

# عملکرد لرزه‌ای قابهای خمشی بتن مسلح بر اساس تحلیل خسارت استاتیکی

علیرضا حبیبی، استادیار، دانشگاه کردستان، سنندج  
مهدی ایزدپناه، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه کردستان، سنندج  
آزاد یزدانی، استادیار، دانشگاه کردستان، سنندج

## چکیده

شکل‌پذیری سازه‌ها می‌باشد، خسارت وارد بر سازه‌ها را به طور مناسبی می‌تواند پیش‌بینی نماید. **کلیدواژه‌ها:** خسارت، طراحی بر اساس عملکرد، تحلیل دینامیکی، تحلیل بارافزون، معیار تغییرشکل نسبی

## ۱- مقدمه

طراحی عملکردی از مهمترین مقولاتی است که در چند سال اخیر مورد توجه محققان در زمینه مهندسی سازه و زلزله قرار گرفته است. در این روش سعی بر آن است که سازه طراحی شده در یک منطقه با سطح لرزه-خیزی خاص، قابلیت رسیدن به عملکرد مورد انتظار طراح را که متناسب با جزئیات معرفی شده در استانداردهای مبتنی بر عملکرد برای سطوح عملکردی و همچنین از نظر محدود نمودن خسارت وارد بر سازه‌ها به هنگام طراحی در نظر داشته را برآورده سازد. از مهمترین مقولات در طراحی عملکردی، داشتن تصویری روشن از مقدار خسارت وارد بر سازه طراحی شده در سطوح مختلف خطر می‌باشد. به این منظور در دستورالعمل‌هایی چون *FEMA* و *ATC40* [۱-۲] سطوح مختلفی از خسارات وارد بر سازه ارائه شده است. معیار تعیین‌کننده وضعیت سازه در این دستورالعمل‌ها، بر اساس تغییرشکل جانبی می‌باشد؛ هرچند که در برخی از تحقیقات، نشان داده شده است که استفاده از این معیار به عنوان تنها معیار خرابی، جای تأمل دارد [۳].

تحقیق حاضر پاسخ به دو سؤال را جستجو می‌کند. ابتدا اینکه آیا شاخص تغییرشکل جانبی، برای تعیین وضعیت عملکردی سازه مناسب است یا خیر؟ و اگر مناسب

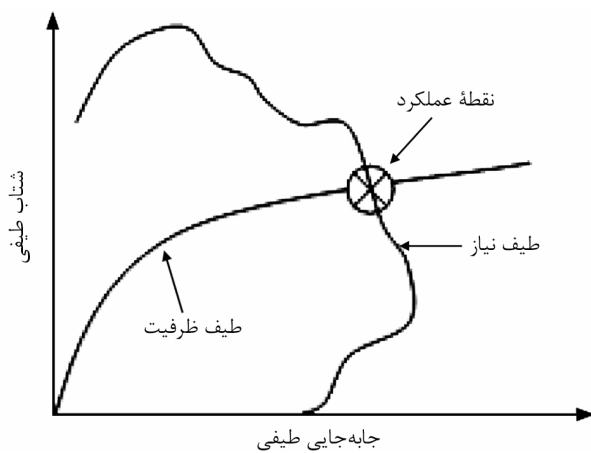
مشاهده میزان خسارت وارد بر سازه‌ها در چند سال اخیر نشان داد که هر چند سازه‌های طراحی شده بر اساس ضوابط لرزه‌ای موجود، در حفظ ایمنی افراد، مناسب عمل کرده‌اند اما دامنه خرابیهای ایجاد شده در سازه‌ها و خسارت اقتصادی وارده، بسیار گسترده و خارج از انتظار بوده است. این موضوع سبب تغییر ضوابط آیین‌نامه‌ها و حرکت آنها به سمت طراحی بر اساس عملکرد، به عنوان روشی مبتنی بر پذیرش تغییر مکان و شکل‌پذیری مورد انتظار گردید. از مهمترین موضوعها در طراحی عملکردی تعیین و پیش‌بینی میزان خسارت وارد بر سازه‌ها می‌باشد و به این منظور در استانداردهای مربوطه، سطوح و حدود مشخصی ارائه شده است. هدف اصلی از تحقیق حاضر، ارزیابی سطوح ذکر شده در کاهش دادن خسارتهای سازه‌ای می‌باشد. در این راستا، شاخصهای خسارت حاصل از تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین عملکرد آیین‌نامه آبا و استاندارد ۲۸۰۰ در محدود نمودن خسارت وارد بر قابهای خمشی بتن مسلح ارزیابی می‌شود. به این منظور تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی روی چندین قاب خمشی بتن مسلح تحت اثر هفت رکورد زلزله مناسب انجام شد. سپس خسارتهای استاتیکی و دینامیکی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاکی از این است که، معیار تغییرشکل نسبی ارائه شده در استانداردهایی چون *FEMA* و *ATC40* به دلیل در نظر نگرفتن ظرفیت نهایی سازه‌ها نمی‌تواند به تنهایی میزان خسارت وارد بر سازه‌ها را به خوبی منعکس کند. در حالی که معیار پیشنهادی این تحقیق که بر اساس

