

بررسی مدل شاخص خسارت Park-Ang در مورد رفتار خمشی ستون‌های بتن آرمه

روح اله رجبی^{۱*}، مصطفی برقی^۲

۱- کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

rajabi_r2002@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

چکیده- ارزیابی خسارت اعضای باربر قبل از مقاوم‌سازی آن‌ها ضروری است. در صورتی که وضعیت خسارت دیدگی عضو به‌طور کمی با یک عدد بیان شود، این عدد، شاخص خسارت نامیده می‌شود. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های خسارت اعضا بتن‌آرمه، مدل پارک-آنگ است. این مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی روی تیرها و ستون‌های بتن‌آرمه با شکل‌های مختلف انهدام تدوین شده است. نتایج این مدل براساس اظهار تدوین‌کنندگان آن دارای عدم قطعیت قابل ملاحظه است. در این پژوهش با استفاده از تعداد قابل ملاحظه‌ای نتیجه‌ی آزمایشگاهی و با تمرکز بر ستون‌های بتن‌آرمه با نوع انهدام مشخص، دقت مدل پارک-آنگ در مورد رفتار خمشی ستون‌های بتن‌آرمه افزایش داده شده است. نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده از بانک اطلاعاتی موسسه پژوهش‌های PEER گرفته شده است.

کلیدواژگان: شاخص خسارت، ستون‌های بتن‌آرمه، مدل پارک-آنگ، مقاوم‌سازی.

۱- مقدمه

به‌صورت توأم اتفاق می‌افتد. وقتی خسارت در مورد یک عضو یا یک اتصال مطرح باشد خسارت موضعی نامیده می‌شود. در ارزیابی خسارت کلی ساختمان باید خسارت‌های موضعی عضوها ارزیابی شود. در صورتی که خسارت در یک سازه با دقت نسبی قابل‌قبولی ارزیابی شود، تصمیمات بعدی در خصوص مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای، معقول‌تر خواهد بود و در صرف هزینه‌های مربوط صرفه‌جویی خواهد شد. در ارزیابی خسارت باید تراز و سطح خسارت عضو و یا سازه مشخص شود. خسارت هم به صورت کیفی و هم به صورت کمی قابل تعریف و

خسارت در یک قطعه بتن‌آرمه فرایندی است که در اثر بارگذاری روی آن ایجاد می‌شود. در صورتی که بارگذاری افزایش یابد، این فرایند نیز توسعه می‌یابد و ممکن است با انهدام قطعه همراه شود. از مشخصات بارز پیش رفت فرایند خسارت، افزایش تغییر شکل‌های ایجاد شده در عضوی از سازه است.

خسارت کامل یا انهدام در یک عضو معمولاً بر اثر خرد شدن بتن، گسیخته شدن میلگردها و یا از بین رفتن پیوستگی میلگردها و بتن ایجاد می‌شود و گاهی این موارد

طبقه‌بندی است.

نتایج این مدل براساس اظهار تدوین‌کنندگان آن عدم قطعیت قابل ملاحظه دارد. در این پژوهش با استفاده از تعداد قابل ملاحظه‌ای نتیجه‌ی آزمایشگاهی و با تمرکز روی ستون‌های بتن‌آرمه با نوع انهدام مشخص، دقت مدل پارک-آنگ در مورد ستون‌های بتن‌آرمه افزایش داده شده است. نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده از بانک اطلاعاتی موسسه پژوهشاتی PEER گرفته شده است.

