

ارزیابی شاخص خسارت پارک- انگ در سطوح عملکرد لرزه‌ای قابهای خمشی بتن مسلح

مهرداد پاژکی^۱، عباسعلی تسنیمی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

tasnimi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۹/۱۰]

تاریخ پذیرش: [۹۴/۱۲/۲۰]

چکیده- در این مقاله شاخص خسارت پارک-انگ، در سطوح عملکرد لرزه‌ای اعضای بتن مسلح بررسی شده است. یکی از مناسب‌ترین روش‌های ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، بررسی خسارت‌های ایجاد شده در اجزای سازه است. شاخص‌های خسارت معیارهایی هستند که سعی می‌کنند با در نظر گرفتن چند متغیر خسارت، آسیب‌های ایجاد شده در اعضا و کل سازه را کمی کنند. یکی از مهمترین شاخص‌های خسارت موجود، شاخص خسارت پارک-انگ است که خسارت اعضا را به صورت ترکیب خطی خسارت‌های ناشی از پیشینه تغییر شکل‌ها و رفتار چرخه‌ای بیان می‌کند. برای ارزیابی این شاخص خسارت در سطوح عملکرد، تعداد سه قاب خمشی بتن مسلح با طبقات مختلف در نظر گرفته شده و بر اساس آیین‌نامه‌های عملکردی و با تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی در سطوح عملکرد طراحی شده‌اند. قاب‌ها تحت هفت شتاب نگاشت، تحلیل دینامیکی غیرخطی شده و در نهایت بر اساس نتایج حاصل، تحلیل خسارت روی آنها صورت گرفته است. بر اساس نتایج حاصل چگونگی ارتباط میان شاخص خسارت پارک-انگ و معیار طراحی در آیین‌نامه‌های عملکردی ارزیابی شده است. در این مقاله حدود شاخص خسارت پارک-انگ در سطوح عملکرد تیرها و ستون‌های بتن مسلح تعیین شده و مشاهده شده است که این شاخص خسارت، در سطح عملکرد آستانه فروریزش نیاز به بررسی بیشتر دارد. این شاخص خسارت حساسیت کمی نسبت به خسارت ستون‌ها دارد و به مقادیر بسیار کمی نسبت به مقادیر قابل انتظار منجر می‌شود.

واژگان کلیدی: شاخص خسارت، سطوح عملکرد، قاب‌های خمشی بتن مسلح.

۱- مقدمه

سازه استفاده می‌شود. اگرچه پژوهش‌های زیادی برای تعیین ارتباط این ضریب با پارامترهای مختلف صورت گرفته ولی هنوز کاستی‌های زیادی وجود دارد [5].

در دو دهه‌ی گذشته، آیین‌نامه‌های لرزه‌ای از طراحی بر اساس مقاومت به سمت طراحی بر اساس شکل‌پذیری پیش رفته‌اند [6]. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که سیستم‌های طراحی شده بر اساس عملکرد دارای رفتار مناسب‌تری هستند [3-5]. با تمرکز پژوهش‌ها روی طراحی بر اساس عملکرد، یک روش ابتدایی عملکردی، در طراحی لرزه‌ای پل‌ها [7] و ساختمان‌های بتن مسلح [8]

هدف اصلی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، تامین ایمنی جانی در هنگام وقوع زلزله و تعمیرپذیر بودن سازه‌ی خسارت دیده، پس از وقوع زلزله است. تجربه زلزله‌های اخیر نشان داده است که ساختمان‌های طراحی شده با آیین‌نامه‌های مبتنی بر نیرو، دقت لازم برای محدود نمودن خسارت وارد شده به اجزای سازه را ندارند [1-2]. در زلزله‌های شدید دیده شده است که ساختمان‌های طراحی شده با این آیین‌نامه‌ها، دچار خسارت‌های شدید شده‌اند [3-4]. در آیین‌نامه‌های مبتنی بر نیرو، از ضریب R برای تعیین سطح مقاومت

سازه‌ها را می‌توان با تعیین حدود خسارت وارد شده به کمک شاخص خسارت کمی نمود.

شاخص‌های خسارت به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱. شاخص‌های محلی: شدت خسارت در یک عضو سازه‌ای را نشان می‌دهد.

۲. شاخص‌های میانی: خسارت در یک طبقه و به طور کلی در یک زیر سازه را نشان می‌دهد.

۳. شاخص‌های کلی: شدت خسارت در کل سازه را بیان می‌کنند.

در شاخص خسارت محلی از متغیرهای مربوط به عضو استفاده شده و محاسبه آنها مشکل‌تر است. این نوع شاخص‌ها اطلاعات بیشتری از خسارت‌ها بیان می‌کنند و نسبت به شاخص‌هایی که مستقیماً برای کل سازه تعریف می‌شوند، دارای اطلاعات بیشتری هستند.

۲-۱- شاخص خسارت پارک- انگ

شاخص خسارت پارک- انگ از جمله شاخص‌های محلی است که پتانسیل خسارت اعضای بتن مسلح را به صورت ترکیب خطی از خسارت‌های ناشی از بیشینه تغییرشکل‌ها و انرژی چرخه‌ای جذب شده ارائه می‌دهد [13]. برای توسعه این شاخص از آزمایش‌های زیادی با بارگذاری یکپارچه و چرخه‌ای استفاده شده است [15]. این شاخص به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D_{PA} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta_{PA} \frac{\int dE}{Q_y \delta_u} \quad (1)$$

در این شاخص خسارت، متغیرهای δ_m و dE وابسته به تاریخچه بارگذاری بوده و پارامترهای β_{PA} ، δ_u و Q_y مستقل از تاریخچه بارگذاری است که بر اساس ظرفیت عضو تعیین می‌شوند [15]. عبارت اول در رابطه بالا یک اندازه‌گیری شبه استاتیکی ساده از تغییر مکان‌ها است که آثار تجمعی آنرا در نظر نمی‌گیرد. در این شاخص خسارت آثار تجمعی تنها در عبارت دوم که مربوط به خسارت ناشی از استهلاک انرژی است، لحاظ می‌شود.