همچنین در ادامه به ارزیابی میزان خسارت وارد بر سازه‌های طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه آبا و استاندارد ۲۸۰۰ و مقایسه مقادیر خسارت آنها با حدود و جزئیات معرفی شده توسط محققین پرداخته می‌شود. نشان داده می‌شود که آیین‌نامه آبا و استاندارد ۲۸۰۰، در محدود نمودن خسارت وارد بر سازه‌های طراحی شده مطابق با این آیین‌نامه‌ها در هدف تأمین ایمنی جانی افراد، دارای عملکرد مناسبی می‌باشند و ضوابط این استانداردها تا حدی محافظه‌کارانه هستند.

## ۲- تعیین عملکرد سازه

از آنجا که تعیین عملکرد سازه از ارکان اصلی این تحقیق می‌باشد، انتخاب یک روش مناسب به این منظور مورد نیاز است. در این تحقیق، جهت تعیین عملکرد سازه از روش طیف ظرفیت، ارائه شده در مرجع [۲]، استفاده می‌شود که ذیلاً تشریح می‌گردد.

در این روش نقطه عملکرد باید مطابق شکل (۱)، همزمان روی طیف ظرفیت و طیف تقاضای غیرخطی، قرار گیرد.



شکل (۱): نقطه عملکرد در روش طیف ظرفیت.

به این منظور لازم است تا منحنی نیاز و ظرفیت در دستگاه واحد شتاب طیفی در مقابل جابه‌جایی طیفی موسوم به  $ADRS$ <sup>۱</sup> ترسیم شوند که روابطی در مرجع [۲]، ارائه شده است. یکی از مهمترین مسائل در روش طیف ظرفیت تخمین میرایی مؤثر سازه در حالت غیرخطی و تهیه

نیست، آیا می‌توان شاخصی بر اساس تحلیل بارافزون ارائه نمود که دارای تخمین مناسبی از عملکرد واقعی سازه باشد؟ سؤال دوم، اینکه آیین‌نامه طراحی آبا و استاندارد ۲۸۰۰ ایران تا چه حد در محدود نمودن خسارت وارد بر سازه‌ها موفق هستند؟ در پاسخ به این سؤالات، ابتدا باید شاخص خسارتی انتخاب می‌شد تا ملاک سنجش رفتار سازه‌ها قرار گیرد، به طوری که دارای انطباق مناسبی با خسارت واقعی وارد بر سازه باشد و همچنین با مشاهده خسارت سازه‌ها، مقادیر آن کالیبره شده باشند. به این منظور شاخصهای گوناگون خسارت چون شاخص خسارت پارک و انگ [۴]، براساس ۱۹۸۹ و همکاران [۵]، کک مک و دی‌پاسکواله [۶-۸]، یوسامی و کومار [۹]، گوبارا و همکاران [۱۰] و ژانگ و همکاران [۱۱] که هر یک با در نظر گرفتن جنبه‌ای از رفتار سازه، به ارائه شاخص خود پرداخته‌اند، مشاهده گردید که شاخص خسارت پارک و انگ جزء معدود شاخصهایی است که محققین مختلف بر صحت نتایج آن صحه گذاشته‌اند و از دیگر مشخصه‌های کاربردی آن، ارائه سطوح مختلف خسارت، متناسب با مقادیر این شاخص می‌باشد. با توجه به این موضوع، شاخص پارک و انگ به عنوان معیار ارزیابی خسارت واقعی سازه‌ها، در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که اکثریت شاخصهای پیشنهادی توسط محققین، از جمله شاخص خسارت پارک و انگ بر اساس انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی قرار دارند که تحلیلی بسیار پیچیده و وقتگیر می‌باشد و این امر سبب شده کمتر از این شاخصها در مقاصد کاربردی استفاده شود. هدف اصلی تحقیق حاضر ارائه یک معیار مؤثر و در عین حال کاربردی بر اساس نتایج تحلیل بارافزون که تحلیلی نسبتاً ساده‌تر و سریعتر از تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌باشد، جهت ارزیابی خسارت قابهای بتنی می‌باشد. به این منظور، با در نظر گرفتن هفت رکورد زلزله، به مدلسازی غیرخطی چندین قاب خمشی پرداخته شده و شاخص خسارت پارک و انگ برای آنها محاسبه می‌گردد. سپس با مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج شاخصهای خسارت پیشنهادی در تحلیل بارافزون، معیارهای جدید معرفی می‌گردند.

