

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

مهرداد پازکی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
m.pazoki@modares.ac.ir

عباسعلی تسنیمی

استاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
tasnimi@modares.ac.ir

کلید واژه‌ها: شاخص خسارت، سطح عملکرد، قاب خمشی بتن مسلح

چکیده

یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، بررسی خسارت‌های ایجاد شده در سازه است. شاخص‌های خسارت معیارهایی هستند که شامل چند متغیر خسارت بوده و اثرات آن متغیرها را روی خسارت عضو نشان می‌دهند. یکی از مهمترین شاخص‌های خسارت موجود شاخص خسارت پارک-انگ است که خسارت اعضا را به صورت ترکیب خطی خسارت‌های ناشی از بیشینه تغییرشکل‌ها و رفتار چرخه‌ای بیان می‌کند. در این مطالعه شاخص خسارت پارک-انگ در سطوح عملکرد سازه‌های بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور سه قاب خمشی بتن مسلح با تعداد طبقات مختلف در نظر گرفته شده و بر اساس آیین‌نامه‌های عملکردی و با تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی در سطوح عملکرد طراحی شده است. بر روی این قابها تحت هفت شتابنگاشت تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده و در نهایت بر اساس نتایج حاصل، تحلیل خسارت روی آنها صورت گرفته است.

بر اساس نتایج حاصل نحوه ارتباط میان شاخص خسارت پارک-انگ و معیار طراحی در آیین‌نامه‌های عملکردی و همچنین ارتباط میان شاخص خسارت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه حدود شاخص خسارت پارک-انگ در سطوح عملکرد تعیین شده و مشاهده شد که این شاخص‌های خسارت در سطح عملکرد آستانه فروریزش نیاز به بررسی بیشتر دارد. این شاخص خسارت حساسیت کمی نسبت به خسارت‌های ستون داشته و نمی‌تواند خسارت‌های ناشی تمرکز خسارت در یک طبقه را به طور مناسب نشان دهد.

مقدمه

هدف اصلی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، تامین ایمنی جانی در هنگام وقوع زلزله و تعمیرپذیر بودن سازه خسارت دیده پس از وقوع زلزله است. تجربه زلزله‌های اخیر نشان داده است که ساختمان‌های طراحی شده با آیین‌نامه‌های مبتنی بر نیرو دقت لازم را برای محدود نمودن خسارت‌های وارد شده بر سازه ندارند. این امر سبب تمرکز مطالعات روی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها و پیدایش نسل جدید آیین‌نامه‌های مبتنی بر عملکرد شده است. در طراحی بر اساس عملکرد، معیار پذیرش المان‌ها تامین حدود مجاز تغییرشکل‌های غیرارتجاعی است و معمولاً چند سطح عملکرد سازه‌ای مدنظر هستند. یک سطح عملکرد در واقع یک حالت از رفتار ساختمان به هنگام تجربه‌ی نیازهای یک زلزله با شدت مشخص است. در ادبیات علمی برای طراحی بر اساس عملکرد ساختمان‌ها، سه سطح عملکرد اصلی تعریف شده‌اند که عبارتند از: سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (*IO*)، ایمنی جانی (*LS*) و آستانه فروریزش (*CP*). این سطوح عملکرد به طور کلی بر اساس میزان خسارت‌های ایجاد شده در سازه تعریف می‌شوند، این در حالی است که رابطه مشخصی میان این سطوح عملکرد و میزان خسارت‌های اعضا و کل سازه وجود ندارد. در این مطالعه سعی شده است رابطه میان این سطوح عملکرد و آسیب پذیری سازه‌های بتن مسلح مورد ارزیابی قرار گیرد.

شاخص‌های خسارت معیارهایی هستند که شامل چند متغیر خسارت بوده و اثرات آن متغیرها را روی خسارت اعضای سازه نشان می‌دهند. هدف این مطالعه بررسی تغییرات شاخص خسارت پارک-انگ و در سطوح عملکرد سازه‌های بتن مسلح است. برای این منظور تعداد سه قاب بتن



مسلح در نظر گرفته شده و با تحلیل دینامیکی غیرخطی در سطوح عملکرد طراحی شده است و در نهایت قابها، مورد تحلیل خسارت قرار گرفته‌اند. در این قابها علاوه بر بررسی مقادیر شاخص‌های خسارت، نحوه توزیع خسارت در بین اعضا ارزیابی شده است.