میزان خسارت وارد بر سازه با استفاده از شاخص‌های خسارت که تابعی از شکل‌پذیری سازه، انرژی مستهلک شده در سازه، دامنه و تعداد دوره‌ای بارگذاری است، بیان می‌شود. در مرور بر ادبیات فنی، مدل‌های شاخص خسارت متفاوتی به‌وسیله‌ی محققین مختلف پیشنهاد شده است که از شناخته شده‌ترین و معروف‌ترین آن‌ها مدل پارک-آنگ است. در روش طراحی جدید، تحت عنوان طراحی براساس عملکرد، براساس سطوح عملکرد لرزه‌ای از پیش تعیین شده، تغییر شکل قابل قبول اعضا مشخص می‌شود. در توسعه این روش طراحی، نظر محققین به روش ارزیابی و کنترل خسارت اعضاء سازه به‌جای کنترل تغییرشکل‌ها معطوف شده است [۱]. در فرایند خسارت یک عضو باربر، دو پدیده اصلی خود را به‌طور آشکار نشان می‌دهد؛ تغییرشکل ایجاد شده در عضو و تعداد دفعاتی که عضو زیر اثر چنین تغییرشکلی قرار گرفته است. نیومارک در ۱۹۷۴ نسبت شکل‌پذیری (نسبت تغییرشکل بیشینه‌ی مقطع بحرانی یک عضو به تغییرشکل تسلیم همان مقطع) را به عنوان نشانه خسارت مطرح کرد. نسبت شکل‌پذیری را می‌توان با توجه به دوران، انحنا یا تغییرمکان عضو تعریف کرد [۲]؛ ولی با توجه به در نظر نگرفتن اثر تکرار بار در توسعه میزان خسارت، این مدل با دقت قابل قبول نمی‌تواند میزان خسارت عضو را تعیین کند.

۲- مدل شاخص خسارت پارک-آنگ

مدل خسارت پارک-آنگ، که در سال ۱۹۸۵ معرفی شد، از متداول‌ترین شاخص‌های خسارتی است که برای تحلیل خسارت اعضا و در مقیاس بزرگ‌تر، سازه‌ها به‌کار گرفته می‌شود [۴ و ۵]. با استفاده از این مدل سه نوع شاخص خسارت قابل محاسبه است؛ شاخص خسارت عضو: ستون، تیر، دیوار برشی، شاخص خسارت طبقه و شاخص خسارت تمامی ساختمان.

اگرچه این شاخص اولین بار برای تعیین خسارت اعضای بتن‌آرمه به‌کار گرفته شد، اما به دلیل مفهوم فیزیکی آشکار و استفاده آسان از آن، این شاخص برای ارزیابی خسارت سازه‌های فولادی نیز استفاده شد. نشانه خسارت پارک-آنگ به شکل ترکیبی از بیشینه تغییرشکل غیرتجمعی و انرژی هیسترتیک براساس رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

که در آن δ_m ، δ_u ، Q_y و $\int dE$ به ترتیب نشان دهنده بیشینه‌ی تغییرشکل ایجاد شده در عضو بر اثر زلزله، ظرفیت تغییر شکل نهایی که عضو می‌تواند تحمل کند (در اثر بارگذاری افزایش‌یافته)، مقاومت تسلیم عضو و میزان انرژی تلف‌شده در بارگذاری دوره‌ای است. β نیز پارامتر ثابت این مدل است که

پارک و آنگ با استفاده از تعداد قابل ملاحظه‌ای نتیجه‌ی آزمایش که به‌وسیله‌ی محققین مختلف روی تیرها و ستون‌های بتن‌آرمه با مقطع مربع یا مستطیل انجام شده است رابطه پیشنهادی خود را اثبات اعتبار کردند [۳]. بارگذاری در این آزمایشات از نوع افزایش‌یافته یکنواخت یا دوره‌ای بوده است که در آمریکا و ژاپن انجام شده و نمونه‌ها زیر اثر بارگذاری خمشی تک‌محوری قرار داشتند.

آزمایش‌های بارگذاری روی تیرها و ستون‌های طره‌ای انجام شده است. این نمونه‌ها زیر اثر بار افزایشی یکنواخت و یا دوره‌ای قرار داشته‌اند.

۲- با استفاده از این مدل، امکان تعیین نشانه خسارت در هر یک از بارگذاری‌های افزایشی یکنواخت و یا دوره‌ای وجود دارد.

۳- روابط پیشنهادی پارک و آنگ برای محاسبه پارامترهای δ_0 و β براساس نتایج پژوهش ایشان، عدم قطعیت بالایی دارد.