استفاده شده است، اما به منظور افزایش دقت در تعیین نقاط عملکرد به جای استفاده از فرض ساده کننده این روش، در هر نقطه از منحنی ظرفیت، سطح زیر این منحنی با استفاده از روشهای انتگرال گیری عددی (روش ذوزنقه) با دقت بسیار خوبی محاسبه شده است (از این روش تحت عنوان روش دقیق، در ATC40 صحبت شده است).

### ۳- شاخصهای انتخابی و پیشنهادی این تحقیق

#### ۳-۱- شاخص خسارت پارک و انگ

همان طور که ذکر شد شاخص خسارت پارک و انگ که در سال ۱۹۸۴ ارائه شد به عنوان یک شاخص مبنا در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار می گیرد. مزیت اصلی این مدل در متناسب بودن آن با نتایج تجربی و تناسب درجه-بندی آن با خسارت مشاهده شده می باشد. این شاخص از رابطه (۱) به دست می آید [۴]:

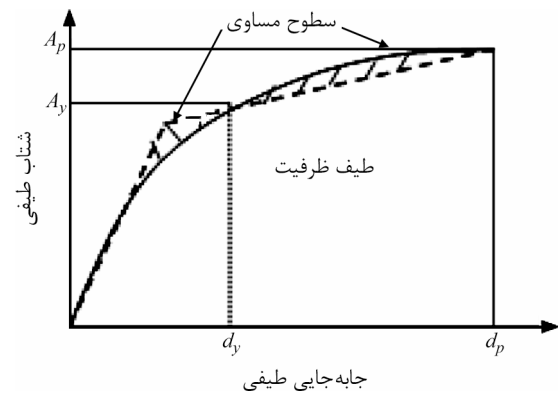
$$DI_{P\&A} = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta E_h}{M_y \theta_u} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\theta_m$  بیشترین چرخش ایجاد شده در عضو در تاریخچه بارگذاری،  $\theta_u$  بیشترین ظرفیت چرخش مقطع،  $\theta_r$  چرخش بازیافتی پس از باربرداری،  $M_y$  لنگر تسلیم،  $\beta$  ثابت مدل و  $E_h$  انرژی تلف شده در مقطع می باشند. در جدول (۱)، تناسب خسارت واقعی وارد بر سازه با مقادیر این شاخص که توسط پارک ارائه شده، نمایش داده می شود.