در شاخص خسارت پارک- انگ آثار کاهش مقاومت در رفتار چرخه‌ای روی خسارت عضو، با پارامتر β_{PA} بیان می‌شود [15]. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و با روش سعی و خطا رابطه ۲ برای ضریب β_{PA} ارائه شده است:

مطرح شده است. گام بسیار مهم در این روش‌های طراحی، تعیین محدوده خسارت برای رسیدن به سطح عملکرد اعضای بتن مسلح است.

این یک باور عمومی است که روش‌های جدید طراحی برای رسیدن به عملکرد مورد نظر، نیاز شدیدی به ارزیابی ایمنی لرزه‌ای دارند [9]. در آیین‌نامه‌های عملکردی، سطوح عملکرد بر اساس میزان خسارت‌های ایجاد شده در اجزای سازه و به صورت کیفی تعریف می‌شوند، این در حالی است که یک روش مدون برای تعیین محدوده خسارت با توجه به سطح عملکرد وجود ندارد [6]. مقادیر پیشنهاد شده در ادبیات فنی بر اساس قضاوت‌های مهندسی است و نمی‌تواند برای اعضای بتن مسلح با مشخصات مختلف تعمیم داده شود [10].

مطالعات زیادی روی خسارت‌های لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح انجام شده و روش‌های مختلفی برای آن توسعه داده شده است [11-12]. در این روش‌ها برای ارزیابی و کمی کردن خسارت‌ها از معیار شاخص خسارت استفاده می‌شود. شاخص‌های خسارت پلی هستند که میان خسارت اعضا و عملکرد آنها ارتباط برقرار می‌کنند [13]. بیشتر شاخص‌های خسارت به گونه‌ای تعریف شده‌اند که در نقطه‌ی گسیختگی، مقداری برابر واحد داشته باشند اما در تعریف تعداد کمی از شاخص‌ها به تعیین حدود اولیه خسارت برای مقاصد طراحی توجه شده است.

هدف این مقاله بررسی تغییرات شاخص خسارت پارک- انگ در سطوح عملکرد اعضای ساختمان‌های بتن مسلح است. برای این منظور تعداد سه قاب خمشی بتن مسلح در نظر گرفته شده و با تحلیل دینامیکی غیرخطی در سطوح عملکرد طراحی شده‌اند و در نهایت بر اساس نتایج به دست آمده، تحلیل خسارت انجام شده است. در این قاب‌ها علاوه بر بررسی مقادیر شاخص‌های خسارت اعضا در سطوح عملکرد، نحوه توزیع خسارت در بین اعضا ارزیابی شده است.

۲- شاخص خسارت

شاخص‌های خسارت توابعی است که با استفاده از چند متغیر، سعی دارند میزان خسارت وارد شده به یک عضو و یا کل سازه را نشان دهند. شاخص خسارت یک کمیت نرمال شده‌ای است که برای حالت الاستیک (بدون خسارت) مقدار آن برابر صفر و برای حالتی که گسیختگی روی داده، برابر با مقدار یک است [12]. عملکرد لرزه‌ای

خود را با دو تغییر عمده ارائه داده‌اند. آنها رابطه‌ی پارک-انگ را بر اساس منحنی لنگر-انحنا بازنویسی کرده و مقدار ضریب β را به صورت ثابت و برابر با ضریب کاهش مقاومت در مدل چرخه‌ای (هیستریزیس^۴) در نظر گرفته‌اند [18]. رابطه اصلاحی کوناث عبارت است از:

$$D_{Ku} = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \beta_{Ku} \frac{\int dE}{M_y \theta_u} \quad (۳)$$

در مدل پارک-انگ، ارتباط بین کاهش مقاومت و خسارت اعضا به وسیله‌ی پارامتر β_{PA} برقرار می‌شود. در مدل اصلاحی کوناث برای مدل‌سازی آثار کاهش مقاومت در شاخص خسارت و مدل چرخه‌ای، از یک ضریب استفاده شده است. در رابطه کوناث مقدار ضریب β به صورت ثابت و مستقل از ویژگی‌های مقطع و برابر با ضریب کاهش مقاومت در مدل چرخه‌ای در نظر گرفته می‌شود [18]. در این مقاله بر اساس مقادیر پیشنهاد شده برای مدل چرخه‌ای [19]، ضرایب β_{Ku} برای سطوح عملکرد IO، LS و CP به ترتیب برابر مقادیر ۰/۰۸، ۰/۱۵ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که برای زوال مقاومت بیشتر، مقدار این ضریب نیز افزایش می‌یابد و نشان می‌دهد که با ضعیف‌تر شدن عضو، میزان و سرعت کاهش مقاومت باید بیشتر در نظر گرفته شود؛ به عبارت دیگر برای این اعضا، سهم خسارت ناشی از رفتار چرخه‌ای بیشتر در نظر گرفته می‌شود.

۳- مدل سازی قاب ها

برای ارزیابی شاخص خسارت پارک-انگ در قابهای خمشی بتن مسلح، تعداد سه قاب مطابق با شکل (۱) در نظر گرفته شده است. در این قاب ها تعداد طبقات به ترتیب ۴، ۶ و ۹ طبقه و تعداد دهانه‌ها ۲ و ۳ دهانه انتخاب شده است. ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳ متر در نظر گرفته شده و طول دهانه‌ها در قاب ۴ و ۹ طبقه برابر ۴ متر و در قاب ۶ طبقه برابر ۵ متر است. در این قاب ها طول ستون‌ها و طول دهانه تیرها یکسان فرض شده تا هماهنگی بیشتری میان خسارت اعضا وجود داشته باشد. برای معرفی قاب ها از چهار حرف و دو عدد استفاده شده است، به این صورت که عدد بعد از حرف S بیانگر تعداد طبقات، عدد بعد از حرف B معرف تعداد دهانه‌های قاب و حروف IO، LS و CP به

$$\beta_{PA} = (-0/447 + 0/073 \frac{L}{d} + 0/24 n_0 + 0/314 \rho_t) * 0/7^{\rho_w} \quad (۲)$$

