

معرفی یک شاخص خرابی لرزه‌ای با کارایی بالا از بین شاخصهای تحلیلی موجود

مهدی فیروزبخت، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران - مهندسی زلزله، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

حمیدرضا وثوقی‌فر، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد جنوب تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

سعید عرفانی، استادیار، گروه مهندسی عمران - مهندسی زلزله، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

چکیده

اطلاق می‌گردد و معمولاً از روی مقیاس از صفر (عدم خرابی یا خسارت) تا یک (خرابی یا خسارت کلی) بیان می‌شود [۱].

بر مبنای تحقیقات انجام گرفته محققان، برای ارزیابی لرزه‌ای ساختمانهای موجود چند روش به کار گرفته می‌شود. در یک دسته‌بندی می‌توان آنها را در دو گروه روشهای تجربی (بازدید سریع چشمی بر مبنای قضاوت مهندسی) و تحلیلی (مدلسازی) طبقه‌بندی کرد. در صورتی که نتایج ارزیابی لرزه‌ای سریع ناکافی و به مطالعه بیشتری نیاز باشد، ادامه روند ارزیابی در مرحله دوم (انجام ارزیابی لرزه‌ای سریع چشمی بر مبنای قضاوت مهندسی) و تحلیلی (مدلسازی) طبقه‌بندی کرد.

در صورتی که نتایج ارزیابی لرزه‌ای سریع ناکافی و به مطالعه بیشتری نیاز باشد، ادامه روند ارزیابی در مرحله دوم (انجام ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی) صورت می‌گیرد. در این مرحله، بعد از تهیه و مطالعه نقشه‌هایی چون ساخت^۱، مدلسازی کامپیوتری صورت می‌گیرد و مدل تهیه شده از ساختمان با تحلیل‌های دینامیکی خطی، دینامیکی غیرخطی و روش بار جانبی فزاینده^۲ مورد مطالعه دقیق قرار می‌گیرد. در صورتی که این مطالعات، آسیب‌پذیری ساختمان را برای سطح زلزله و سطح عملکرد مورد نظر نشان دهند، به بررسی گزینه‌های مختلف برای بهسازی ساختمان اقدام خواهد شد.

در اغلب اوقات اگر تغییر عملکرد ساختمان امکانپذیر باشد و مقاومت ساختمان از حد مطلوب فاصله زیادی نداشته باشد می‌توان به ترمیم و بهسازی ساختمان اقدام کرد و در مواردی که مقاومت ساختمان به هیچ وجه رضایت‌بخش و مقاوم‌سازی آن نیز امکانپذیر نباشد به ناچار باید در مورد تخریب و ساخت مجدد آن تصمیم‌گیری نمود [۳].

در این تحقیق با مروری بر تاریخچه شاخصهای خرابی لرزه‌ای تحلیلی در چهار دهه اخیر و بررسی جزئیات و

بر مبنای تحقیقات انجام گرفته محققان، برای ارزیابی لرزه‌ای ساختمانهای موجود چند روش به کار گرفته می‌شود. در یک دسته‌بندی می‌توان آنها را در دو گروه روشهای تجربی (بازدید سریع چشمی بر مبنای قضاوت مهندسی) و تحلیلی (مدلسازی) طبقه‌بندی کرد. در صورتی که نتایج ارزیابی لرزه‌ای سریع ناکافی و به مطالعه بیشتری نیاز باشد، ادامه روند ارزیابی در مرحله دوم (انجام ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی) صورت می‌گیرد. در این تحقیق با مروری بر تاریخچه شاخصهای خرابی لرزه‌ای تحلیلی در چهار دهه اخیر و بررسی جزئیات و تعیین نقاط قوت و ضعف برخی از این شاخصها، رابطه‌ای کارا برای ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی ساختمانهای موجود در ایران معرفی شده است. با بررسی مقایسه‌ای شاخصهای مختلف ارزیابی لرزه‌ای پیشنهاد می‌شود که شاخص خرابی لرزه‌ای رافائل و میر مبنای کار محققین در کشور قرار گیرد. این رابطه پیشنهادی در مقایسه با سایر روشهای مشابه به دلیل سهولت تعیین پارامترهای مشخص‌کننده میزان خرابی کلی، می‌تواند موجب تسریع در تصمیم‌گیری شود. در پایان به منظور نشان دادن چگونگی تعیین پارامترهای مشخص‌کننده میزان خرابی کلی رابطه پیشنهادی، دو سازه فولادی و بتنی دو بعدی مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفتند و میزان خرابی کلی برای آنها تعیین شد.

کلیدواژه‌ها: مدلسازی، آسیب‌پذیری، رافائل و میر، خرابی کلی

۱- مقدمه

آسیب‌پذیری لرزه‌ای به میزانی از خرابی یا خسارت که به مجموعه‌ای از عوامل در معرض زلزله وارد می‌شود،

تاریخچه بارگذاری است، پیشنهاد دادند. این شاخص تفاوت پاسخ اعضا به ممانهای مثبت و منفی را در نظر می‌گیرد. در سال ۱۹۸۸ پاول و ا... آبادی [۱۲] روشی بر مبنای تغییرشکل پلاستیک برای محاسبه شاخص خرابی ارائه نمودند.

در سال ۱۹۹۲ کونات و همکاران [۱۳] مدل خرابی پارک و آنگ را اصلاح نمودند. در این مدل دوران مقطع و نگر تسلیم به ترتیب به جای تغییر مکان و مقاومت تسلیم در نظر گرفته شدند.

در سال ۱۹۹۳ رابطه پاول و ا... آبادی توسط کوزنزا و همکاران [۱۴] با همان مینا ولی با دخالت قابلیت جذب انرژی پلاستیک تحت بارگذاری تکرار شونده با سیمای کاملتری بیان گردید.

در سال ۱۹۹۶ رینهورن و همکاران [۱۵] با استفاده از داده‌های شاخص خرابی پارک و آنگ، شاخصی را پیشنهاد دادند که می‌تواند برای تعیین عملکرد المانهای سازه‌ای، طبقات و پاسخ کلی یک ساختمان به کار رود.

در سال ۲۰۰۱ ایمورا و میکامی [۱۶] نشان دادند که شاخص خرابی سازه‌ها می‌تواند پس از تعیین برنامه‌های عملکرد لرزه‌ای و محدودیتهای سازه‌ای به دست آید.

در سال ۲۰۰۲ پایادوپولوس و همکاران [۱۷] سه شاخص خرابی برای ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی ساختمانهای بتنی موجود پیشنهاد دادند.

در سال ۲۰۰۳ ساری و همکاران [۱۸] در مطالعه خود، به منظور به دست آوردن ارتباط بین پارامترهای لرزه‌ای حرکت زمین و خرابی سازه‌ای از شاخصهای خرابی پارک و آنگ کمک گرفتند.

در سال ۲۰۰۵ کولومبو و نگرو [۱۹] یک شاخص خرابی کلی بر مبنای زوال مقاومت ارائه نمودند.