جدول (۱): جزئیات خسارت، متناسب با شاخص پارک [۴].

| وضعیت ساختمان  | شاخص آسیب    | نمود ظاهری   | درجه آسیب |
|----------------|--------------|--|-----------|
| تخریب          | $> 1$        | فرو ریختن موضعی یا کلی ساختمان                       | فروریزش   |
| غیر قابل تعمیر | $0.7 - 1.0$  | خرد شدن گسترده بتن، نمایان شدن آرماتورهای کمانه کرده | شدید      |
| قابل تعمیر     | $0.25 - 0.4$ | ترکهای بزرگ و گسترده، متورق شدن بتن در اعضای ضعیف تر | متوسط     |
| قابل تعمیر     | $0.1 - 0.25$ | ترکهای کوچک، خرد شدن موضعی بتن در ستونها             | کم        |
| قابل تعمیر     | $< 0.1$      | بروز ترکهای پراکنده                                  | ناچیز     |

طیف نیاز کاهش یافته می باشد. هر نقطه روی منحنی ظرفیت دارای یک میرایی معادل، یک پریود معادل، یک شکل پذیری و یک نقطه تسلیم مشخص می باشد که برای تعیین این مشخصات، منحنی ظرفیت با یک منحنی دوخطی، به گونه ای تقریب زده شود که سطح زیر این دو منحنی تا نقطه مورد نظر که معرف انرژی جذب شده توسط سیستم است، با هم برابر شوند. با استفاده از این تساوی مطابق با شکل (۲)، نقطه تسلیم مربوطه مشخص می شود و با داشتن این نقطه می توان کلیه اطلاعات نامبرده برای هر نقطه از منحنی ظرفیت را مشخص نمود. پس از انجام محاسبات مزبور، با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [۲] میرایی مؤثر محاسبه می شود. با استفاده از این میرایی مؤثر، طیف نیاز کاهش یافته محاسبه شده و می توان به سمت تعیین نقطه عملکرد سازه، گام برداشت.



شکل (۲): منحنی ظرفیت و منحنی دو خطی معادل.

تعیین نقطه عملکرد در روش طیف ظرفیت، عملیاتی سعی و خطا می باشد و برای تعیین نقطه عملکرد، روشهای مختلفی در مراجع موجود می باشد. در استاندارد ATC40، سه روش برای تعیین نقطه عملکرد، تحت عنوان، روش A، B و C پیشنهاد شده است. روشهای A و B روشهایی تحلیلی و روش C روشی گرافیکی می باشد که از دقت کمتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. از نواقص روش A، می توان به عدم همگرایی آن در پاره ای موارد اشاره نمود [۱۲]. روش B نیز از فرض ساده کننده تقریب کلی طیف ظرفیت با منحنی دوخطی استفاده می کند که سبب ایجاد تقریب در نتایج خواهد شد. در این تحقیق، از روش B در تعیین نقاط عملکرد

در مرجع [۲] که در بخش ۲ توضیح داده شد، برای هر نقطه عملکرد محاسبه می‌گردد. به منظور تعیین ظرفیت نهایی سازه تعاریف مختلفی توسط محققین مطرح شده است، اما در این تحقیق نقطه ظرفیت نهایی سازه، نقطه‌ای از منحنی ظرفیت سازه در نظر گرفته می‌شود که در آن با افزایش اندک نیروی جانبی، سازه دچار تغییرشکل ناگهانی بسیار بزرگی، نسبت به گام قبل شود و به اصطلاح در منحنی ظرفیت سازه، پرش رخ دهد.

#### ۴- طراحی قابهای مورد مطالعه

در این بخش به منظور ارزیابی شاخصهای خسارت معرفی شده در بخشهای گذشته، تعداد چهارده قاب بتن مسلح به گونه‌ای در نظر گرفته شدند که سطح وسیعی از تعداد طبقات و دهانه‌ها را شامل شوند. قابهای چهار دهانه از مرجع [۱۴] و ده قاب دیگر (دو و پنج دهانه) نیز از مرجع [۱۵]. قابهای چهار دهانه دارای تعداد طبقات پنج، هشت، دوازده و پانزده، قابهای پنج دهانه دارای تعداد طبقات دو، چهار، شش، هشت و ده و قابهای دو دهانه دارای تعداد طبقات یک، سه، پنج، هفت و نه می‌باشند. ارتفاع کلیه طبقات ۳/۲ متر و طول کلیه دهانه‌ها نیز ۴ متر می‌باشد. در مدلسازی این قابها فرض می‌شود کلیه قابها در بستر سنگی قرار دارند و برای منطقه با خطرپذیری متوسط طبق استاندارد ۲۸۰۰ بارگذاری و آیین‌نامه آبا طراحی شده‌اند (در طراحی این قابها، کلیه ضوابط از جمله، محدودیت تغییرشکل جانبی در استاندارد ۲۸۰۰ رعایت شده است).