انگ^۱ در سال ۱۹۸۹ [16]، مقدار $D_{PA} = 0/4$ را مرز بین خسارت قابل مرمت و غیر قابل مرمت پیشنهاد نموده و طبقه‌بندی جزئی زیر برای شاخص خسارت پارک-انگ ارائه شده است:

$D_{PA} < 0/1$: بدون خسارت و یا ترک های کم و موضعی

$0/1 \leq D_{PA} < 0/25$: خسارت کم- ترک خوردگی های سطحی و

سراسری

$0/25 \leq D_{PA} < 0/4$: خسارت متوسط- ترک خوردگی های شدید و

تخریب موضعی بتن

$0/4 \leq D_{PA} < 1/0$: خسارت شدید- خرد شدن بتن و بیرون زدن

آرماتورها

در شاخص خسارت پارک-انگ ضریب β_{PA} تعیین کننده میزان خسارت‌های ناشی از رفتار چرخه‌ای و آثار کاهش مقاومت است. در مطالعات صورت گرفته به وسیله‌ی عباس نیا و برقی [17] مشاهده شده است که رابطه ارائه شده به وسیله‌ی پارک و انگ در نقطه متناظر با گسیختگی عضو پراکندگی زیادی داشته و مقدار شاخص برای تعداد زیادی از نمونه‌ها، مقدار غیر منطقی (بیشتر از یک) به دست آمده است. البته پارک و انگ در مطالعات خود اذعان دارند که رابطه پیشنهاد شده برای β_{PA} دارای پراکندگی زیادی است و این امر سبب پراکندگی زیاد در مقدار شاخص خسارت شده است [13-15].

۲-۲- شاخص اصلاح شده پارک-انگ

شاخص خسارت پارک-انگ در سال‌های گذشته به وسیله‌ی پژوهشگران بررسی بیشتری شده است [11-13-17]. برای استفاده مستقیم از شاخص خسارت پارک-انگ، لازم است تغییر شکل‌های کلی عضو تعیین شود. به علت تمرکز رفتار غیر ارتجاعی در مفاصل خمیری نزدیک به انتهای اعضا، ایجاد ارتباط میان دوران در ناحیه متمرکز، تغییر شکل‌های کلی و خسارت اعضا بسیار مشکل است. برای این منظور کوناث^۳ و همکاران [18] در سال ۱۹۹۲ رابطه‌ی اصلاحی

1. Ang A.H-S
2. Park YJ
3. Kunnath S.K.

طرح که بیانگر سطح خطر با احتمال رویداد ۱۰٪ در ۵۰ سال و با دوره بازگشت ۴۷۵ سال است، استفاده می‌شود. برای تعیین سطح خطر شتاب نگاشت‌ها، مقایسه‌ای میان میانگین طیف‌ها و طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ [23] برای زمین نوع II انجام شده است. در شکل (۳) مشاهده می‌شود که در زمان تناوب‌های میان ۰/۴ تا ۱/۵ ثانیه هماهنگی نسبتاً مناسبی میان طیف‌های استفاده شده و طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ وجود دارد.

جدول (۱) مشخصات شتابنگاشت‌ها

Date and Place	Recording Station	PGA	Earthquake Name
Abbar 31/03/1369	Abbar	0.647	Abbar
Chi-Chi 20/09/1999	TCU-047	0.292	Chi-Chi
Manjil 31/03/1369	Manjil	0.55	Manjil
Naghan 16/03/1356	Naghan	0.72	Naghan
Northridge EQ 17/01/1994	USC Station 90056	0.33	Northridge
Superstition Hills 24/11/1987	USGS Station 5051	0.38	Superstition Hills
Iran 25/06/1357	Dayhook	0.406	Tabas

Table (1) Characteristics of ground accelerations

شکل (۲) طیف شتاب نگاشت‌های استفاده شده

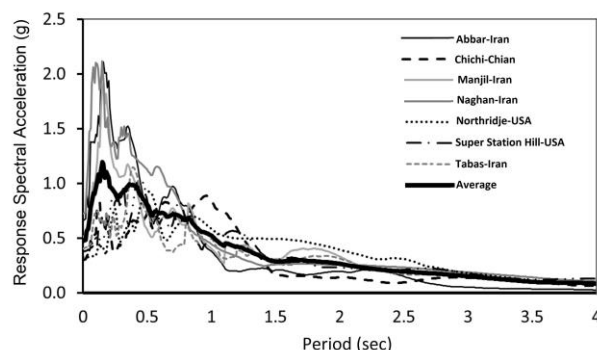


Fig. 2 Response spectrum accelerograms

شکل (۳) میانگین طیف پاسخ شتاب نگاشت‌ها

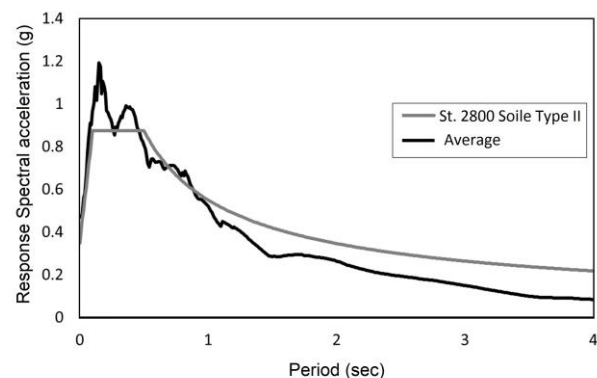


Fig. 3 Average response spectrum of accelerograms

ترتیب معرف سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش قاب است.

برای تعیین بارهای ثقلی وارد شده به قاب‌ها، از بحث ششم مقررات ملی ساختمان [20] استفاده شده است. با محاسبات انجام شده، بار مرده هر طبقه ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع تعیین شده است. به این ترتیب بار موثر تیرها در قاب‌ها برابر کل بار مرده و ۲۰٪ بار زنده در نظر گرفته شده است. در محاسبه بارهای ثقلی قاب‌ها، عرض بارگیر تیرها برابر با ۶ متر فرض شده است.