در سال ۲۰۰۷ وانگ و همکاران [۲۰] شاخصهایی ساده برای محاسبه ایمنی طبقاتی که آسیبهایی را در زلزله‌های گذشته تجربه کرده‌اند، بر اساس فرکانس طبیعی مودی و اشکال مودی ارائه دادند.

در همان سال استکانچی و همکاران [۲۱] نشان دادند که انتخاب تصادفی شتابنگاشتها و همچنین شاخصهای

تعیین نقاط قوت و ضعف برخی از این شاخصها، رابطه‌ای کارا برای ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی ساختمانهای موجود در ایران معرفی شده است.

۲- تاریخچه شاخصهای خرابی لرزه‌ای تحلیلی

در زمینه ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی ساختمانهای موجود، تحقیقات مفصلی انجام پذیرفته است که در این قسمت به اهم آنها اشاره می‌شود.

در سال ۱۹۷۱ کراوینکلر و همکاران [۴] یک اندیس خرابی به منظور تخمین خرابی تجمعی پیشنهاد دادند که به طور مستقیم با پارامترهای عملکرد سازه، میزان تغییرشکل پلاستیک، تغییرشکل تسلیم و تعداد کل حرکات رفت و برگشتی در زلزله ارتباط دارد.

در همان سال نیومارک و رزن بلو [۵] در ارزیابی ظرفیتهای سازه‌ای از نسبت شکل‌پذیری استفاده کردند.

در سال ۱۹۷۵ اوکادا و برسلر [۶] روشی را برای ارزیابی ایمنی لرزه‌ای ساختمانهای بتنی مسلح کوتاه مرتبه توسعه دادند که مبتنی بر سه مرحله غربالگری^۳ می‌باشد. در هر مرحله از غربالگری اگر ساختمان ایمن قلمداد نشود، به مرحله بعدی غربالگری رجوع می‌شود. این فرآیند تا وقتی که ایمنی سازه روشن شود ادامه می‌یابد.

در سال ۱۹۷۷ برترو و برسلر [۷] شاخصهای آسیب‌پذیری محلی^۴، کلی^۵ و تجمعی^۶ را تعریف نمودند.

در سال ۱۹۸۱ سوزن [۸] خرابی سازه‌ها را به صورت درصدی از بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های^۷ تعریف کرد.

در سال ۱۹۸۵ پارک و آنگ [۹] برای محاسبه شاخص خرابی یک ترکیب خطی که مشتمل از تغییرشکل حداکثر و اثرات بارگذاری تکرار شونده بود را معرفی کردند. این مدل خرابی را می‌توان به طبقه و کل ساختمان نیز تعمیم داد.

در سال ۱۹۸۷ رافائل و میر [۱۰] شاخصی کلی برای برآورد خرابی ساختمانهای بتنی و فولادی موجود پیشنهاد دادند.

در همان سال، چونگ و همکاران [۱۱] یک شاخص خرابی با اصلاح‌کننده‌های خرابی که منعکس‌کننده اثر

خرابی متفاوت، تأثیر قابل توجهی بر نتایج عکس‌العملهای سازه‌های فولادی و خرابی این نوع سازه‌ها دارد. در سال ۲۰۰۸ گوان و همکارش [۲۲] به ارائه شاخصی بر اساس دوران و جابه‌جایی مدی^۱ پرداختند. صحت نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشات انجام شده، مزیت نسبی این روش پیشنهادی را در مقایسه با روشهای مشابه تأیید می‌کند.

در سال ۲۰۱۰ برقی و رجبی [۲۳] با آزمایش بر روی ستونهای بتن آرمه با نوع انهدام خمشی و تمرکز بر روی بارگذاری دوره‌ای و استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تحلیل خرابی ۹۵ ستون، به توسعه مدل خرابی پارک و آنگ پرداختند.

$$SDI_j = \sum_{i=1}^{m_j} \lambda_{kj} \cdot DI_{kj}, \quad \lambda_{kj} = \frac{E_{kj}}{E_j} \quad (2)$$

که در آن SDI_j ، DI_{kj} ، E_{kj} و E_j به ترتیب شاخص خرابی طبقه j ام، شاخص خرابی عضو k ام از طبقه j ام، انرژی چرخه‌ای عضو k ام از طبقه j ام، انرژی چرخه‌ای طبقه j ام (که از مجموع انرژیهای چرخه‌ای اعضای طبقه j ام به دست می‌آید) و تعداد اعضای طبقه j ام می‌باشند.

همچنین میزان شاخص خرابی برای کل ساختمان مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$ODI = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot SDI_i, \quad \lambda_i = \frac{E_i}{E_T} \quad (3)$$

که در آن ODI ، SDI_i ، E_i و E_T به ترتیب شاخص خرابی کل ساختمان، شاخص خرابی طبقه i ام، انرژی چرخه‌ای طبقه i ام، انرژی چرخه‌ای کل ساختمان (که از مجموع انرژی چرخه‌ای تک تک اعضای طبقات به دست می‌آید) و تعداد طبقات ساختمان می‌باشند.

این محققان حدود بازه‌های آسیب‌پذیری و شیوه برخورد با ساختمانهای مورد ارزیابی را مطابق جدول (۱) پیشنهاد دادند.

مدل خرابی پارک و آنگ یکی از متداولترین شاخصهای خرابی است که برای تخمین خرابی اعضای به کار گرفته می‌شود. اگر چه این شاخص اولین بار بر مبنای رفتار سازه‌های بتنی استخراج شده است، اما به دلیل مفهوم فیزیکی آشکار و استفاده آسان از آن، این شاخص برای سازه‌های فولادی هم قابل استفاده می‌باشد. این شاخص مطابق رابطه (۱) به صورت ترکیبی از تغییرشکل حداکثر و اثرات بارگذاری تکرارشونده بیان می‌شود:

مدل خرابی پارک و آنگ [۹]

۳- بررسی مقایسه‌ای برخی از شاخصهای خرابی لرزه‌ای تحلیلی ساختمانهای موجود

۱-۳- مدل خرابی پارک و آنگ [۹]

مدل خرابی پارک و آنگ [۹]

$$DI_{P\&A} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

که در آن δ_m ، δ_u ، β و Q_y به ترتیب حداکثر تغییرشکل ایجاد شده در عضو (حاصل از تحلیل دینامیکی

جدول (۱): حدود بازه‌های آسیب‌پذیری و پیشنهاد شیوه برخورد با ساختمانهای مورد ارزیابی.