شاخص خسارت

شاخص‌های خسارت توابعی هستند که با استفاده از چند متغیر، میزان خسارت وارده به یک عضو و یا کل سازه را نشان می‌دهند. شاخص خسارت یک کمیت نرمان شده‌ای است که برای حالت الاستیک (بدون خسارت) مقدار آن برابر صفر و برای حالتی که گسیختگی روی داده است، برابر با مقدار یک است. عملکرد لرزه‌ای 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 بیان می‌کنند.

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

۳. شاخص‌های میانی : خسارت در یک طبقه و به طور کلی در یک زیر سازه بیان می‌شود.

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

شاخص خسارت اولیه 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. برای توسعه این شاخص از آزمایش‌های زیادی با بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای استفاده شده است. (Park YJ, Ang AH-S, 1985) این شاخص به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D_{PA} = \frac{u_m}{u_u} + S_{PA} \frac{\int dE}{Q_y u_u} \quad (1)$$

عبارت اول در رابطه بالا یک اندازه‌گیری شبه استاتیکی ساده از تغییرمکان است که اثرات تجمعی را در نظر نمی‌گیرد. اثرات تجمعی تنها در عبارت انرژی لحاظ می‌شوند. در این شاخص خسارت u_m و dE به تاریخچه بارگذاری وابسته بوده و پارامترهای Q_y ، u_u ، S_{PA} مستقل از تاریخچه بارگذاری است که بر اساس ظرفیت عضو تعیین می‌شوند.

در شاخص خسارت پارک-انگ اثرات کاهش مقاومت در رفتار چرخه‌ای بر روی خسارت عضو با پارامتر S_{PA} بیان می‌شود. بر اساس نتایج آزمایشگاهی با سعی و خطا رابطه (۲) برای ضریب S_{PA} ارائه شده است: (Park YJ, Ang AH-S, 1985)

$$S_{PA} = (-0/447 + 0/073 \frac{L}{d} + 0/24n_0 + 0/314\dots) * 0/7^{-w} \quad (2)$$

مزیت این مدل در سادگی آن است و نیز این واقعیت که این شاخص در برابر خسارات مشاهده شده برشی و چسبندگی سنجیده شده است. (1988) Ang A. H. مقدار $D_{PA} = 0/4$ را برای مرز بین خسارت قابل مرمت و غیر قابل مرمت پیشنهاد کردند و طبقه بندی جزئی زیر ارائه شده است:

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

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

$0/25 \leq D_{PA} < 0/4$: خسارت متوسط- ترک خوردگی‌های شدید و پکیدن موضعی بتن

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

در شاخص پارک-انگ ضریب S_{PA} تعیین‌کننده میزان خسارت‌های ناشی از اتلاف انرژی است، در رابطه ارائه شده توسط Park YJ, Ang (1985) AH-S پراکندگی زیادی وجود دارد و مقدار شاخص برای تعداد زیادی از نمونه‌ها مقدار غیرمنطقی (بیشتر از یک) بدست آمده است.