شکل (۱) هندسه و نام‌گذاری قابها

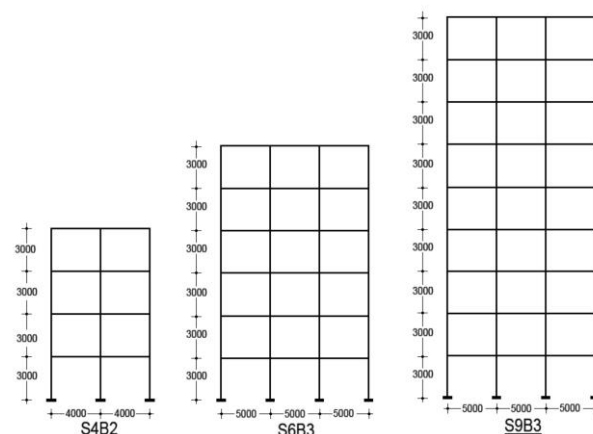


Fig. 1 Geometry and names of studied frames.

در این مقاله برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی از شتابنگاشت‌های زلزله‌های مختلف، بر اساس زمین نوع II استفاده شده است. برای انتخاب شتابنگاشت‌های ایران بر اساس زمین نوع II، از مطالعات تقدیر [21] استفاده شده است. شتاب نگاشت‌های کشورهای دیگر از سایت پی‌یر [22]، بر اساس خاک نوع C که معادل با زمین نوع II در استاندارد ۲۸۰۰ [23] است و همچنین اساس طبقه بندی ارائه شده در FEMA-440 [24] انتخاب شده است. مشخصات شتابنگاشت‌های انتخابی در جدول (۱) نشان داده شده است.

دقت شود که برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی اثر مولفه قائم زلزله در نظر گرفته نشده و زلزله‌ها فقط در جهت افقی و در راستای قاب اعمال شده است. در شکل (۲) طیف شتاب نگاشت‌های انتخابی با میرایی ۵٪ نشان داده شده است. در استاندارد ۲۸۰۰ از زلزله

بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش به ترتیب مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵ و برای ستون‌ها به ترتیب برابر مقادیر ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲ معرفی شده است. در پایان تغییر مکان قاب‌ها کنترل شده، تا از حدود مجاز تعیین شده به وسیله‌ی این آیین‌نامه فراتر نرفته باشد. از بررسی وضعیت تنش‌المان‌ها در پایان تحلیل مشاهده می‌شود که در قاب‌های IO تشکیل مفاصل تنها در تیرها ایجاد شده و ستون‌ها در برخی زلزله‌ها دچار ترک خوردگی شده‌اند. در قاب‌های LS علاوه بر تشکیل مفصل در تیرها، در برخی از زلزله‌ها ستون‌ها نیز وارد محدوده غیرخطی شده‌اند. در قاب‌های CP به طور معمول در کل تیرها مفصل تشکیل شده و در ستون‌های طبقه اول و گاهی دیگر طبقات مفصل تشکیل شده است. دقت شود که در هیچ یک از سطوح عملکرد گسیختگی برای اعضا روی نداده است. در شکل (۴) چگونگی توزیع مفاصل خمیری بعد از تجربه زلزله در قاب‌های مورد نظر نشان داده شده است.

شکل (۴) توزیع مفاصل خمیری در قاب‌ها

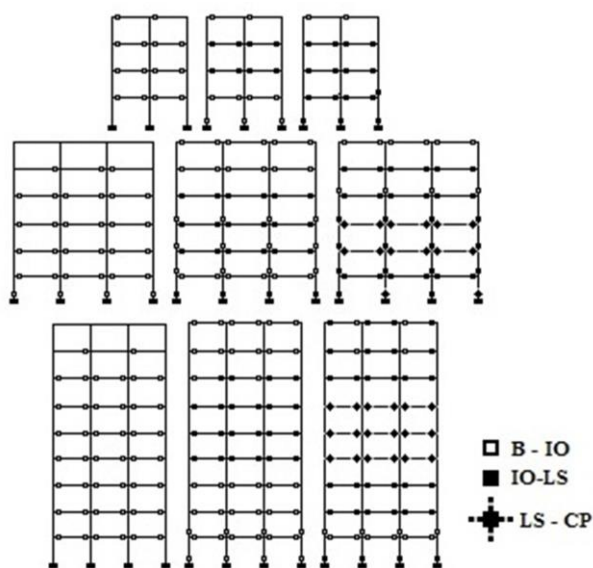


Fig. 4 Distribution of plastic hinges in frames.

در شکل (۴) مشاهده می‌شود که تیرهای طبقات میانی تعیین‌کننده سطح عملکرد قاب‌ها هستند. به طور کلی در قاب‌های با طراحی مناسب، رفتار غیرخطی ابتدا از تیرهای طبقات میانی شروع شده و سپس در اعضای دیگر توزیع می‌شود و در نهایت ستون‌ها وارد رفتار غیرخطی می‌شوند. در کلیه روش‌های طراحی سعی می‌شود که تا حد امکان ستون‌ها وارد رفتار غیرخطی نشوند.

برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی اعضای بتن مسلح از مدل سه پارامتری پارک استفاده شده است [18-19]. در این مدل چرخه‌ای، از سه پارامتر برای تعیین میزان زوال سختی، زوال مقاومت و میزان بروز پدیده لاغرشدگی در اعضای بتن مسلح استفاده می‌شود. در این مقاله برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی تیرها و ستون‌ها از مقادیر پیشنهاد شده در راهنمای نرم افزار IDARC-2D [۱۹] استفاده شده و مطابق جدول (۲) است.

جدول (۲) پارامترهای مدل چرخه‌ای

Slenderness Effect	Strength Decay (Energy)		Stiffness Degredation	Performance Level
	β_{k_u}	Ductility		
0.4	0.08	0.15	15	IO
0.25	0.15	0.3	10	LS
0.05	0.6	0.6	4	CP

Table (2) Characteristics of the hysteretic model.