وضعیت سازه	مشاهده فیزیکی	شاخص خرابی	میزان خرابی
بدون خرابی	وقوع ترکهای پراکنده	$ODI < 0.1$	سبک
خرابی جزئی	ترکهای جزئی - خرد شدن جزئی بتن در ستونها	$0.1 \leq ODI < 0.25$	جزئی
قابل تعمیر	ترکهای وسیع - کنده شدن بتن در المانهای ضعیف‌تر	$0.25 \leq ODI < 0.4$	متوسط
غیرقابل تعمیر	خرد شدن وسیع بتن - کمانش آشکار آرماتور	$0.4 \leq ODI < 1.0$	شدید
نابودی ساختمان	فروریختگی تمام یا قسمتی از ساختمان	$ODI \geq 1.0$	فروریختگی

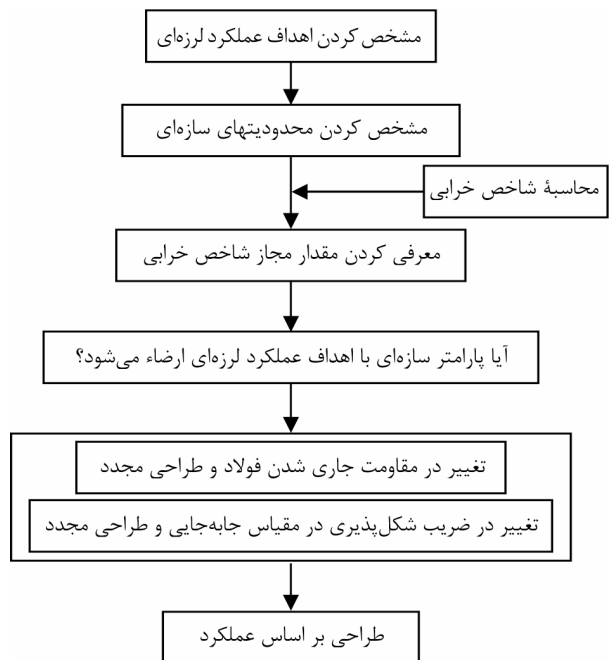
جدول (۲): ارتباط بین شاخص خرابی و میزان خرابی.

میزان خرابی	حد نهایی شاخص خرابی	مشخصات ظاهری سازه
بدون آسیب	۰/۰۸	بدون تغییر شکل و ترک
در حد سرویس	۰/۱۸	وجود ترکهای متوسط تا شدید
قابل تعمیر	۰/۳۶	قلوه کن شدن پوشش بتن
غیر قابل تعمیر	۰/۶۰	کمانش آرماتورها- نمایان شدن هسته
فروریزش		از بین رفتن مقاومت برشی و محوری

در مجموع از آنجایی که در این روش، میزان خرابی کل ساختمان از مجموع میزان خرابی تک تک اعضاء طبقات ساختمان محاسبه می‌شود، استفاده از این روش بسیار وقتگیر و پرهزینه خواهد بود.

۳-۲- مدل خرابی ایمورا و میکامی [۱۶]

ایمورا و میکامی یک نمودار گردشی را مطابق نمودار (۱) ارائه دادند که در آن، شاخص خرابی سازه‌ها پس از تعیین برنامه‌های عملکرد لرزه‌ای و محدودیتهای سازه‌ای به دست می‌آید. این موضوع سبب می‌شود تا مهندس محاسب با توجه به محدودیتهای ایجاد شده توسط شاخص خرابی، طراحی مطلوبتری را بر اساس عملکرد انجام دهد.



نمودار (۱): نمودار گردشی طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد.

این محققان به منظور ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی سازه‌های بتنی از رابطه (۴) استفاده کردند و ارتباط بین شاخص و میزان خرابی را مطابق جدول (۲) در نظر گرفتند [۲۴]:

$$DI = \frac{\mu_d - 1}{\mu_u - 1} + \frac{\beta \mu_h}{\mu_u} \quad (4)$$

که در آن μ_d ، μ_u ، β و μ_h به ترتیب شکل‌پذیری، شکل‌پذیری نهایی، ضریب ثابت و انرژی جذب شده ناشی از شکل‌پذیری می‌باشند.

۳-۳- مدل خرابی نیومارک و رزن بلو [۵]

نیومارک و رزن بلو در ارزیابی ظرفیتهای سازه‌ای از نسبت شکل‌پذیری مطابق رابطه (۵) استفاده کردند:

$$DI = \frac{\delta_a}{\delta_y} \quad (5)$$

که در آن δ_a و δ_y به ترتیب حداکثر تغییر مکان (طبقه یا بام) و تغییر مکان لحظه تسلیم تحت بار استاتیکی یکنواخت می‌باشند. اگر در این رابطه حداکثر تغییر مکان طبقه یا بام محاسبه شود، به ترتیب شاخصهای خرابی طبقه و کل ساختمان به دست می‌آید.

معمولاً فرض می‌شود زمانی که شکل‌پذیری نیاز^۹ از ظرفیت شکل‌پذیری سازه‌ای تجاوز کند، گسیختگی رخ می‌دهد.

از آنجایی که این شاخص، اثر مدت زمان و محتوای فرکانسی حرکات زمین را به حساب نمی‌آورد، در نتیجه شاخصی رضایت‌بخش نمی‌باشد.

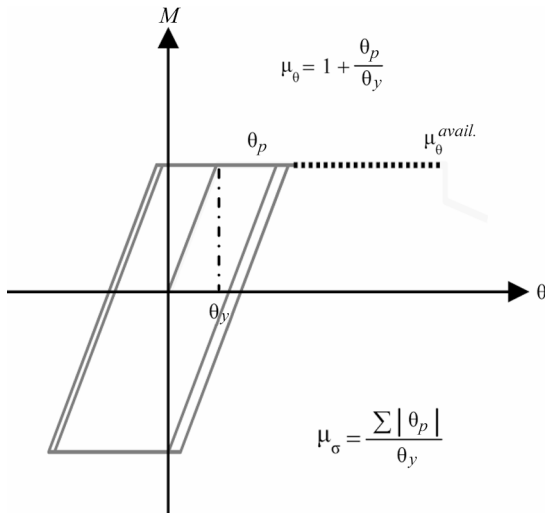
۳-۴- مدل خرابی سوزن [۸]

سوزن مطابق رابطه (۶) خرابی سازه‌ها را به صورت درصدی از بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای تعریف کرد. جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای به صورت بیشینه تغییر مکان بین دو طبقه همپایه (نرمال) شده^{۱۰} به ارتفاع طبقه تعریف می‌شود:

$$DI = 25 - 50\gamma \quad (6)$$

که در آن γ ، بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای بر حسب درصد است.

از تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش بر روی اجزاء و سازه‌های با مقیاس کوچک، مشخص شده است که مقدار



شکل (۱): تعریف ضرایب μ_θ و μ_σ .

$$GDI = \frac{\sum \lambda_i \cdot LFI_i}{\sum \lambda_i} \quad (9)$$

که در آن λ_i ضریب وزنی مقطع می‌باشد. این ضریب می‌تواند برای همه مقاطع برابر یک در نظر گرفته شود و یا به طور جداگانه با توجه به اهمیت مقطع در ایمنی سازه در برابر مکانیسم فروریزش تغییر داده شود.