۴- در این مدل، شکل‌های مختلف خرابی از هم تفکیک نمی‌شوند؛ در حالی که در تحلیل خسارت سازه، مشخص بودن نوع و شکل خرابی اهمیت دارد.

۵- در این مدل، نسبت تغییرشکل‌ها و نسبت انرژی‌ها به‌صورت خطی با هم ترکیب شده‌اند در حالی که در عمل هنگام خسارت دیدن عضو، دو پدیده تغییرشکل و اتلاف انرژی به‌هم وابسته‌اند.

۴- رابطه پیشنهادی پارک-آنگ برای محاسبه پارامتر β

برای استفاده از این مدل، لازم است پارامتر β که مربوط به زوال مقاومت است تعیین شود. پارک و آنگ برای محاسبه این پارامتر معادله‌ای را پیشنهاد کردند که در آن متغیرهایی شامل نسبت دهانه برشی، بارمخوری، نسبت میلگردهای طولی و نسبت فولادهای محصورکننده تأثیرگذار است [۸ و ۲]. ضریب β میزان اثر اتلاف انرژی (بر اثر تکرار بار) را روی خسارت سازه‌ای نشان می‌دهد.

پارک و آنگ انرژی جذب شده برای تعدادی آزمایش بارگذاری روی تیر و ستون‌های مورد مطالعه را محاسبه کردند و رابطه ۳ را برای تعیین ضریب β ارائه دادند:

نشان‌دهنده میزان تأثیر انرژی مستهلک شده بر میزان خسارت است.

پارامترهای $\int dE$ و δ_m وابسته به تاریخچه بارگذاری است؛ در حالی که پارامترهای β ، δ_0 و ρ مستقل از تاریخچه بارگذاری است. لازم به ذکر است که عدد صفر معرف عضو یا سازه سالم و شاخص یک، نشان‌دهنده انهدام کامل یک المان یا سازه است. در جدول ۱ طبقه‌بندی حالات خسارت و رابطه آن با این نشانه، مطابق با نظر پارک دیده می‌شود.

در سال ۱۹۹۲ کونات^۲ و همکارانش، مدل خسارت پارک-آنگ را مطابق رابطه ۲ اصلاح کردند [۶]:

$$DI = \frac{\theta_m - \theta_y}{\theta_u - \theta_y} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} \int dE \quad (2)$$

در این مدل دوران مقطع به جای تغییر مکان و لنگر تسلیم به جای مقاومت تسلیم در نظر گرفته شده است. در این رابطه θ_y ، θ_m و θ_u به ترتیب نشان‌دهنده دوران تسلیم؛ بیشینه‌ی دوران و بیشینه‌ی ظرفیت دوران مقطع عضو، زیر اثر بارگذاری افزایشی یکنواخت است. فرض رفتار خمشی عضو بتن‌آرمه در مدل اصلاح شده، کاملاً مشهود است. این مدل در حال حاضر، در نرم‌افزار IDARC-2D^۳ برای تحلیل خسارت سازه‌های بتن‌آرمه به‌کار می‌رود [۷]. برنامه کامپیوتری IDARC-2D در سال ۱۹۸۷ به عنوان برنامه‌ای برای تحلیل دوبعدی ساختمان‌های بتنی مسلح چند طبقه با هدف مطالعه و بررسی پاسخ غیرخطی سازه‌ها معرفی شد. در این برنامه برای به‌دست آوردن خسارت وارد به سازه، از شاخص خسارت پارک-آنگ استفاده شده است [۶ و ۷].

۳- نقاط قوت و محدودیت‌های مدل نشانه خسارت پارک-آنگ

۱- اثبات اعتبار این مدل با تعداد قابل ملاحظه‌ای از نتایج

جدول (۱) طبقه‌بندی حالات خسارت و ارتباط آن با نشانه خسارت

حالات خسارت	بدون خسارت	خسارت کم	قابل تعمیر	غیر قابل تعمیر	انهدام کامل
شاخص خسارت	$DI < 0.1$	$0.1 \leq DI < 0.25$	$0.25 \leq DI < 0.4$	$0.4 \leq DI < 1.0$	$DI \geq 1.0$