شاخص خسارت اصلاح شده پارک-انگ

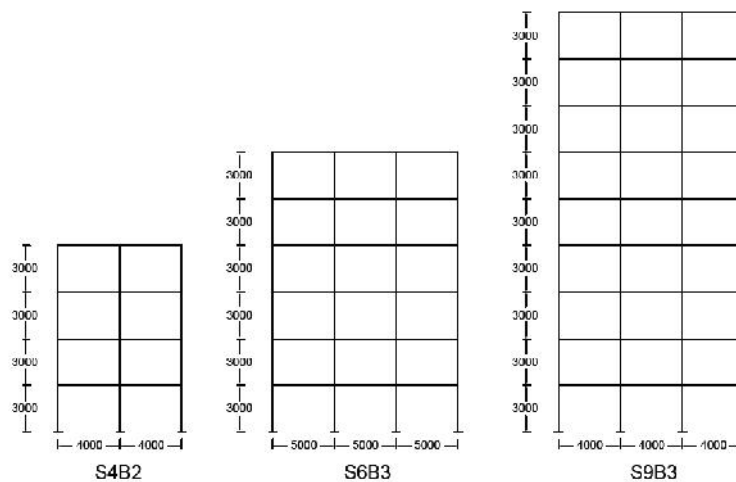
شاخص خسارت پارک-انگ در سال‌های گذشته توسط محققان مورد بررسی بیشتر قرار گرفته است. در مطالعات انجام شده مشاهده شده است که این شاخص در حد بالایی خود (یعنی مقدار ۱/۰) دارای پراکندگی زیادی است. Kunnath, S.K. et al., (1992) رابطه‌ی اصلاحی خود را با دو تغییر عمده ارائه داده‌اند. آنها رابطه‌ی پارک-انگ را بر مبنای منحنی لنگر-انحنای بازنویسی کرده و مقدار ضریب β را به صورت ثابت و برابر با ضریب کاهش مقاومت در مدل چرخه‌ای در نظر گرفته‌اند. رابطه اصلاحی کوناث عبارت است از:

$$D_{Ku} = \frac{m - r}{u - r} + S_{Ku} \frac{\int dE}{M_y u} \quad (3)$$

از آنجا که پارامتر S_{PA} در مدل پارک-انگ در واقع ارتباط بین کاهش مقاومت و خسارت را برقرار می‌کند، در مدل اصلاحی کوناث برای مدل‌سازی اثرات کاهش مقاومت در شاخص خسارت و مدل چرخه‌ای از یک ضریب استفاده می‌شود. در رابطه کوناث مقدار ضریب β به صورت ثابت و مستقل از ویژگی‌های مقطع و برابر با ضریب کاهش مقاومت در مدل چرخه‌ای (هیستریزس) در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه براساس مقادیر پیشنهاد شده برای مدل چرخه‌ای، ضرایب S_{Ku} برای سطوح عملکرد IO ، LS و CP به ترتیب برابر مقادیر ۰/۰۸، ۰/۱۵ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است. (IDARC 2D -7.0, User's guide, 2010)

مدل‌سازی قابها

برای ارزیابی شاخص خسارت در قابهای بتن مسلح، تعداد سه قاب خمشی بتن مسلح مطابق با شکل (۱) در نظر گرفته شده است. در این قابها تعداد طبقات به ترتیب ۴، ۶، ۹ و ۹ و تعداد دهانه‌ها ۲ و ۳ دهانه می‌باشد. 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 انتخاب شده است. در این قابها طول ستون‌ها و طول دهانه تیرها یکسان فرض شده تا هماهنگی بیشتری میان خسارت اعضا وجود داشته باشد. برای معرفی قابها از چهار حرف و دو عدد استفاده شده است، به این صورت که عدد بعد از حرف K بیانگر تعداد طبقات، عدد بعد از حرف B معرف تعداد دهانه‌های قاب و حروف IO ، LS و CP به ترتیب معرف سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش قاب است.



شکل ۱: قاب‌های مدل‌سازی شده

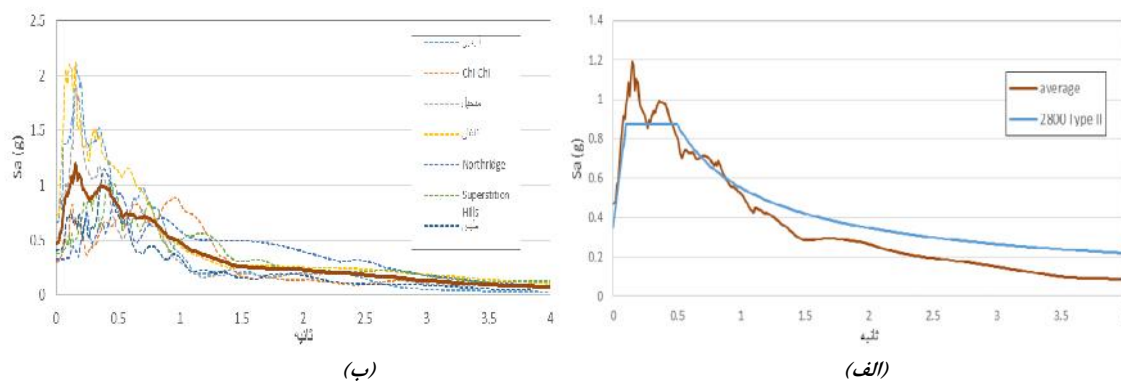
برای تعیین بارهای ثقلی وارده به قابها از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان استفاده شده است. پس از محاسبات انجام شده، بار مرده هر طبقه ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع تعیین شده است. به این ترتیب بار موثر تیرها در قابها برابر کل بار مرده و ۲۰٪ بار زنده در نظر گرفته شده است. در محاسبه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