این شاخص، سطحی از خرابی را بدون اطلاعاتی درباره حاشیه باقی ماندن در برابر فروریزش سازه‌ای ارائه می‌کند. اگر چنین اطلاعاتی مورد نیاز شود باید بیشینه مقدار این شاخص نسبت به فروریزش سازه‌ای محاسبه شود. این بیشینه مقدار، GDI_f نامیده می‌شود که وضعیت نهایی سازه را قبل از فروریزش نشان می‌دهد.

شاخص گسیختگی کلی مطابق رابطه (۱۰) از نسبت شاخص GDI به GDI_f به دست می‌آید:

$$GFI = \frac{GDI}{GDI_f} \quad (10)$$

محدوده مقادیر هر سه شاخص پیشنهادی از صفر (عدم خرابی یا خسارت) تا یک (خرابی یا خسارت کلی) تغییر می‌کند.

در مجموع از آنجایی که برای محاسبه میزان خرابی کل ساختمان باید میزان خرابی تک تک اعضاء طبقات ساختمان محاسبه شود، استفاده از این روش بسیار وقتگیر و پرهزینه خواهد بود.

جابه‌جاییهای نسبی بین طبقه‌ای کوچکتر از ۱ درصد، بزرگتر از ۴ درصد و بزرگتر از ۶ درصد به ترتیب باعث خرابی اجزای غیرسازه‌ای، خرابیهای جبران‌ناپذیر و خرابی کلی ساختمان می‌شود [۲۵].

از آنجایی که این شاخص، اثرات خرابیهای تجمعی به واسطه تکرار تغییرشکل غیرالاستیک را در نظر نمی‌گیرد، در نتیجه شاخصی رضایت‌بخش نمی‌باشد.

۳-۵- مدل خرابی پادوپولوس و همکاران [۱۷]

پادوپولوس و همکاران به منظور ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی ساختمانهای بتنی موجود، سه شاخص خرابی به نامهای شاخص گسیختگی محلی^{۱۱}، شاخص خرابی کلی^{۱۲} و شاخص گسیختگی کلی^{۱۳} پیشنهاد دادند که در ادامه جزئیات آنها آورده شده است.

شاخص گسیختگی محلی برای هر مقطع مطابق رابطه (۷) تعریف می‌شود. این شاخص تغییرشکل‌های فراالاستیک^{۱۴} رخ داده شده و همچنین میزان خستگی در مقطع بحرانی^{۱۵} را در نظر می‌گیرد و حاشیه‌ای برای فروریزش هر مقطع ارائه می‌کند:

$$LFI_i = \frac{\mu_\theta^* - 1}{\mu_\theta^{avail} - 1} \quad (7)$$

که در آن μ_θ^* ، ضریب شکل‌پذیری چرخشی کلی^{۱۶} نام دارد و مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود. این ضریب مستقیماً میزان خرابی مانند اندازه و وسعت ترکها را برای هر مقطع بحرانی مشخص می‌کند. همچنین μ_θ^{avail} ، ضریب شکل‌پذیری چرخشی موجود^{۱۷} نام دارد:

$$\mu_\theta^* = \mu_\theta + \mu_\sigma \frac{\mu_\sigma}{\mu_\sigma} = \mu_\theta \left(1 + \frac{\mu_\sigma}{\mu_\sigma} \right) \quad (8)$$

که در آن μ_θ ، μ_σ و μ_o به ترتیب ضریب شکل‌پذیری چرخشی، ضریب شکل‌پذیری تجمعی و پارامتر بیان‌کننده درصد مشارکت تعداد دوره‌های بارگذاری در خرابیهای رخ داده، می‌باشند. شکل (۱) ضرایب μ_θ و μ_σ را تعریف می‌کند. مطابق رابطه (۹)، از مجموع شاخصهای گسیختگی محلی همه مقاطع بحرانی، شاخص خرابی کلی به دست می‌آید:

۳-۶- مدل خرابی رافائل و میر [۱۰]

رافائل و میر به منظور ارزیابی لرزه‌ای تحلیلی ساختمانهای بتنی و فولادی موجود، شاخصی بنام پارامتر خرابی کلی^{۱۸} را مطابق رابطه (۱۱) پیشنهاد دادند. محدوده مقادیر این شاخص از صفر (عدم خرابی یا خسارت) تا یک (خرابی یا خسارت کلی) تغییر می‌کند:

$$GDP = \frac{d_R - d_Y}{d_F - d_Y} \quad (11)$$

که در آن d_R ، d_Y و d_F به ترتیب بیشینه تغییر مکان بام تحت اثر زلزله (انتخاب نوع تحلیل بستگی به سیستم سازه‌ای، شکل، اندازه، اهمیت و دیگر ویژگیهای سازه مورد نظر دارد)، تغییر مکان بام متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک در یکی از ستونهای طبقه دوم به بالای سازه بر اساس روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌آور و تغییر مکان بام متناظر با در آستانه فروریزش قرار گرفتن یکی از ستونهای طبقه اول سازه بر اساس روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌آور.

این شاخص پیشنهادی در مقایسه با سایر شاخصهای خرابی به دلیل سهولت تعیین پارامترهای مشخص‌کننده میزان پارامتر خرابی کلی از سرعت بالایی برخوردار است و می‌تواند موجب تسریع در تصمیم‌گیری شود. این در حالی است که دقت این شاخص در حد مناسبی نیز می‌باشد. دقت‌سنجی این شاخص توسط سایر محققین [۱۷، ۲۶] بررسی شده و همه نتایج حاکی از دقت مناسب این شاخص در مقایسه با سایر شاخصهایی است که اثرات توأم تغییرشکل‌های زیاد و بارگذاری دوره‌ای تکراری را در نظر می‌گیرند؛ از این رو به عنوان رابطه کارا برای استفاده مهندسين توصیه می‌شود.

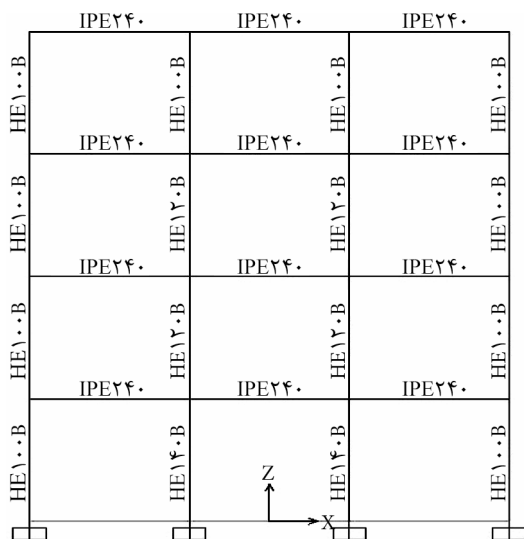
۴- ارزیابی لرزه‌ای دو سازه فولادی و بتنی دو بعدی با استفاده از شاخص خرابی رافائل و میر

در این قسمت به منظور نشان دادن چگونگی تعیین پارامتر خرابی کلی رابطه پیشنهادی رافائل و میر، دو سازه فولادی و بتنی دو بعدی با استفاده از شاخص خرابی رافائل و میر مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار می‌گیرند و مقدار پارامتر خرابی کلی برای آنها تعیین می‌شود.