۵- روش تحقیق

برخی از دلایل عدم قطعیت قابل ملاحظه در مدل پارک-آنگ به این شرح است: تیرها و ستون‌ها با هم مطالعه شده‌اند؛ نمونه‌های مورد مطالعه دارای همه نوع شکل خرابی (شکست برشی، خمشی، خمشی-برشی) بوده‌اند؛ بارگذاری بر تعدادی از نمونه‌ها از نوع افزایش یافته یکنواخت و بر تعدادی دیگر، از نوع دوره‌ای بوده است. در این پژوهش برای افزایش دقت در تعیین ضریب β ، تنها ستون‌های با شکست خمشی که تحت بارگذاری دوره‌ای بوده‌اند مطالعه شدند.

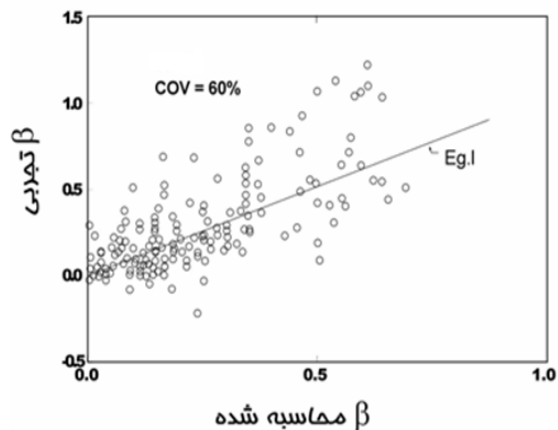
تحلیل خسارت ستون‌های مورد مطالعه، به‌وسیله‌ی برنامه IDARC-2D انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده روی ۹۵ ستون بتن‌آرمه از بانک اطلاعاتی مؤسسه تحقیقاتی PEER گرفته شده است [۱۱] و نتایج تحلیل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۶- مشخصات ستون‌های مورد مطالعه

مقاطع تمامی نمونه‌ها، به شکل مربع و مستطیل بوده است. تمامی ستون‌ها با انهدام خمشی از بین رفته‌اند. ستون‌ها از نوع طره‌ای مطابق شکل ۲ و بارگذاری آن‌ها به‌صورت دوره‌ای همراه با بار محوری بوده است. جدول ۲ خلاصه‌ای از اطلاعات، شامل مشخصات مصالح و هندسه تعدادی از ستون‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۹ و ۱۰].

$$\beta = \left(-0.447 + 0.073 \frac{1}{d} + 0.24n + 0.314\rho \right) \times 0.7^{P_w} \quad (3)$$

که $\frac{1}{d}$ نسبت دهانه برشی؛ n بار محوری نرمال‌شده؛ ρ درصد میلگردهای طولی و ρ_w نسبت محصورشدگی است. میزان این پارامتر به مقدار نیروهای برشی و محوری و میزان میلگردهای طولی و محصورکننده (خاموت‌ها) بستگی دارد. معمولاً معادله پیشنهادی برای تعیین ضریب β مقادیر خیلی کوچکی را نتیجه می‌دهد؛ به‌گونه‌ای عبارت مربوط به انرژی، اغلب تأثیر کمی در اندازه نشانه خسارت پیدا می‌کند. پارک و آنگ مقدار β را برای نمونه‌های موردنظر محاسبه کردند و با نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها مقایسه کردند. در نتایج، پراکنندگی قابل ملاحظه‌ای مطابق شکل ۱ مشاهده شد.



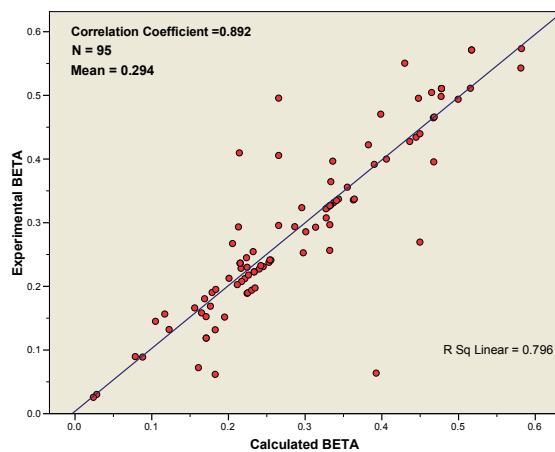
شکل (۱) ارزیابی دقت رابطه پیشنهادی پارک و آنگ برای محاسبه β

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در مورد ستون‌های بتن‌آرمه رابطه‌ای دقیق‌تر برای تعیین β ارائه شود.