در این مطالعه از شتابنگاشت‌های زلزله‌های مختلف بر اساس زمین نوع II استفاده شده است. برای انتخاب شتابنگاشت‌های ایران از مطالعات تقدیر ع (۱۳۸۱) استفاده شده که بر اساس برداشت‌های ژئوفیزیکی، ایستگاه‌ها را بر اساس نوع زمین تقسیم‌بندی کرده‌اند. رکوردهای کشورهای دیگر از سایت PEER (2014) تهیه شده که بر اساس خاک نوع C که معادل با زمین نوع II در آیین‌نامه ۲۸۰۰ است، انتخاب شده است. مشخصات شتابنگاشت‌های مختلف در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات شتابنگاشت‌ها

تاریخ و محل وقوع	ایستگاه ثبت رکورد	PGA	زلزله
ABBAR 06/20/90	ABBAR	۰/۶۴۷	آب بر
CHI-CHI 09/20/99	TCU047	۰/۲۹۲	Chi-Chi
MANJIL 06/20/90	MANJIL	۰/۵۵	منجیل
NAGHAN 06/06/77	NAGHAN	۰/۷۲	ناغان
NORTHRIDGE EQ 1/17/94	USC STATION 90056	۰/۳۳	Northridge
SUPERSTITION HILLS 11/24/87	USGS STATION 5051	۰/۳۸	Superstition Hills
IRAN 09/16/78	DAYHOOK	۰/۴۰۶	طیس

دقت شود که برای انجام تحلیل تاریخیچه زمانی اثر مولفه قائم زلزله در نظر گرفته نشده است و زلزله‌ها تنها در جهت افقی و در راستای قاب اعمال شده است. برای تعیین سطح خطر شتابنگاشت‌ها، مقایسه‌ای میان میانگین طیف‌ها و طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای زمین نوع II صورت گرفته است. در شکل (۲) مشاهده می‌شود که در زمان تناوب‌های میان ۰/۴ تا ۱/۵ ثانیه تطابق نسبتاً مناسبی میان طیف‌های استفاده شده و طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ وجود دارد.