۴-۱- ارزیابی لرزه‌ای سازه فولادی دو بعدی با

استفاده از شاخص خرابی رافائل و میر [۲۶]

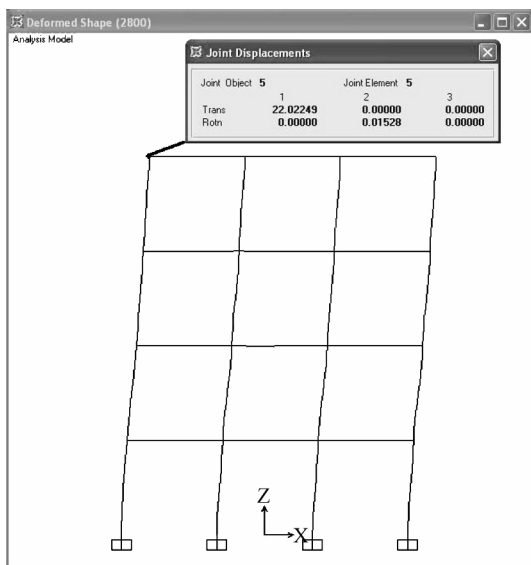
سازه مورد مطالعه دارای چهار طبقه با ارتفاع یکسان ۳ متر و سه دهانه با طول یکسان ۳ متر است. محل احداث سازه در شهر کرج و بر روی خاک نوع II بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [۲۷] است. با توجه به نقشه‌های اجرایی موجود، تیرهای دهانه‌های سمت وسط و راست به صورت گیردار، تیرهای دهانه سمت چپ به صورت مفصلی و اتصالات ستون به کف ستون به صورت گیردار اجرا شده است. عملکرد دیافراگم طبقات صلب و بارهای مرده و زنده به ترتیب برابر ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر و ۷۰۰ کیلوگرم بر متر فرض شده است. برای مدلسازی نیز از نرم‌افزار *SAP2000, Advanced Version 11.0.8* استفاده شده است. در شکل (۲)، نوع مقطع اعضاء سازه نشان داده شده است. هر نرم‌افزاری در موارد متعددی بر مبنای پیش‌فرضهایی کار می‌کند که این پیش‌فرضها بیشتر بر مبنای عرف و عادت رایج مهندسان کشور تهیه‌کننده نرم‌افزار انتخاب شده است. برای نمونه، نرم‌افزار *SAP2000* در مصالح فولادی، مبنای فولاد را *A992F_y50* که تا حدودی قویتر از فولاد *ST37* است، قرار می‌دهد. بنابراین باید در هنگام اختصاص مشخصات مصالح به المانها، مشخصات مصالح *ST37* را به المانها اختصاص دهیم.



شکل (۲): نوع مقطع اعضاء سازه مورد بررسی.

می‌توان این مقدار پیش فرض را قبول یا تغییرمکان هدف را به صورت تقریبی محاسبه کرد و سپس بر اساس توصیه دستورالعمل بهسازی ایران [۲۸] حد توقف آنالیز را حداقل ۱/۵ برابر تغییرمکان هدف در نظر گرفت. این ضریب توصیه شده تنها در جهت مشاهده رفتار سازه در محدوده تغییرمکانهای فراتر از تغییرمکان هدف برای رسیدن به فهم بهتری از رفتار سازه تحت اثر زلزله‌های اعمالی است و ضرورت چندان برای اعمال آن وجود ندارد. در بعضی مواقع وارد کردن یک مقدار نامناسب برای این پارامتر، به علت سعی برنامه برای رسیدن به این تغییرمکان، باعث بوجود آمدن ناپایداریهای عددی و واگرایی می‌شود که این امر منجر به نمایش پیغام *WARNING* در فرم انتهای آنالیز خواهد شد [۲۹]. در این ارزیابی، مقدار پیش فرض برنامه برای حد توقف آنالیز پذیرفته شد.

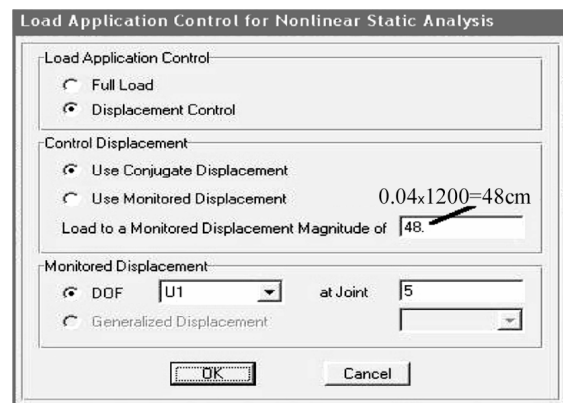
همان طور که در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است، مقدار تغییرمکان بام متناظر با تحلیل استاتیکی معادل (از آنجا که سازه منظم و ارتفاع آن کمتر از ۵۰ متر از تراز پایه است می‌توان سازه را بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به روش تحلیل استاتیکی معادل تحلیل نمود)، تشکیل اولین مفصل پلاستیک در یکی از ستونهای طبقه دوم به بالای سازه و در آستانه فروریزش قرار گرفتن یکی از ستونهای طبقه اول سازه به ترتیب برابر ۲۲/۰۳، ۱۴/۵۱ و ۳۵/۹۲ سانتیمتر می‌باشند.



شکل (۴): تغییرمکان بام متناظر با تحلیل استاتیکی معادل.