جدول (۲) مشخصات تعدادی از ستون‌های مورد مطالعه

شماره	مقاومت مشخصه بتن (Mpa)	نیروی محوری P(KN)	ابعاد ستون‌ها			آرمتورهای طولی		آرمتورهای عرضی	
			B(mm)	H(mm)	L(mm)	D(mm)	تعداد	D(mm)	فاصله (mm)
۱	۳۲	۹۶۸	۵۵۰	۵۵۰	۱۶۵۰	۲۰	۱۲	۱۲	۱۱۰
۲	۳۲/۱	۲۹۱۳	۵۵۰	۵۵۰	۱۶۵۰	۲۰	۱۲	۱۲	۹۰
۳	۳۲/۱	۲۹۱۳	۵۵۰	۵۵۰	۱۶۵۰	۲۰	۱۲	۱۲	۹۰
۴	۲۶/۹	۶۴۶	۴۰۰	۶۰۰	۱۷۸۴	۲۴	۱۰	۱۲	۸۰
۵	۲۴/۸	۱۲۷	۴۰۰	۴۰۰	۱۶۰۰	۱۹	۸	۹	۱۰۰
۶	۴۰/۶	۱۰۷۶	۲۷۹/۴	۲۷۹/۴	۲۱۳۴	۱۵/۸۷۵	۴	۶/۳۵	۲۲۸/۶
۷	۷۲/۱	۳۳۵۴	۳۰۵	۳۰۵	۱۸۴۲	۱۹/۵۴	۸	۱۵/۹۸	۹۵
۸	۷۱/۷	۲۴۰۱	۳۰۵	۳۰۵	۱۸۴۲	۱۹/۵۴	۸	۱۱/۲۸	۹۰
۹	۳۴	۱۷۸۲	۳۵۰	۳۵۰	۱۶۴۵	۱۹/۵	۸	۹/۵۳	۱۵۲
۱۰	۶۹/۶	۱۴۲	۲۰۳	۲۰۳	۶۱۰	۱۵/۹	۴	۹/۵	۷۶/۲
۱۱	۲۴/۹	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۴۰۰	۱۹/۰۵	۱۲	۶/۳۵	۵۰
۱۲	۲۶/۳۸	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۴۰۰	۱۹/۰۵	۱۲	۶/۳۵	۵۴

مقدار میانگین β به دست آمده ۰/۲۹۴ و انحراف معیار نسبت به عدد یک این نشانه‌ها ۰/۱۲۵ محاسبه شد که نشان‌دهنده درجه پایینی از پراکندگی در مقایسه با رابطه پیشنهادی پارک-آنگ است. در شکل ۳ رابطه پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

شکل (۳) ارزیابی دقت رابطه پیشنهادی برای محاسبه β

۸- نتیجه گیری

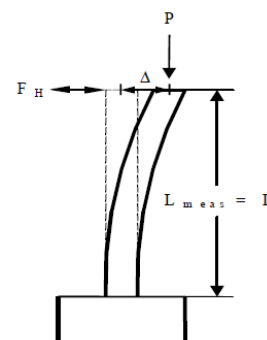
در این پژوهش، به بررسی یکی از متداول‌ترین شاخص‌های خسارت پرداخته و نقاط قوت و محدودیت آن‌ها بررسی

۷- رابطه پیشنهادی برای تعیین β

تحلیل ستون‌ها با استفاده از برنامه IDARC-2D انجام شد. نتایج تحلیل و آزمایشها با هم مقایسه شد. با سعی و خطا و رساندن واریانس به کمترین میزان، معادله پیشنهادی برای تعیین β به شکل رابطه ۴ به دست آمد.