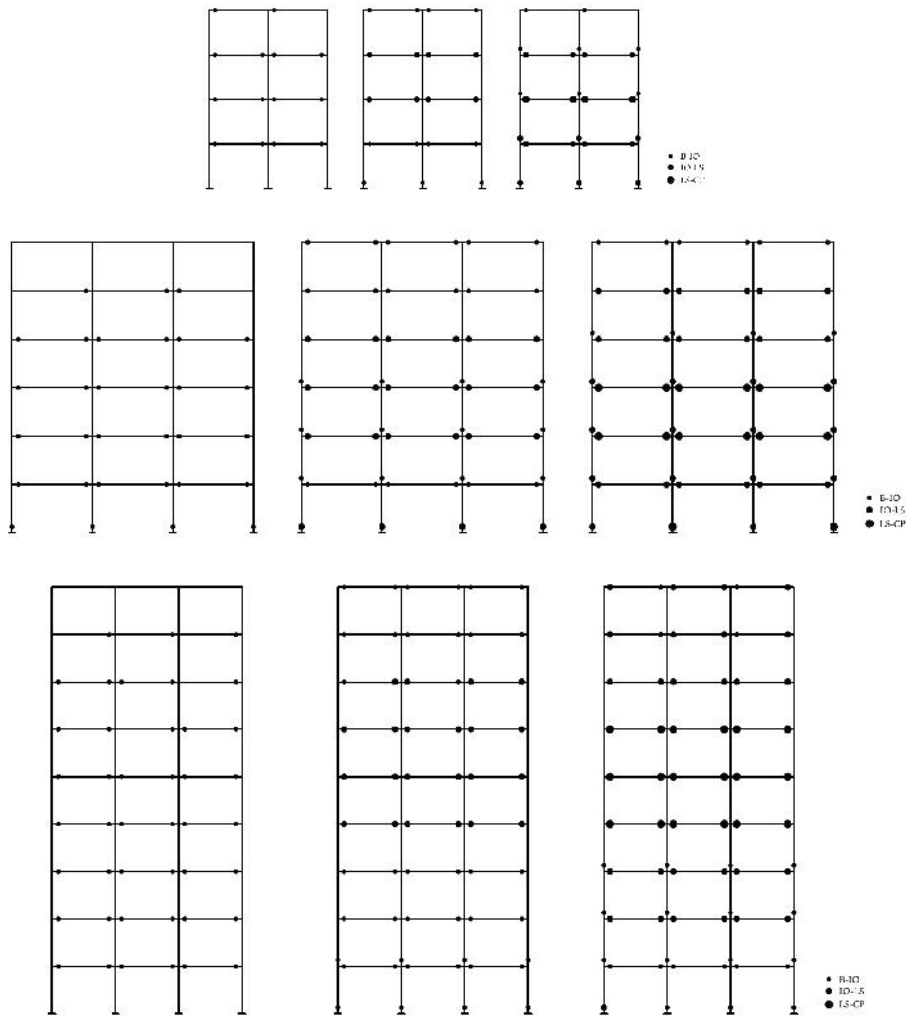


شکل ۲: (الف) طیف زلزله‌های استفاده شده (ب) مقایسه طیف میانگین و طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰

طراحی قابها در سطوح عملکرد

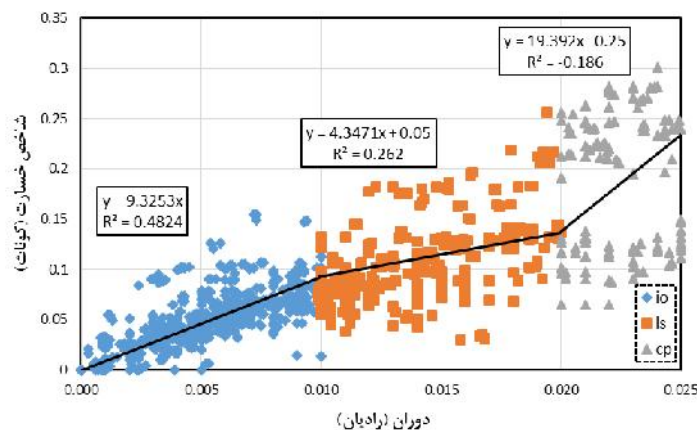
در این مطالعه سه قاب با ویژگی‌هایی که بیان شد، برای بررسی خسارت سازه در سطوح عملکرد در نظر گرفته شده است. هر یک از این قاب‌ها ابتدا در نرم‌افزار SAP2000 برای سه سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش با تحلیل استاتیکی غیرخطی (بارافزون) و بر اساس آیین‌نامه (2006) ASCE-41 طراحی اولیه صورت گرفته است. سپس با استفاده از نرم‌افزار IDARC-2D با تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت هفت شتابنگاشت، 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 (2006) ASCE-41 قرار داشته باشند. دوران ایجاد شده در اعضا برای تیرها در سطوح عملکرد قابلیت استفاده 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 در نظر گرفته شده است. در نهایت تغییرمکانهای قاب کنترل شده، تا از حدود مجاز تعیین شده توسط این آیین‌نامه‌ها فراتر نرفته باشد.

از بررسی وضعیت تنش‌المانها در پایان تحلیل مشاهده می‌شود که در سازه‌های 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 شده است. 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 روش نداده است. در شکل (۳) نحوه توزیع مفاصل خمیری بعد از تجربه زلزله در قابهای مورد نظر نشان داده شده است.