قابها دارای عرض برابر ۴ متر و در تمام طبقات دارای بار مرده ۷۶۰ و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع هستند. اهمیت قابها از نوع متوسط طبق استاندارد ۲۸۰۰ فرض شده است. در فرآیند تحلیل و طراحی این قابها مقاومت مشخصه بتن برابر ۳۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته بتن برابر ۲۷۳۸۶ مگاپاسکال، کرنش متناظر با حداکثر مقاومت بتن برابر ۰/۰۰۲، کرنش نهایی بتن برابر ۰/۰۰۳، مقاومت جاری شدن فولاد ۳۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته فولاد برابر ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال فرض شده است. شمای

حال با مراجعه به جزئیات معرفی شده برای سطوح مختلف عملکردی در مراجعی چون FEMA273 و ATC40، می‌توان به طور تقریبی سطح عملکردی  $OP^2$  را متناظر با خسارت ناچیز پارک، سطح عملکردی  $IO^2$  را متناظر با خسارت ناچیز و کم معرفی شده توسط پارک، سطح  $LS^4$  را متناظر با خسارت متوسط و سطح  $CP^5$  را متناظر با خسارت شدید و بالاتر در شاخص پارک در نظر گرفت.

#### ۳-۲- شاخص خسارت تغییر شکل جانبی

این شاخص از مشهورترین شاخصها در دسته شاخصهای کلی سازه می‌باشد که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$DI_{Drift} = \frac{4_m}{H} \quad (2)$$

که در این رابطه:  $4_m$  ماکزیمم تغییرمکان بام (متناظر با نقطه عملکرد) و  $H$  ارتفاع سازه می‌باشد. در تحقیق حاضر این شاخص با استفاده از تحلیل بارافزون قابل محاسبه و با نتایج خسارت پارک و انگ (دینامیکی) مقایسه می‌گردد.

#### ۳-۳- شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک

این شاخص توسط پاول و همکاران [۱۳] پیشنهاد گردید و جزء شاخصهای محلی<sup>۶</sup> و غیرتجمعی محسوب می‌شود که به دلیل ماهیت ساده آن، جزء شاخصهای محبوب در میان محققین و مهندسان محسوب می‌گردد. پیشنهاد این تحقیق، به کار بردن این شاخص به صورت کلی<sup>۷</sup> و متناسب با منحنی ظرفیت کل سازه در تحلیل بارافزون، مطابق رابطه (۳) محاسبه و با شاخص پارک و انگ (دینامیکی) مقایسه می‌گردد:

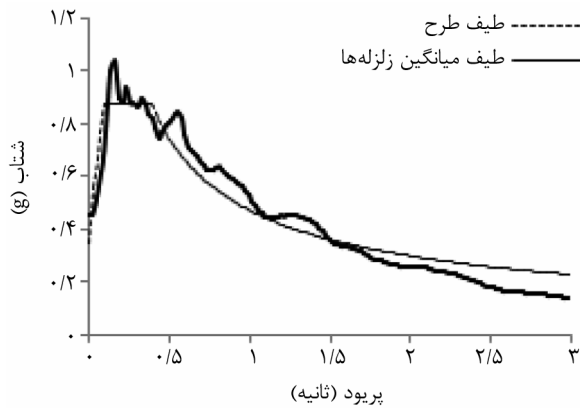
$$DI_{\mu} = \frac{u_{max} - u_y}{u_{mon} - u_y} \quad (3)$$

که در این رابطه:  $u_{max}$  تغییرمکان ماکزیمم،  $u_y$  تغییرمکان تسلیم و  $u_{mon}$  تغییرمکان نهایی قابل تحمل می‌باشند. روند محاسبه این شاخص در این تحقیق به این شکل است که، تغییرمکان ماکزیمم، متناظر با تغییرمکان نقطه عملکرد و تغییرمکان نهایی، متناظر با نقطه نهایی در منحنی ظرفیت و تغییرمکان تسلیم با توجه به روش مربوط به تساوی انرژیها،