در این مطالعه، همبستگی منفی بین مقادیر β و نسبت محصورشدگی (ρ_w) مشاهده شد؛ هم چنین همبستگی مثبت، نسبت دهانه برشی به عمق مقطع ($\frac{l}{d}$)، نسبت فولاد مصرفی (ρ) و نسبت تنش محوری (n) در نظر گرفته شد.

$$\beta = \left(-0.287 + 0.098 \frac{l}{d} + 0.229n + 0.21\rho \right) \times 0.687^{\rho_w} \quad (4)$$



شکل (۲) شکل ستون‌های مورد مطالعه

- شد. با تمرکز بر ستون‌های بتن‌آرمه با نوع انهدام خمشی و تمرکز بر روی بارگذاری دوره‌ای و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تحلیل خسارت ۹۵ ستون، مدل شاخص خسارت پارک-آنگ توسعه داده شد و رابطه‌ای با دقت بالاتر پیشنهاد شد.
- ۹- مراجع**
- [۱] رهایی، نعمتی؛ ارزیابی عملکرد و روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی؛ انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ۱۳۸۳؛ ۳۶۲ ص.
- [2] Mc Collister, H. M., Siess, C. P. and Newmark, N. M., (1974), "Load-Deformation Characteristics of Simulated Beam-Column Connection in Reinforced Concrete", Civil Engineering Studies, Structural Research Series No.76, University of Illinois, Urbana.
- [3] Park, Y.J. and Ang, A.H., (1985), "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.11, No.4, pp.722-739.
- [4] Berry, M. and Eberhard, M., (2003), "Performance Models for Flexural Damage in Reinforced Concrete Columns", Department of Civil & Environmental Engineering, University of Washington.
- [5] Park, Y.-J., and Ang, A.H.-S., (1985), "Seismic damage analysis of RC buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, No. ST4, 111, 740-757.
- [6] Golasfshani, A., Bakhshi, A. and Tabeshpour, M.R., (2005) "Vulnerability and Damage Analysis of Existing Buildings", Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing) Vol. 6, Nos. 1-2, Pages 85-100, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
- [7] Valles, S.K., Reinhorn, A.M., Kunnath S.K, and Madan A., (1996), "IDARC 2D Version 4.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings", Technical Report NCEER-96-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, SUNY/Buffalo.
- [8] Tabeshpour, M.R., Bakhshi, A., Golasfshani, A., (2004), "Seismic Vulnerability, Performance and Damage Analysis of Special Structures", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1431.
- [9] Karayannis, C.G., Chalioris, C.E. and Sirkelis, G.M., (2007), "Local retrofit of exterior RC beam-column joints using thin RC jackets-An experimental study", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Published online in Wiley Interscience (www.interscience.wiley.com) .DOI: 10.1002/eqe.783.
- [10] Berry, M., Parrish, M., and Eberhard, M., (2004), "PEER Structural Performance Database, User's Manual (Version 1.0)" University of California, Berkeley.
- [11] PEER: "Pacific Earthquake Engineering ResearchCenter", <http://peer.berkeley.edu/index.html>

«Research Note»

Investigation of Park-Ang Damage Index Model for Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns

R. Rajabi¹, M. Barghi^{2*}

2- MSc of Structural Eng, Department of Civil Eng., K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

1- Assistant Professor, Department of Civil Eng., K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

barghi@kntu.ac.ir

Abstract:

Damage assessment of bearing members before rehabilitation is necessary. If the damage state of a member is expressed by a number called "*damage index*". One of the most popular damage indexes for reinforced concrete (RC) members is Park-Ang Damage Index model. This model has been established based on the experimental results of RC beams and columns with different modes of damage. It has considerable uncertainty based on its authors' remarks. In this study, the precision of Park-Ang model for RC columns was improved by using some experimental results from the Peer's (Pacific Earthquake Engineering Research) data bank. The proposed model focuses on RC columns with specific sections and collapse modes.

Keywords: Damage index, Reinforced concrete columns, Park-Ang model, Strengthening.