شکل ۳: توزیع مفاصل خمیری در قابها

تغییر مکان‌های حداکثر 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 تغییر مکان حداکثر قاب افزایش می‌یابد. مقادیر شتاب پایه نیز با افزایش سطح عملکرد روند کاهشی داشته که ناشی از کاهش ظرفیت قاب با افزایش سطح عملکرد است. برای بررسی رابطه میان شاخص‌های خسارت و سطوح عملکرد بیان شده در آیین‌نامه‌های عملکردی، لازم است شاخص خسارت اعضا در مقابل بیشینه دوران ایجاد شده در مفصل‌های خمیری در طی زلزله ترسیم شده تا رابطه میان آن دو مشخص شود. در ادامه شاخص خسارت پارک-انگ برای تیرهای سه قاب S4B2، S6B3 و S9B3 در سه سطح عملکرد نمایش داده می‌شود.



شکل ۴: مقایسه شاخص خسارت کونوت و دوران مفاصل خمیری تیرها



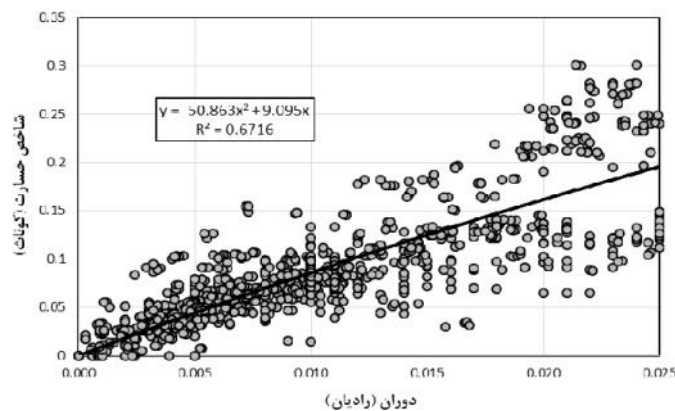
مشاهده می‌شود که با افزایش میزان دوران در مفاصل خمیری مقدار شاخص خسارت تیرها نیز افزایش یافته است. میان شاخص خسارت تیرها و دوران در مفاصل خمیری در سه سطح عملکرد رابطه خطی برقرار شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دوران مفاصل خمیری پراکندگی داده‌ها افزایش یافته است.

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. بنابراین 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 در تیرها 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 چرخه-ای آن خواهد بود. در این ناحیه نحوه تعیین سهم خسارت ناشی از رفتار چرخه‌ای که با ضریب β تعیین می‌شود، اهمیت زیادی پیدا می‌کند که به علت ثابت فرض شدن ضریب β ، شاخص خسارت در این ناحیه پراکندگی داده‌ها به مراتب بیشتر شده است. در جدول (۲) مقادیر متوسط، بیشینه و کمینه شاخص خسارت اصلاح شده پارک-انگ برای تیرها نشان داده شده است.

جدول ۲: مقادیر متوسط، بیشینه و کمینه شاخص خسارت کونات تیرها

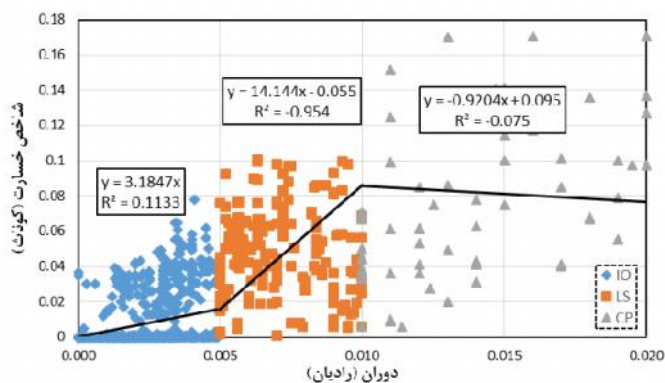
	سطح عملکرد تیر		
	CP	LS	IO
متوسط	۰/۱۸۷	۰/۱	۰/۰۵۲
بیشینه	۰/۳	۰/۳۱۹	۰/۱۵
کمینه	۰/۰۶۵	۰/۰۳	۰/۰

مشاهده می‌شود که بیشینه شاخص خسارت تیرها مقدار ۰/۳ بدست آمده است. باید دقت شود که مقادیر ارائه شده در جدول (۲) مربوط به مقاصد طراحی تیرهای بتن مسلح است. در شکل (۵) مقایسه‌ای میان شاخص خسارت پارک-انگ و دوران در مفاصل خمیری با درون‌یابی درجه دو نشان داده شده است.