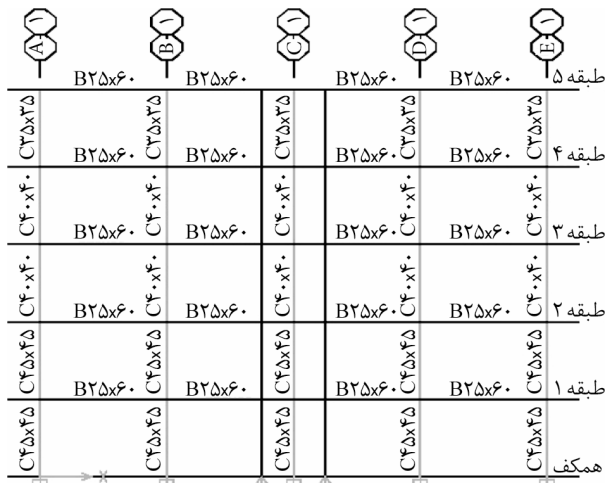
پس از ساخت و آنالیز مدل خطی سازه، مفاصل پلاستیک به المانهای سازه نسبت داده شدند. در دهانه‌های سمت وسط و راست با توجه به گیردار بودن انتهای تیرها و زیاد نبودن بارهای ثقلی (بار مرده و زنده)، مفاصل پلاستیک به دو انتهای تیرها اختصاص داده شدند. ضمناً با توجه به اینکه تیرهای دو سر مفصل معین هستند و تنها برای بارهای ثقلی طراحی می‌شوند؛ بنابراین برای تیرهای دهانه سمت چپ هیچ‌گونه حالت خمیری در نظر گرفته نمی‌شود. در ستونها نیز مفاصل پلاستیک به دو انتهای المان ستون اختصاص داده شدند. سپس بعد از اعمال بارهای ثقلی، بارهای جانبی در ادامه این بارها اضافه شدند. برای توزیع بار جانبی از توزیع متناسب با توزیع بار جانبی در روش استاتیکی خطی (از این توزیع زمانی استفاده می‌شود که حداقل ۷۵ درصد جرم سازه در مود ارتعاشی اول در جهت مورد نظر مشارکت کند)، توزیع متناسب با شکل مود اول ارتعاش (از این توزیع زمانی استفاده می‌شود که حداقل ۷۵ درصد جرم سازه در این مود مشارکت کند) و توزیع یکنواخت که در آن بار جانبی، متناسب با وزن هر طبقه محاسبه می‌شود تنها در یک جهت بر سازه استفاده شد.

با کامل شدن مدل غیرخطی و انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی سازه می‌توان پارامترهای مربوط به شاخص خرابی رافائل و میر را برداشت کرد. شایان ذکر است که نقطه کنترل تغییرمکان سازه، در گره شماره ۵ (گره سمت چپ طبقه انتهایی سازه) و مقدار تغییرمکان جانبی برای حد توقف آنالیز توسط نرم‌افزار به صورت پیش فرض برابر ۰/۰۴ ارتفاع ساختمان مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): جعبه ویرایشی مقدار تغییرمکان جانبی برای حد توقف آنالیز.

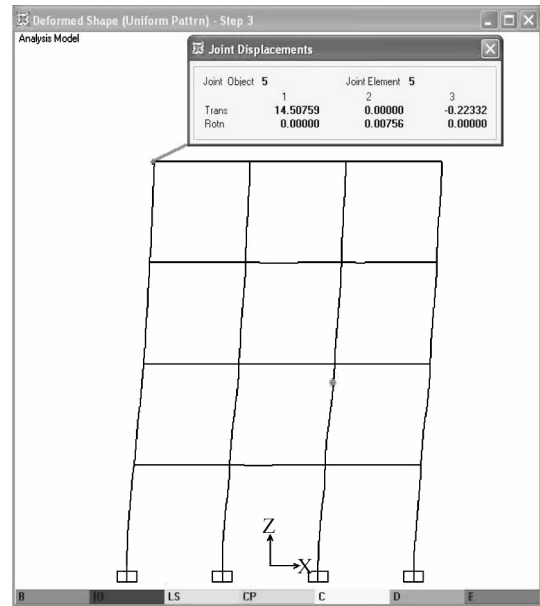
سیستم دوگانه با سقف تیرچه بلوک است که دارای پنج طبقه با ارتفاع یکسان ۳ متر و چهار دهانه با طول یکسان ۴ متر می‌باشد. محل احداث سازه در شهر کرج و بر روی خاک نوع II بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [۲۷] است. در این قاب، محل قرارگیری دیوار برشی به ضخامت ۲۵ سانتیمتر و به طول ۲ متر در محور C می‌باشد. مقدار بارهای مرده و زنده روی تمامی دهانه‌ها به ترتیب برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی نیز از نرم‌افزار ETABS استفاده شده است. در شکل (۷)، نوع مقطع اعضای سازه نشان داده شده است.



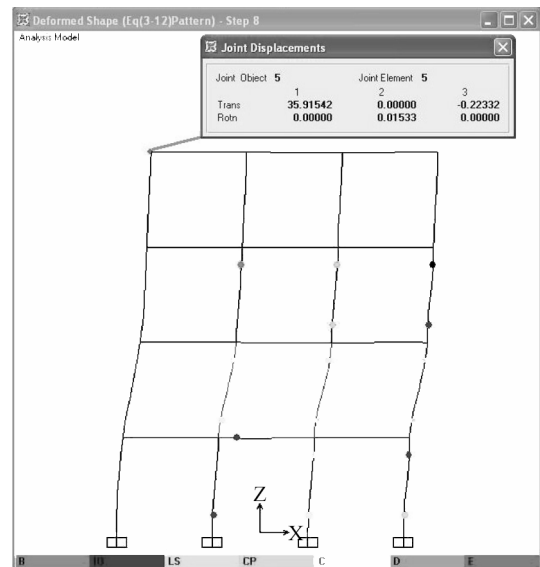
شکل (۷): نوع مقطع اعضای سازه مورد بررسی.

پس از ساخت و آنالیز مدل خطی سازه و در ادامه کامل شدن مدل غیرخطی و انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی سازه می‌توان پارامترهای مربوط به شاخص خرابی رافائل و میر را برداشت کرد. شایان ذکر است نقطه کنترل تغییر مکان سازه، در گره سمت راست طبقه انتهایی سازه در نظر گرفته شده است.

همان طور که در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است، مقدار تغییر مکان بام متناظر با تحلیل استاتیکی معادل، تشکیل اولین مفصل پلاستیک در یکی از ستونهای طبقه دوم به بالای سازه و در آستانه فروریزش قرار گرفتن یکی از ستونهای طبقه اول سازه به ترتیب برابر ۶۹/۳، ۵۲/۳ و ۱۶۴/۹ میلی‌متر می‌باشند.



شکل (۵): تغییر مکان بام متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک در یکی از ستونهای طبقه دوم به بالای سازه.



شکل (۶): تغییر مکان بام متناظر با در آستانه فروریزش قرار گرفتن یکی از ستونهای طبقه اول سازه.