در کلیه تحلیل‌ها اثر P-Delta در نظر گرفته شده و اتصالات اعضا به صورت گیردار مدل شده است. در نرم افزار IDARC-2D اعضا به صورت دو گرهی مدل‌سازی می‌شود و امکان تشکیل مفصل خمیری در انتهای کلیه اعضا وجود دارد.

۴- طراحی قاب‌ها در سطوح عملکرد

در این مقاله سه قاب با ویژگی‌هایی که بیان شد، برای بررسی خسارت اجزای سازه‌ای در سطوح عملکرد در نظر گرفته شده است. هر یک از این قاب‌ها ابتدا در نرم افزار SAP2000 برای سه سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش با تحلیل استاتیکی غیرخطی (بارافزون) و بر اساس آیین‌نامه ASCE-41 [14] طراحی اولیه صورت گرفته است. سپس با استفاده از نرم افزار IDARC-2D با تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت هفت شتاب نگاشت، مقاطع اعضا به گونه‌ای تعیین شده است که دوران ایجاد شده در مفاصل خمیری در محدوده مجاز قرار گیرد. با چند سعی و خطا، ابعاد و مقدار آرماتورهای اعضا به گونه‌ای تعیین شده است که میزان دوران‌های مفاصل خمیری در حدود مجاز آیین‌نامه ASCE-41 [14] قرار داشته باشند. در آیین‌نامه ASCE-41 [14] حدود مجاز دوران در مفاصل خمیری تیرهای بتن مسلح در سطوح عملکرد قابلیت استفاده

1. Pushover Analysis

در سطوح عملکرد IO و LS اعضا دارای ظرفیت تغییرشکل زیادی هستند، به این ترتیب سهم زیادی از خسارت‌های عضو در این سطوح عملکرد ناشی از بیشینه تغییرشکل‌ها است، یعنی قسمت اول شاخص خسارت دارای سهم زیادی از خسارت کلی است و مشاهده می‌شود که در این سطوح عملکرد، میان مقادیر شاخص خسارت تیرها و میزان دوران در مفاصل خمیری رابطه با پراکندگی کمی وجود دارد. اما تیرهای با سطح عملکرد CP یا به عبارت دیگر اعضای ضعیف‌تر، ظرفیت تغییرمکانی و شکل‌پذیری کمتری دارند و سهم بیشتری از خسارت عضو ناشی از رفتار چرخه‌ای آن خواهد بود. برای اعضا در این سطح عملکرد، چگونگی تعیین سهم خسارت ناشی از رفتار چرخه‌ای اهمیت زیادی پیدا می‌کند.

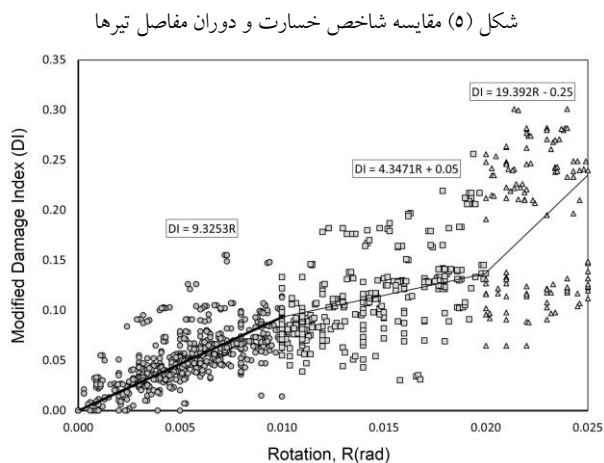


Fig. 5 Correlation between damage indices and plastic hinges of beams

در شاخص اصلاحی پارک-انگ، ضریب β برای هر سطح خرابی به صورت ثابت و مستقل از ویژگی‌های مقطع، نوع عضو و بارگذاری انتخاب می‌شود، این در حالی است که رفتار تیرها و ستون‌ها در طبقات مختلف متفاوت خواهد بود. با رجوع به شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش دوران مفاصل خمیری تیرها و افزایش خسارت‌های ناشی از رفتار چرخه‌ای، پراکندگی داده‌ها به مراتب بیشتر شده است. در جدول (۴) مقادیر متوسط شاخص اصلاح شده پارک-انگ برای تیرها در سطوح عملکرد نشان داده شده است.

جدول (۴) متوسط شاخص خسارت تیرها در سطوح عملکرد

Beams Performance Levels			Average of Damage Index
CP	LS	IO	
0.187	0.1	0.052	

Table (4) Average of damage indices of beams in performance levels

در محاسبه شاخص خسارت اعضا، امکان بروز دو مود شکست خمشی و برشی در نظر گرفته شده است ولی در تمامی اعضا تنها شکست خمشی روی داده است.

تغییرمکان‌های بیشینه بام در سه قاب با افزایش سطح عملکرد افزایش یافته است. این امر نشان می‌دهد که با افزایش سطح عملکرد و به عبارتی ضعیف‌تر شدن قاب، سختی کاهش یافته و به طور متناسب تغییرمکان بیشینه قاب افزایش می‌یابد. در جدول (۳) مشخصات دینامیکی قاب‌های مختلف در سطوح عملکرد نشان داده شده است.

جدول (۳) مشخصات دینامیکی قاب‌ها

First Mode Period (sec)	Main Frequency (Hz)	Performance level	Frame
0.42	2.39	IO	S4B2
0.97	1.03	LS	
2.65	0.38	CP	
0.69	1.44	IO	S6B3
1.15	0.87	LS	
2.88	0.35	CP	
0.99	1.0	IO	S9B3
1.73	0.85	LS	
2.60	0.49	CP	

Table (3) Dynamic characteristics of the studied frames

۵- بررسی نتایج

در آیین‌نامه ASCE-41 [14] از معیار دوران در مفاصل خمیری برای تعیین سطح عملکرد اعضای بتن مسلح استفاده می‌شود. بنابراین برای بررسی ارتباط میان شاخص خسارت و سطوح عملکرد تیرها و ستون‌ها، لازم است شاخص خسارت اعضا در مقابل بیشینه دوران ایجاد شده در مفصل‌های خمیری در طی زلزله ترسیم شده و رابطه میان آنها بررسی شود. در ادامه شاخص خسارت اصلاح شده پارک-انگ برای تیرهای سه قاب S4B2، S6B3 و S9B3 در سه سطح عملکرد نمایش داده شده است.