انتخاب و مطابق با ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس شده‌اند که طیف میانگین حاصل از آنها در بازه ۰/۰۳ تا ۲/۴ ثانیه که بنا بر استاندارد ۲۸۰۰، محدوده حائز اهمیت برای قابهای طراحی شده در این تحقیق می‌باشد (محدوده مابین 0.2T و 1.5T)، کمترین اختلاف را با ۱/۴ برابر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ داشته باشد. مشخصات مربوط به این رکوردها و طیف میانگین حاصل از آنها به ترتیب در جدول (۳) و شکل (۴) نمایش داده شده‌اند.

جدول (۳): مشخصات کلی زلزله‌ها.

| شماره زلزله | نام زلزله    | ایستگاه | مؤلفه (درجه) | ماکزیمم شتاب (g) |
|-------------|--------------|---------|--------------|------------------|
| ۱           | امپریال والی | ۲۸۶     | ۱۳۵          | ۰/۱۹۵            |
| ۲           | لندرز        | ۲۱۰۸۱   | ۹۰           | ۰/۱۴۶            |
| ۳           | لوما پریتا   | ۵۸۱۳۱   | ۲۷۰          | ۰/۰۶             |
| ۴           | لوما پریتا   | ۵۸۱۵۱   | ۹۰           | ۰/۰۹             |
| ۵           | لوما پریتا   | ۵۸۳۳۸   | ۴۵           | ۰/۰۸۴            |
| ۶           | نورثریج      | ۲۳۵۹۰   | ۹۰           | ۰/۰۵۶            |
| ۷           | نورثریج      | ۹۰۰۱۹   | ۱۸۰          | ۰/۲۵۶            |

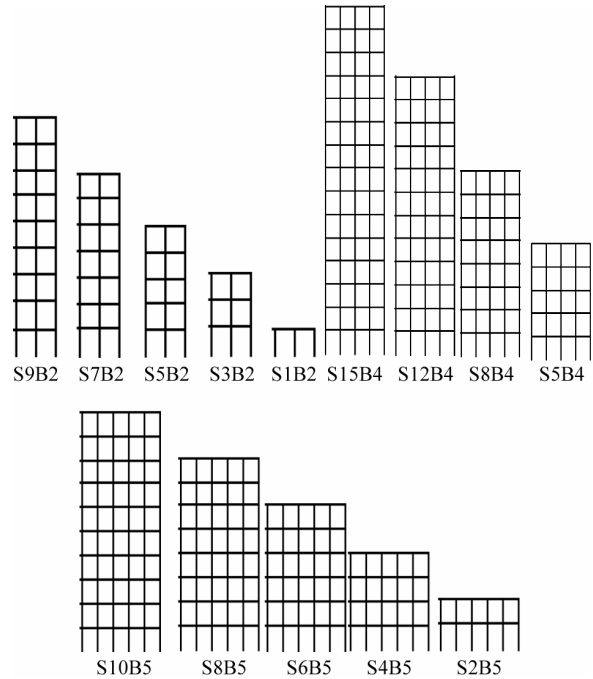


شکل (۴): طیف میانگین و ۱/۴ برابر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰.

## ۶- مطالعه عددی

در این بخش، ابتدا به مقایسه شاخصهای خسارت پارک و انگ و شاخص تغییرشکل جانبی و سپس به ارزیابی شاخص پیشنهادی این تحقیق پرداخته خواهد شد. به این منظور، قابهای مورد نظر، مدلسازی شده و تحلیل‌های بارافزون و دینامیکی غیرخطی بر روی مدل‌ها انجام می‌گیرد. تحلیل بارافزون در این تحقیق با استفاده از

کلی این قابها در شکل (۳) و جزئیات مربوط به طراحی آنها در جدول (۲) آمده است.



شکل (۳): نمای قابهای مورد مطالعه.