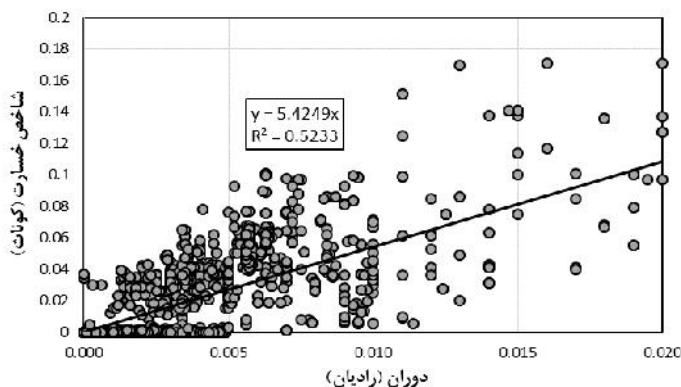
شکل ۵: مقایسه شاخص خسارت کونات و دوران مفاصل خمیری تیرها

مشاهده می‌شود که ثابت فرض شدن مقدار ضریب β باعث ایجاد رابطه نزدیک به خط بین شاخص خسارت تیرها و دوران در مفاصل خمیری شده است. این شاخص در سطح عملکرد آستانه فروریزش در مقایسه با دیگر سطوح دارای پراکندگی بیشتر است. 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 جز اجزا کنترل شونده 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. در آیین‌نامه‌ی (ASCE-41 (2006) برای تعیین سطح عملکرد ستونها از مقدار دوران ایجاد شده در مفصل‌های خمیری استفاده می‌شود. بر اساس نسبت نیروی محوری و شرایط محصورشدگی و نسبت نیروی برشی مقطع، حدود این دوران در مفصل‌های خمیری تعیین می‌شود. بر اساس این آیین‌نامه برای سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه از دوران ۰/۰۵ رادین، برای سطح عملکرد ایمنی جانی از مقدار ۰/۰۱۵ و برای سطح عملکرد آستانه فروریزش از مقدار ۰/۰۲ رادین استفاده می‌شود. در شکل (۶) شاخص خسارت ستونها در مقابل دوران در مفاصل خمیری نشان داده شده است.



شکل ۶: شاخص خسارت کوناث برای ستونها

در شکل (۶) شاخص خسارت ستونهای سه قاب مورد نظر در سه سطح عملکرد نشان داده شده و رابطه میان شاخص خسارت و دوران مفاصل خمیری تعیین شده است. مشاهده می‌شود که در ستونها مانند تیرها رابطه‌ی مناسبی میان شاخص خسارت و دوران در مفاصل وجود ندارد و پراکندگی‌ها داده‌ها به مراتب بیشتر است. البته تعداد زیادی از ستون دارای شاخص خسارت نزدیک به صفر هستند 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 دارای حساسیت کمی است. در شکل (۷) رابطه میان شاخص خسارت ستونها و دوران مفاصل خمیری با درون‌یابی درجه دو نشان داده شده است.



شکل ۷: مقایسه میان شاخص خسارت ستونها و دوران در مفاصل خمیری با درون‌یابی درجه دو

همانگونه که بیان شد از ستونها ظرفیت تغییر مکانی زیادی انتظار نمی‌رود. 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 اغلب ستونها طبقه اول وارد محدوده غیرخطی شده‌اند و مفصل خمیری شکل گرفته است. در جدول (۳) مقادیر شاخص خسارت ستونها برای سه سطح عملکرد نشان داده شده است.