با رجوع به شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش میزان دوران در مفاصل خمیری مقدار شاخص خسارت تیرها نیز افزایش یافته است. میان شاخص خسارت تیرها و دوران در مفاصل خمیری، در سه سطح عملکرد به صورت جداگانه رابطه خطی برقرار شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دوران مفاصل خمیری اعضا، پراکندگی مقادیر شاخص خسارت نیز افزایش یافته است.

در آیین‌نامه‌ی ASCE-41 [۱۴] بر اساس نسبت نیروی محوری، شرایط محصورشدگی و نسبت نیروی برشی مقطع، حدود مجاز دوران در سطوح عملکرد تعیین می‌شود. در شکل (۷) شاخص خسارت ستون‌ها در مقابل دوران در مفصل خمیری نشان داده شده است. در شکل (۷) شاخص خسارت ستون‌های سه قاب مورد نظر در سه سطح عملکرد نشان داده شده و رابطه میان شاخص خسارت و دوران مفصل خمیری تعیین شده است. مشاهده می‌شود که در ستون‌ها مانند تیرها رابطه‌ی مناسبی میان شاخص خسارت و دوران در مفصل وجود ندارد و پراکندگی‌های داده‌ها به مراتب بیشتر است.

شاخص خسارت تعداد زیادی از ستون نزدیک به صفر بوده و اگر دقت شود بسیاری از ستون‌ها در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، دارای شاخص خسارت صفر هستند. این امر نشان می‌دهد که شاخص خسارت پارک-انگ نسبت به خسارت ستون‌ها حساسیت کمی داشته و این شاخص نمی‌تواند به شکل مناسبی سطح عملکرد ستون‌ها را نشان دهد.

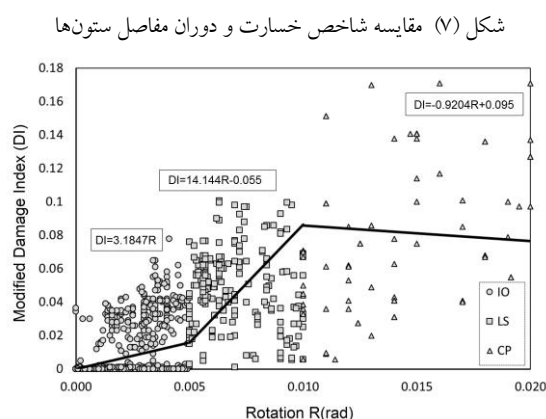


Fig. 7 Correlation between damage indices and plastic hinges of columns.

شکل (۸) رابطه میان شاخص خسارت ستون‌ها و دوران در مفصل خمیری

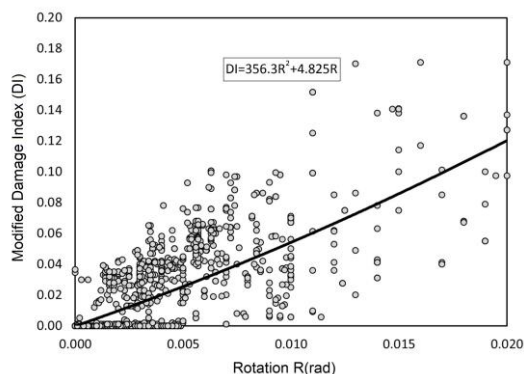


Fig. 8 Correlation between damage indices and plastic hinges of columns.

با رجوع به شکل (۵) مشاهده می‌شود که بیشینه شاخص خسارت تیرها مقدار ۰/۳ به دست آمده است. از شاخص خسارت پارک-انگ هم در تحلیل‌های دینامیکی و هم در تحلیلی‌های استاتیکی غیرخطی استفاده می‌شود. باید دقت شود که مقادیر ارائه شده در جدول (۴) مربوط به مقاصد طراحی تیرهای بتن مسلح در سطوح عملکرد و بر اساس تحلیل دینامیکی غیرخطی است.

در شکل (۶) رابطه میان شاخص خسارت اصلاح شده پارک-انگ و دوران در مفصل خمیری با درونیابی درجه دو نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که ثابت فرض شدن مقدار ضریب β باعث ایجاد رابطه نزدیک به خط بین شاخص خسارت تیرها و دوران در مفصل خمیری شده است. این شاخص خسارت در سطح عملکرد آستانه فروریزش در مقایسه با دیگر سطوح دارای پراکندگی بیشتر است. در نظر گرفتن یک مقدار ثابت و مستقل از ویژگی‌های مقطع برای تمامی اعضا و در همه طبقات دور از واقعیت است. آشکار است که چگونگی رفتار تیر و ستون متفاوت است و همچنین در طبقات مختلف رفتار متفاوتی برای آنها خواهیم داشت، بنابراین باید ضریب β متناسب با نوع عضو و ویژگی‌های آن تعیین شود.

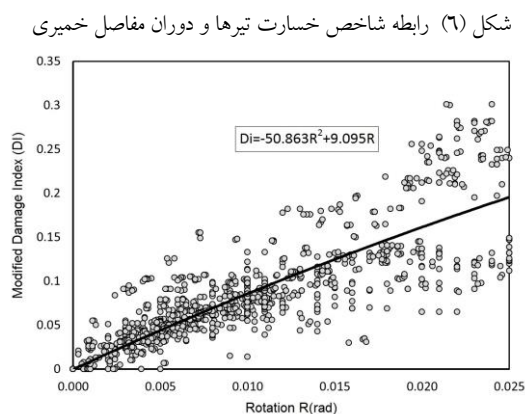


Fig. 6 Correlation between damage indices and plastic hinges of beams

در قاب‌های خمشی بتن مسلح، خسارت ستون‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. ایجاد خسارت در این اعضا محدودیت بیشتری دارد و تا حد امکان سعی می‌شود که وارد محدوده غیرخطی نشوند. ستون‌ها جزء اجزا کنترل‌شونده با نیرو هستند، به عبارت دیگر ظرفیت تغییرشکل زیادی برای آنها در نظر گرفته نمی‌شود و در مقابل در این اعضا مقاومت بیشتری فراهم می‌شود تا وارد محدوده غیرخطی نشوند.

