داد. جدول ۷، که با استفاده از تحلیل خطر لرزه‌ی شهر تهران تهیه شده است، تعداد رخداد سالیانه‌ی زلزله‌ها با شتاب‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول‌های موجود در تحلیل خطر لرزه‌ی شهر تهران، [۱۸] تعداد رخداد‌های سالیانه را بر حسب بزرگای ارائه کرده‌اند، که برای استفاده از آن لازم است ابتدا بزرگای را به بیشینه‌ی شدت و سپس شدت را به شتاب زمین تبدیل کرد، که البته هیچ رابطه‌ی دقیق و ثابتی برای این تبدیل وجود ندارد و باید از روابط تقریبی شدت - بزرگای

سطح عملکرد مطلوب‌تر همواره اقتصادی است. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد نتایج تحلیل هزینه - فایده انجام شده نسبت به تغییر پارامترهای عمر مفید سازه (t) و کمیته‌ی نرخ جذب (d) حساسیت قابل ملاحظه‌ی ندارد و همواره از ۱ بزرگ‌تر است، همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که برای تمامی سطوح، تغییرات کمیته‌ی نرخ جذب از ۱ بزرگ‌تر است و با ضریب اطمینان بالاتری می‌توان سازه با هزینه‌ی اولیه‌ی بیشتر را انتخاب کرد.

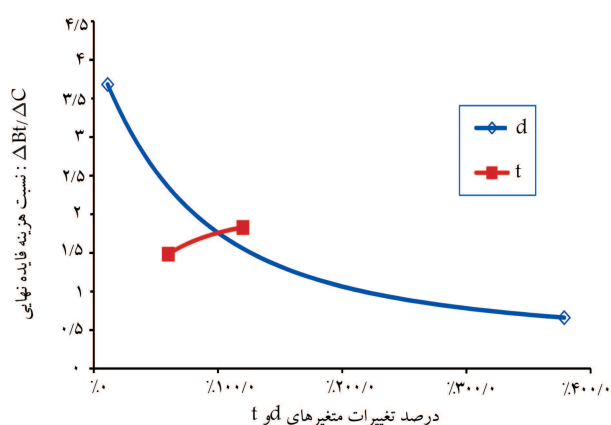
۱۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، قاب‌های ۳ و ۶ طبقه‌ی فولادی مهاربندی شده دارای میان‌قاب با استفاده از آیین‌نامه‌های موجود برای ۳ سطح عملکرد: استفاده‌ی بی‌وقفه، ایمنی جانی، و آستانه‌ی فروریزش طراحی شده‌اند. با انجام تحلیل دینامیکی فزاینده بر قاب‌های دارای میان‌قاب و بدون میان‌قاب سطوح عملکرد با استفاده از منحنی‌های IDA مشخص شده‌اند. سپس با استفاده از توابع شکنندگی، منحنی احتمال تجاوز سازه از سطوح عملکرد مختلف به دست آمده است. در نهایت، پس از تخمین خسارت احتمالی و هزینه‌ی آن با استفاده از شیوه‌های اقتصاد مهندسی در تحلیل‌های هزینه - فایده، رابطه‌ی بین خسارت و هزینه برای قاب‌های دارای میان‌قاب ارائه شده است. نتایج این مطالعه، این موارد را نشان می‌دهد:

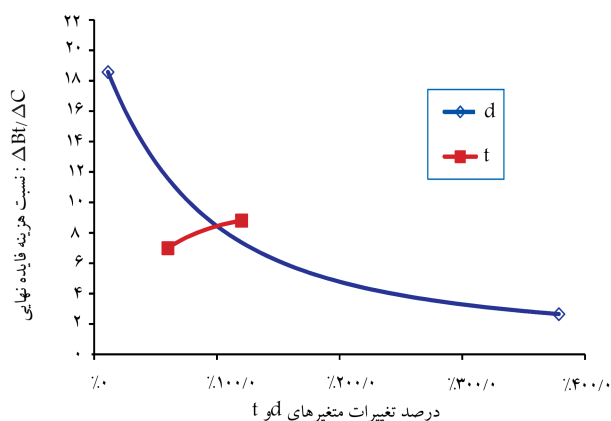
- مقایسه‌ی وزن فولاد مصرفی اسکلت قاب‌ها در سطوح عملکرد مختلف نشان می‌دهد با تغییر سطح عملکرد LS به IO، نیاز به مصرف بیشتر حدود ۱۵٪ آهن در قاب‌های ۳ و ۶ طبقه است و همچنین با تغییر سطح عملکرد CP به LS، نیاز به مصرف بیشتر ۱۰٪ آهن در قاب‌های ۳ طبقه و ۲۲٪ در قاب‌های ۶ طبقه است.
- در سازه‌های مورد بررسی، میان‌قاب‌ها با کاهش جابجایی سازه، اثرات مثبتی در عملکرد سازه نشان می‌دهند. به طوری که با حذف میان‌قاب از قاب‌های مورد بررسی، احتمال تجاوز سازه از سطح عملکرد طراحی افزایش می‌یابد.
- سطح عملکرد IO به‌عنوان سطح عملکرد اقتصادی‌تر نسبت به سطح عملکرد LS برای ساخت سازه‌های مهاربندی شده دارای میان‌قاب آجری ۳ و ۶ طبقه برآورد شده است. همچنین این نتیجه در خصوص سطح عملکرد LS به‌عنوان سطح عملکرد اقتصادی‌تر نسبت به سطح عملکرد CP نیز تأیید می‌شود.