جدول ۳: مقادیر متوسط، بیشینه و کمینه شاخص خسارت کوناث ستونها

سطح عملکرد ستونها			
CP	LS	IO	
۰/۰۸	۰/۰۴۵	۰/۰۲	متوسط
۰/۱۷	۰/۱	۰/۰۷۸	بیشینه
۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰	کمینه

نتیجه‌گیری

در این مطالعه شاخص خسارت پارک-انگ در سطوح عملکرد قابهای خمشی بتن مسلح مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور سه قاب خمشی بتن مسلح با تحلیل دینامیکی در سه سطح عملکرد طراحی شده‌اند و با استفاده از نتایج حاصل، شاخص خسارت تیرها و ستونها در سطوح عملکرد ارزیابی شده است.



بروز خسارت‌ها باعث ایجاد تغییراتی در مشخصات دینامیکی سازه می‌شود. به این ترتیب که با کاهش سختی، سبب افزایش زمان تناوب طبیعی سازه خواهد شد. مقادیر برش پایه به ترتیب برای قابهای IO ، LS و CP کاهش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش سطح عملکرد قاب یا ضعیف‌تر شدن آن ظرفیت برشی قاب نیز کاهش می‌یابد.

با بررسی وضعیت تنش‌المانها در پایان تحلیل، انتظار می‌رود که در سازه‌های IO تنها در تیرها مفصل خمیری ایجاد شده و ستونهای وارد محدوده غیرخطی نشوند. در قابهای LS در برخی زلزله‌های شدید ممکن است در ستون‌ها نیز مفصل تشکیل شود. در قابهای CP به طور معمول در کل تیرها مفصل خمیری تشکیل شده و در ستونهای طبقه اول و گاهی دیگر طبقات مفصل ایجاد می‌شود. باید دقت شود که در طراحی بر اساس عملکرد در هیچ یک از اعضا گسیختگی روش نخواهد داد.

با افزایش مقدار دوران در مفاصل خمیری، مقدار شاخص خسارت اعضا نیز افزایش می‌یابد. در این مطالعه رابطه میان شاخص خسارت تیرها و ستونها در سه سطح عملکرد بدست آمده و حدود شاخص خسارت در سه سطح عملکرد برای مقاصد طراحی مشخص شده است. مشاهده شد که در اعضا با سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه پراکندگی کم بوده اما با افزایش مقدار دوران در اعضا یا به عبارت دیگر در سطوح عملکرد بالاتر، پراکندگی داده‌ها بیشتر می‌شود، این امر نشان از ضعف این شاخص در 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.

معرفی علائم به کار رفته

U_m : بیشینه تغییر شکل در هنگام زلزله	\dots, w = نسبت میلگرد های محصورکننده
U_u : تغییر شکل نهایی تحت بارگذاری یکنواخت	m : دوران بیشینه در طول تاریخچه بارگذاری
Q_y : مقاومت تسلیم	u : ظرفیت نهایی دوران در مقطع
U_m : بیشینه تغییر شکل در هنگام زلزله	r : دوران برگشت پذیر در باربرداری
U_u : تغییر شکل نهایی تحت بارگذاری یکنواخت	M_y : لنگر حد تسلیم
Q_y : مقاومت تسلیم	dE : انرژی مستهلک شده در مقطع
dE : انرژی تجمعی هیستریزس جذب شده	S_{Ku} : پارامتر زوال مقاومت در مدل چرخه ای
S_{PA} : پارامتر مثبت	\dots } : ضرایب وزنی انرژی
$\frac{L}{d}$ = نسبت دهانه برشی	E_i : انرژی جذب شده کلی توسط جزء سازه ای نام یا طبقه نام
n_0 = تنش محوری نرمال شده	DI_i : شاخص خسارت اعضا سازه
\dots, r = درصد نسبت میلگرد های طولی	

مراجع

تقدیر ع (۱۳۸۱) طبقه‌بندی نوع زمین ایستگاه‌های ثبت زلزله بر اساس شکل طیف، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت، ایران

Ang AH (1988) Seismic damage assessment and basis for damage limiting Design, Probabilistic Engineering Mechanics, 3(1): 146-150

ASCE/SEI 41-06 (2006) Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineering, Virginia

IDARC 2D Version 7.0 (2010) User's guide of a program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures

Kunnath SK, Reinhorn AM and Lobo RF (1992) 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

Park YJ and Ang AH-S (1985) Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 111(4): 722-739

PEER structural performance database (2014) Available from: <http://nisee.berkeley.edu/spd/>.