بنابراین حد بالای مقدار پارامتر خرابی کلی شاخص

خرابی رافائل و میر برابر است با:

$$GDP = \frac{d_R - d_Y}{d_F - d_Y} = \frac{22.03 - 14.51}{35.92 - 14.51} = 0.36$$

۲-۴- ارزیابی لرزه‌ای سازه بتنی دو بعدی با استفاده

از شاخص خرابی رافائل و میر [۲۶]

سازه مورد مطالعه، یک قاب از ساختمانی بتنی با

بنابراین حد بالای مقدار پارامتر خرابی کلی شاخص خرابی رافائل و میر برابر است با:

$$GDP = \frac{d_R - d_Y}{d_F - d_Y} = \frac{69.3 - 52.3}{164.9 - 52.3} = 0.16$$

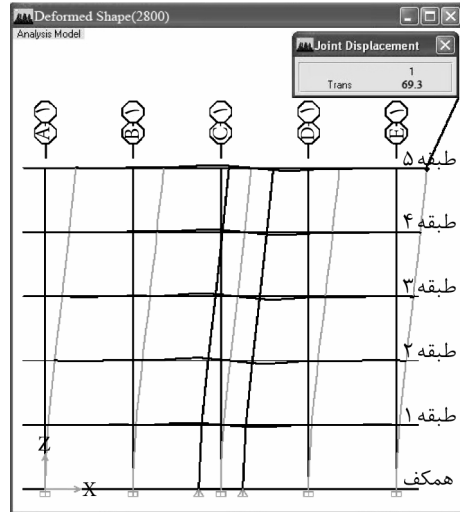
برای کاهش میزان پارامتر خرابی کلی می‌توان از روشهای مختلفی استفاده کرد. به عنوان مثال می‌توان ستونها و تیرها (در سیستم‌های قاب خمشی) را تقویت کرد یا با اضافه کردن مهاربندها و دیوارهای برشی، سختی جانبی سیستم را افزایش داد. همچنین با برداشتن دیوارهای سنگین و استفاده از پانلهای سبک، وزن سازه را کاهش داد و یا از گزینه‌های دیگری استفاده کرد.

علاقمندان می‌توانند برای جزئیات بیشتر به مرجع شماره [۲۶] مراجعه کنند.

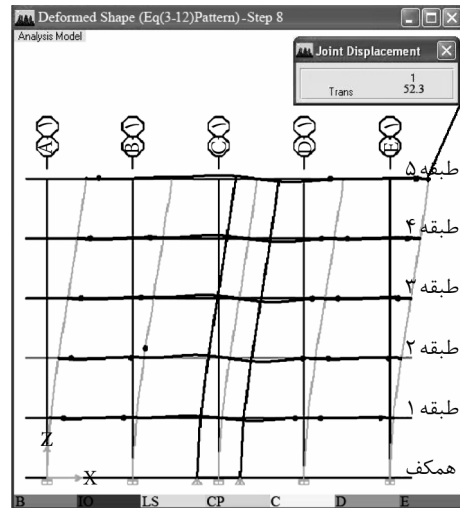
۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی مقایسه‌ای شاخصهای خرابی لرزه‌ای تحلیلی موجود می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

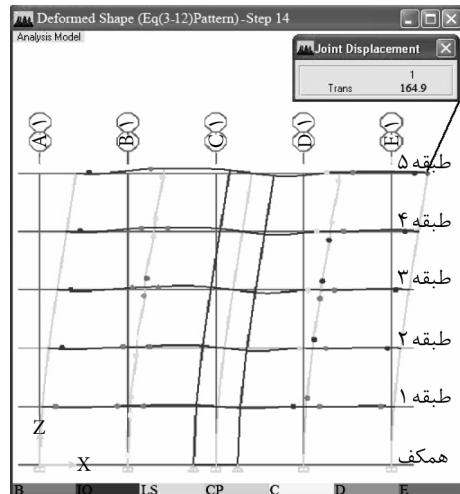
- مدل خرابی پارک و آنگ یکی از متداولترین شاخصهای خرابی است که برای تخمین خرابی اعضاء و در مقیاس بزرگتر به منظور تخمین میزان خرابی طبقه و کل ساختمان به کار گرفته می‌شود. در نظر گرفتن توأم اثرات تغییرشکل و بارگذاری تکرار شونده و مشاهده شدن همبستگی مناسب نتایج این شاخص با وضعیت خرابی بعد از زلزله [۹] از مزایای این شاخص پیشنهادی می‌باشند. در عین حال از آنجایی که میزان خرابی کل ساختمان از مجموع میزان خرابی تک تک اعضاء طبقات ساختمان محاسبه می‌شود، استفاده از این روش بسیار وقتگیر و پرهزینه خواهد بود.
- معرفی کردن مقدار مجاز شاخص خرابی بر اساس برنامه‌های عملکرد لرزه‌ای و محدودیتهای سازه‌ای از مهمترین مزیت پیشنهاد ایمورا و میکامی است که باعث می‌شود خطوط قرمز به هنگام طراحی دیده و مهندس محاسب به سمت طراحی مطلوبتر سوق داده شود.
- نیومارک و رزن بلو در ارزیابی ظرفیتهای سازه‌ای از نسبت شکل‌پذیری استفاده کردند. از آنجایی که این



شکل (۸): تغییر مکان بام متناظر با تحلیل استاتیکی معادل.



شکل (۹): تغییر مکان بام متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک در یکی از ستونهای طبقه دوم به بالای سازه.



شکل (۱۰): تغییر مکان بام متناظر با در آستانه فروریزش قرار گرفتن یکی از ستونهای طبقه اول سازه.

باید توسط تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و بر اساس شتابنگاشت‌های معین و متناسب صورت گیرد؛ اما هزینه زیاد، پیچیدگی و نیاز به دارا بودن دانش و پیش‌زمینه کافی، کاربرد این روش را نسبت به دیگر روش‌های مشابه محدود می‌کند.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند بدینوسیله از زحمات سرکار خانم مهندس مرضیه قنبری جهت آماده‌سازی اشکال و جداول موجود در مقاله تشکر و قدردانی کنند.

۷- منابع

۱. وثوقی فر، حمیدرضا، فیروزبخت، مهدی و کلانتری، افشین (۱۳۸۸). ارائه روشی سریع برای ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود در ایران، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال دوازدهم، شماره اول و دوم.
۲. فیروزبخت، مهدی، وثوقی فر، حمیدرضا و حسینی، محمود (۱۳۸۹). بررسی مقایسه‌ای روش‌های ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌های موجود در دستورالعمل‌های ارزیابی آمریکا، کانادا، هند و ایران. نشریه علمی-ترویجی بنا، شماره ۴۳.
۳. ناطقی‌الهی، فریبرز و حسینی، محمود (۱۳۷۱). ارزیابی ساختمان‌های موجود به روش بازدید عینی، اولین کنفرانس بین‌المللی مقابله با بلایای طبیعی در مناطق شهری، تهران: دفتر مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران.
4. Krawinkler, H. and Zohrei, M. (1983). Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions, *Computers and Structures*, **16**, 531- 541.
5. Newmark, N.M. and Rosenblueth, E. (1971). *Fundamentals of earthquake engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
6. Okada, T. and Bresler, B. (1975). Seismic safety of existing low-rise reinforced concrete buildings, Paper presented at a review meeting of the U.S.-Japan cooperative research program in

شاخص، اثر مدت زمان و محتوای فرکانسی حرکات زمین را به حساب نمی‌آورد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شاخصی رضایت‌بخش نمی‌باشد.