منابع (References)

1. Kappos, A.J. "Seismic design and performance assessment of masonry infilled R/C frames", *Proceeding of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Held at Auckland, New Zealand, Paper No. 0989* (2000).
2. Murty, C.R.V. and Jain, S.K. "Beneficial influence of masonry infill walls on seismic performance of reinforced concrete frames buildings", *Proceeding of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Held at Auckland, New Zealand, Paper No. 1790* (2000).



شکل ۳. نمودار تحلیل حساسیت پارامتر $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ نسبت به تغییر کمیته‌ی نرخ جذب و عمر مفید سازه (IO-LS).



شکل ۴. نمودار تحلیل حساسیت پارامتر $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ نسبت به تغییر کمیته‌ی نرخ جذب و عمر مفید سازه (LS-CP).

تحلیل حساسیت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ قاب سه طبقه در محدوده‌ی عملکرد IO-LS و شکل ۴ نتایج تحلیل حساسیت قاب سه طبقه در محدوده‌ی عملکرد LS-CP را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر عمر مفید سازه بین ۴۰ تا ۶۰ سال، همواره نسبت $\frac{\Delta B_t}{\Delta C}$ بزرگ‌تر از ۱ خواهد بود، که به این مفهوم است که ساخت سازه در

3. Koutromanos, I., Stavridis, A., Benson Shing, P. and Willam, K. "Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads", *Journal of Computers and Structures*, **89**(11), pp. 1026-1037 (2011).
4. Largos, N., Fotis, A. and Krikos, A. "Assesment of seismic design procedures based on the total cost", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**(11), pp. 1381-1401 (2006).
5. Goda, K., Lee, C.S. and Hong, H.P. "Lifecycle cost-benefit analysis of isolated buildings", *Journal of Structural Safety*, **32**(1), pp. 52-63 (2010).

6. Theil, C. and Hagen, S. "Economic analysis of earthquake retrofit options: an application to welded steel moment", *The Structural Design of Tall Buildings*, **7**(1), pp. 1-19 (1998).
7. Ravanshadnia, H. "Technical and economical evaluation of steel frames in different performance levels", MsC. Thesis, Tarbiat Modares University (2010) (In persain).
8. Valca'rcel, J.A., Mora, M.G., Cardona, O.D., Pujades, L.G., Barbat, A.H. and Bernal, G.A. "Methodology and applications for the benefit costanalysis of the seismic risk reduction in building portfolios at broadscale", *Journal of Natural Hazards*, **69**, pp. 845-868 (2013).
9. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Strong Gound Motin Database. <http://www.peer.berkly.edu.smcat/>
10. Computers and Structure Inc. (CSI), Perform(3D) User Guide, University of Berkeley, California, USA.
11. Mostafaei, H. and Kabeyasawa, T. "Effect of infill masonry walls on the seismic response of reinforced concrete buildings subjected to the 2003 Bam earthquake strong motion: A case study of Bam telephone center", *Bulletin of Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, **79**, pp. 133-156 (2004).
12. Federal Emergency Management Agency, *FEMA 350: Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Building*, Washington, DC (2000).
13. Seyed Hosseini, S.M., *Economy Engineering and Decision Analysis*, IUST Press (2nd Ed) (2007).
14. Kappos, A.J. and Dimitrakopoulos, G. "Feasibility of pre-earthquake trengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis with the aid of fragility curves", *Journal of Natural hazards*, **45**(1), pp. 33-54 (2008).
15. FEMA227, *A Benefit/Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Building*, California, Federal Emergency Management Agency (1992).
16. FEMA356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitatn of Buildings*. Washington, D.C., Federal Emergency Management Agency (2000).
17. "Producer price index".cbi(online). Available at:UR:<http://www.cbi.ir/simplelist/1591.aspx>.Accessed Jul 30, 2012.
18. Bureau of Technical Execution System, *Seismic Hazards Analysis for I.R. Iran- phase-1: Tehran*, President Deputy Startegic Planning Control.
19. Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. and Kanamori, H. "Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, modified mercalli intensity in California", *Earthquake Spectra*, **15**(3), pp. 557-564 (August 1999).