است. با توجه به حاشیه اطمینانی که آیین‌نامه‌های طراحی در نظر می‌گیرند، مقدار شاخص خسارت کمتر از ۰/۳ برای طراحی تیرها و مقدار ۰/۲ برای ستون‌های بتن مسلح در سطوح عملکرد مناسب است. بر اساس نتایج حاصل، حدود طراحی شاخص خسارت اصلاح شده پارک- انگ، برای تیرها و ستون‌های بتن مسلح مطابق جدول (۶ و ۷) خواهد بود.

جدول (۶) حدود شاخص خسارت تیرها

Beams Performance Levels	Damage Index Limits
IO	$0 \leq D_{PA} \leq 0.052$
LS	$0.052 \leq D_{PA} \leq 0.1$
CP	$0.1 \leq D_{PA} \leq 0.187$

Table (6) Limits of damage index of beams

جدول (۷) حدود شاخص خسارت ستون‌ها

Columns Performance Levels	Damage Index Limits
IO	$0 \leq D_{PA} \leq 0.02$
LS	$0.02 \leq D_{PA} \leq 0.045$
CP	$0.045 \leq D_{PA} \leq 0.08$

Table (7) Limits of damage index of columns

۷- علائم به کار رفته

δ_m : بیشینه تغییر شکل در هنگام زلزله

δ_u : تغییر شکل نهایی تحت بارگذاری یکنواخت

Q_y : مقاومت تسلیم

dE : انرژی تجمعی هیستریزس جذب شده

β_{PA} : پارامتر مثبت

$\frac{L}{d}$: نسبت دهانه برشی

n_0 : تنش محوری نرمال شده

ρ_t : درصد نسبت میلگرد های طولی

ρ_w : نسبت میلگرد های محصورکننده

θ_m : دوران بیشینه در طول تارخچه بارگذاری

θ_u : ظرفیت نهایی دوران در مقطع

θ_r : دوران برگشت پذیر در باربرداری

M_y : لنگر حد تسلیم

β_{Ku} : پارامتر زوال مقاومت در مدل چرخه ای

در شکل (۸) رابطه میان شاخص خسارت ستون‌ها و دوران مفصل خمیری با درون‌یابی درجه دو نشان داده شده است.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌ها، در قاب‌های IO در هیچ یک از ستون‌ها مفصل ایجاد نشده و تنها در برخی از زلزله‌ها، ستون‌های طبقه اول دچار ترک خوردگی شده است. در قاب‌های LS برخی از ستون‌ها و در قاب CP بیشتر ستون‌های طبقه اول وارد محدوده غیرخطی شده‌اند و مفصل خمیری شکل گرفته است. در جدول (۵) مقادیر شاخص خسارت ستون‌ها برای سه سطح عملکرد نشان داده شده است.

جدول (۵) متوسط شاخص خسارت ستون‌ها در سطوح عملکرد

Columns Performance Levels			Average of Damage Index
CP	LS	IO	
0.08	0.045	0.02	

Table (5) Average of damage indexes of columns in performance levels

۶- نتیجه گیری

در این مقاله شاخص خسارت پارک- انگ در سطوح عملکرد اعضای بتن مسلح و با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی ارزیابی شده است. هدف اصلی این مقاله، تعیین یک ارتباط مشخص میان شاخص خسارت و سطوح عملکرد لرزه‌ای اعضای بتن مسلح برای مقاصد طراحی است. برای این منظور تعداد سه قاب خمشی بتن مسلح در سه سطح عملکرد طراحی شده و تحت هفت شتاب نگاشت تحلیل دینامیکی غیرخطی روی آنها انجام شده است. در پایان با استفاده از نتایج حاصل، تحلیل خسارت روی قاب‌ها صورت گرفته است. با بررسی نتایج مشاهده شد که با افزایش مقدار دوران در مفصل خمیری، مقدار شاخص خسارت اعضا نیز افزایش می‌یابد. در اعضا با سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، پراکندگی شاخص‌ها کم بوده اما با افزایش مقدار دوران در اعضا یا به عبارت دیگر در سطح عملکرد CP، پراکندگی داده‌ها بیشتر می‌شود، این امر نشان از ضعف این شاخص در برآورد خسارت‌های زیاد اعضا است. این شاخص ارتباط ضعیفی با خسارت‌های ناشی از رفتار چرخه‌ای در نمونه ستون‌ها داشته و برای ستون‌ها به مقادیر بسیار کمی منجر می‌شود. رابطه‌ی میان شاخص خسارت تیرها و ستون‌ها در سه سطح عملکرد به دست آمده و در شکل‌های (۵ و ۷) به تفکیک در سطوح عملکرد نمایش داده شده