- سوزن، خرابی سازه‌ها را به صورت درصدی از بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای تعریف کرد. شاخص خرابی بر اساس بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای مشابه شاخص خرابی بر اساس نسبت شکل‌پذیری، اثرات خرابی‌های تجمعی به واسطه تکرار تغییرشکل غیرالاستیک را در نظر نمی‌گیرد. همچنین ارتباط بین خرابی و جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای بسته به بیشینه تغییرشکل در فروریزش متفاوت است؛ این تفاوت از درجات مختلف شکل‌پذیری سازه‌ای ناشی می‌شود، بنابراین شاخصی رضایت‌بخش نمی‌باشد.
- استفاده از روابط پیشنهادی پاپادوپولوس و همکاران علی‌رغم ساده بودن، در نظر گرفتن تأثیر خستگی برای مقاطع، محتوای فرکانسی و مدت زمان تحریک لرزه‌ای در سطح وسیع دشوار می‌باشند؛ زیرا برای محاسبه میزان خرابی کل ساختمان باید میزان خرابی تک تک اعضا طبقات ساختمان محاسبه شود که بسیار وقتگیر و پرهزینه خواهد بود.
- رابطه پیشنهادی رافائل و میر در مقایسه با سایر مدل‌های خرابی به دلیل سهولت تعیین پارامترهای مشخص‌کننده میزان پارامتر خرابی کلی از سرعت بالا و همچنین از دقت مناسبی برخوردار است؛ از این رو به عنوان رابطه کارا برای استفاده مهندسين توصیه می‌شود. در این پژوهش به منظور نشان دادن چگونگی تعیین پارامترهای مشخص‌کننده میزان خرابی کلی رابطه پیشنهادی، دو سازه فولادی و بتنی دو بعدی مورد ارزیابی قرار گرفتند و میزان خرابی کلی برای آنها تعیین شد.
- پس از ارزیابی‌های صورت گرفته شده در این پژوهش می‌توان ادعان کرد که روش بار جانبی فزاینده به دلیل سهولت کاربرد، سرعت انجام و سادگی تفسیر نتایج، روشی برای برآورد تقریبی پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان به ساده‌ترین شکل ممکن است. البته پر واضح است که در کلی‌ترین حالت، بررسی رفتار و برآورد عملکرد یک سازه

- Kunnath, S.K. (1996). Seismic damageability evaluation of a typical R/C building in the central U.S, The Quarterly Publication of NCEER, **10**(3).
16. Iemura, H. and Mikami, T. (2001). Demand spectra of yielding and ductility factor for required seismic performance objectives, *Proceeding of JSCE*, No. 689/ I-57, 333-342.
17. Papadopoulos, P., Mitsopoulou, E., and Athanatopoulou, A. (2002). Failure indices for R/C building structures, *12th European Conference on Earthquake Engineering*, Paper Reference 616.
18. Sari, A., Hazirbaba, K., and Yildirim, Y. (2003). A correlation study between ground motion parameters and damage during Kocaeli earthquake, *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Washington, Seattle.
19. Colombo, A. and Negro, P. (2005). A damage index of generalised applicability, *Engineering Structures*, **27**, 1164-1174.
20. Wang, J.F., Lin, C.C., and Yen, S.M. (2007). A story damage index of seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape, *Engineering Structures*, **29**, 2143-2157.
۲۱. استکانچی، همایون، کیانفر، احسان و وفائی، ابوالحسن (۱۳۸۵). کاربرد شاخصهای خرابی در تحلیل غیرخطی قابهای فولادی به روش زمان دوام، *فصلنامه علمی و پژوهشی شریف*، شماره ۳۳، ۱۳-۲۱.
22. Guan, H. and Karbhari, V. (2008). Improved damage detection method based on element modal strain damage index using sparse measurement, *Journal of Sound and Vibration*, **309**, 465-494.
۲۳. برقی، مصطفی و رجبی، روح ا... (۱۳۸۸). توسعه مدل شاخص خسارت پارک و آنگ در مورد ستونهای بتن آرمه، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.
24. Ghobarah, A. and Aly, N.M. (1998). Seismic reliability assessment of existing reinforced earthquake engineering with emphasis on the safety of school buildings, Honolulu, Hawaii.
7. Bertero, V. and Bresler, B. (1977). Panel on design and engineering decisions: failure criteria (limit states), *6th World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, India.
8. Sozen, M.A. (1981). Review of earthquake response of reinforced concrete buildings with a view to drift control, *State-of-the-Art in Earthquake Engineering*, Turkish National Committee on Earthquake Engineering Istanbul, Turkey, 383-418.
9. Park, Y.J., Ang, A.H-S., and Wen, Y.K. (1984). Seismic damage analysis and damage-limiting design of R.C. buildings, *Structural Research Series*, No. 516, University of Illinois, Urbana, Illinois.
10. Roufaiel, M.S.L. and Meyer, C. (1987). Reliability of concrete frames damaged by earthquake, *ASCE Journal of Structure Engineering*, **113**(3), 445-457.
11. Chung, Y.S., Meyer, C., and Shinozuka, M. (1987). Seismic damage assessment of reinforced concrete members, Report NCEER-87-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.
12. Powell, G.H. and Allahabadi, R. (1988). Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**, 719-734.
13. Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M., and Y Lobo, R.F. (1992). IDARC v 3.0: A program for the inelastic damage analysis of RC structure, Technical Report NCEER-92-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
14. Cosenza, E., Manfredi, G., and Ramasco, R. (1993). The use of damage functionals in earthquake engineering: A comparison between different methods, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, 855-868.
15. Reinhorn, A.M., Valles-Mattox, R.E., and

پوشش آور SAP2000-ETABS، تهران: نشر کتاب
دانشگاهی.

concrete buildings, *ASCE Journal of Earthquake Engineering*, 2(4), 569 -592.

25. Roufaiel, M.S.L. and Meyer, C. (1981). Analysis of damaged concrete frame buildings, Technical Report No. NSF-CEE-81-21359-1, Columbia University, New York, NY.

۸- پانوش

۱- *As Built*

۲- *Pushover*

۳- *Screening*

۴- *Local Damageability Index*

۵- *Global Damageability Index*

۶- *Cumulative Damageability Index*

۷- *Inter Storey Drift*

۸- *Modal Displacement and Modal Rotation*

۹- *Ductility Demand*

۱۰- *Normalized*

۱۱- *Local Failure Index*

۱۲- *Global Damage Index*

۱۳- *Global Failure Index*

۱۴- *Post Elastic*

۱۵- *Critical Cross-Section*

۱۶- *Generalized Rotational Ductility Factor*

۱۷- *Available Rotational Ductility Factor*

۱۸- *Global Damage Parameter*

۲۶. فیروزبخت، مهدی (۱۳۸۹). بررسی و ارائه شاخص خرابی لرزه‌ای کیفی برای ساختمانهای مسکونی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

۲۷. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی (۱۳۸۴). آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش سوم، تهران: مؤلف.

۲۸. معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله (۱۳۸۵). دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود (نشریه شماره ۳۶۰)، تهران: مؤلف.

۲۹. تقی‌نژاد، رامین (۱۳۸۸). طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس سطح عملکرد با استفاده از تحلیل