۸- مراجع

References

- Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol. 14, 2011, pp. 939-945.
- [13] Jiang, H. J.; Bo Fu, Xilin Lu.; Chen, L.; "Seismic damage assessment of RC members by a modified Park-Ang model"; Advances in Structural Engineering, Vol. 18, No. 3, 2015, pp. 353-364.
- [14] ASCE/SEI 41-06, "Seismic rehabilitation of existing buildings", American Society of Civil Engineering, Virginia, 2006.
- [15] Park, YJ; Ang, AH-S; "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete"; Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, 1985, pp. 722-739.
- [16] Ang, A. H.; "Seismic damage assessment and basis for damage limiting Design"; Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 3, No. 1, 1988, pp. 146-150.
- [17] Abbasnya, R.; Barghi, M.; 2004, "Criticism on the Park-Ang damage index for RC structures", 1st National Congress on Civil Engineering, 83-1140, 2004, pp. 1-8, (In Persian).
- [18] Kunnath, S.K.; Reinhorn, A.M.; R.F. Lobo, A; "IDARC version 3.0: a program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures"; National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-92-0022, State University of New York at Buffalo, 1992.
- [19] IDARC 2D Version 7.0, User's guide of a program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures, 2010.
- [20] Bureau of Codification and Dissemination of National Building Regulations, Ministry of Road and Urban Development, Part-6 (INBC-P6), "Design Load for Buildings", CH-6, 2013, (In Persian).
- [21] Taghdir, A., "Soil type Classification of ground motion recording station of earthquake based on spectrum shape", MSc Dissertation, Iran University of Science and Technology. (In Persian).
- [22] PEER structural performance database, Available from: <http://nisee.berkeley.edu/spd/>, 2014.
- [23] Road, Housing and Urban Development Research center (BHRC), "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard 2800)", 2014, 4th Edition, PN S-253. (In Persian).
- [24] Federal Emergency Management Agency, FEMA-440, "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures", Federal Emergency Management Agency, Washington, DC 2005.
- [1] Cruz, Miguel .f; Lopez, Oscar A.; "Design of reinforced concrete frames with damage control"; Engineering Structures, Elsevier, No. 26, 2004, pp. 2037-2045.
- [2] Habibi, A.R.; Izadpanah, M.; "New method for the design of reinforced concrete moment resisting frames with damage control"; Sharif University of Technology, ScientiaIranica, Vol. 19, No. 2, 2012, pp. 234-241.
- [3] Alhaddad, M. S.; Wazira, K. M.; Al-Salloum, Y. A.; Abbas, Husain; "Ductility damage indices based on seismic performance of RC frames"; Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol. 77, 2015, pp. 226-237.
- [4] FEMA-P695, "Quantification of building seismic performance factors", Washington, DC: Federal Emergency Management Agency; 2009.
- [5] Priestley MJN, Calvi GM, Kowalsky MJ., "Displacement based seismic design of structures", Pavia: IUSS PRESS; 2007.
- [6] Sharifi, A.; Banan, M. R.; Banan, M. R.; "A strain-consistent approach for determination of bounds of ductility damage index for different performance levels for seismic design of RC frame members"; Engineering Structures, Elsevier, Vol. 37, 2012, pp. 143-151.
- [7] AASHTO, "AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design", Washington, DC, Association of State Highway and Transportation Officials; 2010.
- [8] Banan MR. Beyond R-factor; "Design theory for damage-based seismic design of RC buildings", Proceedings of a Turkey-Iran-US seismic workshop; 2010.
- [9] Heo, Y; Kunnath, S. K.; "Damage-Based Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Frames"; International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.7, No.3, 2013, pp.175-182.
- [10] Gunturi, S.; Shah, H.; "Building specific damage estimation"; Proceedings of 10th world conference on earthquake engineering, Madrid, Rotterdam, Balkema, 1992, pp. 6001-6.
- [11] Arjomandi, k.; Estekanchi, H.; Vafai, A.; "Correlation between structural performance levels and damage indexes in steel frames subjected to earthquakes"; Sharif University of Technology, Scientia Iranica, Vol. 16, No. 2, 2009, pp. 147-155.
- [12] Jiang, H. J.; Chen, L. Z.; Chen, Q.; "Seismic damage assessment and performance levels of reinforced concrete members"; The Twelfth East Asia-

Assessment of the Park-Ang Damage Index for Seismic Performance Levels of RC Moment Frames

M. Pazuki¹, A.A. Tasnimi^{2*}

1- M.Sc. of Structural Eng., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

*tasnimi@modares.ac.ir

Abstract:

The main goal of seismic design is to provide required safety level during earthquake, and to make a structure remain repairable. According to the available reports of recent earthquakes, structures designed using force based design procedures are not precise enough in eliminating the damage of structures. Therefore, a new generation of design codes based on the performance level design procedure is introduced. In order to estimate the amount of damage in structural elements, related criteria are defined as damage indices. Damage indices are functions of damage variables and indicate the effect of the variables on the element's damage. Park-Ang damage index is among the most important damage indices, which shows the damage of reinforced concrete elements as a linear combination of maximum deformations and absorbed cyclic energy. The analytical value for this damage index is set to be zero if there is no damage, and 1.0 for the collapse of the element. The Park-Ang damage index in non-negative and shows the reduction of element's resistance in cyclic loading. It also specifies energy dissipation and the strength damage of the elements. This factor has been used for calibrating damage index. It has been found that the damage index is merged with one in the failure point. Applying this model in structural systems requires determination of an overall member's deformation. Since inelastic behavior is limited to plastic zones adjacent to the ends of a member, it is difficult to define the relationship between overall member deformation, local plastic rotations and the damage index. Therefore, a modified version of this model has been developed by Kunnath et al.

The most important difference between Kunnath model and Park-Ang model is representing the equation based on the moment-curvature diagram and replacing the non-dimensional factor with the strength deterioration factor in a hysteretic model. Supposing this factor as a constant will increase the diversion of the damage index in collapse prevention performance level. In this paper, the Park-Ang damage index and its improved relations has been evaluated for the various performance levels, including immediate occupancy, life safety and the collapse prevention levels. For this purpose, three reinforced concrete frames with different numbers of stories, was each designed for three performanc levels. Nonlinear dynamic analysis has been carried out with seven earthquake acceleration records. Finally, the damage analysis has been performed. The damage index has been derived for all of the nine frames and the values of damage indices have been evaluated. The beam damage indices are related directly to the rotation which happens in the plastic hinges. In components with immediate occupancy level, this linear characteistic is more clear; however, by increase in the rotation of the componenets or in the collapse prevention level, damage indices will diverge more. It has been shown that this damage index needs to be investigated at the collapse prevention level and the second part of the damage index (strength damage) shall be determined by the element's type and level of performance. The sensitivity of damage index to the column damages is little and the damage caused by the weak story is low and needs to be evaluated.

Keywords: Damage index, Performance levels, RC Moment Resisting Frames, Seismic Performance.