جدول (۲): مشخصات کلی قابهای مورد مطالعه.

| شماره قاب | ارتفاع کل (متر) | پریود سازه | برش پایه (کیلونیوتن) |
|-----------|-----------------|------------|----------------------|
| S5B4      | ۱۶              | ۰/۵۶       | ۱۵۹/۸                |
| S8B4      | ۲۵/۶            | ۰/۷۹       | ۲۰۲/۱                |
| S12B4     | ۳۸/۴            | ۱/۰۷       | ۲۴۷/۶                |
| S15B4     | ۴۸              | ۱/۲۷       | ۲۷۶/۸                |
| S2B5      | ۶/۴             | ۰/۲۸       | ۱۱۴/۱                |
| S4B5      | ۱۲/۸            | ۰/۴۷       | ۱۷۳/۵                |
| S6B5      | ۱۹/۲            | ۰/۶۴       | ۲۱۵/۲                |
| S8B5      | ۲۵/۶            | ۰/۷۹       | ۲۴۸/۳                |
| S10B5     | ۳۲              | ۰/۹۴۱      | ۲۷۷/۷۶               |
| S1B2      | ۳/۲             | ۰/۱۶۷      | ۲۲/۸۳                |
| S3B2      | ۹/۶             | ۰/۳۸       | ۷۳                   |
| S5B2      | ۱۶              | ۰/۵۶       | ۹۴/۳                 |
| S7B2      | ۲۲/۴            | ۰/۷۲       | ۱۱۱/۸۲               |
| S9B2      | ۲۸/۸            | ۰/۸۷       | ۱۰۵/۵۲               |

## ۵- انتخاب زلزله‌ها

در این تحقیق، هفت رکورد زلزله از مجموعه رکوردهای موجود در FEMA440 [۱۶] متناسب با مشخصات ژئوتکنیکی بستر سنگی و دارای فاصله از گسل، به گونه‌ای

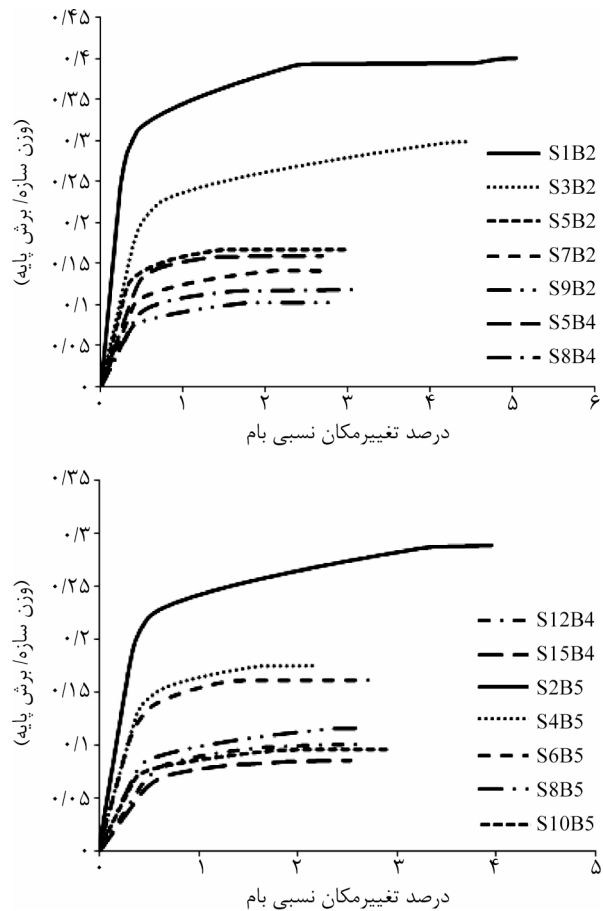
ادامه، به منظور محاسبه شاخصهای خسارت در حالت دینامیکی، رکوردهای سازگار موجود، با طیفهای به مقیاس در آمده، سازگار و به انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی قابها پرداخته شد. متناظر با هر خسارت محاسبه شده در نقاط عملکرد در تحلیل بارافزون، با میانگین گرفتن از نتایج مربوط به هفت زلزله سازگار شده با طیف به مقیاس در آمده، خسارت مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی محاسبه گردید. در شکلهای ارائه شده در این بخش، نقاط مثلثی شکل مربوط به خسارت متناظر با طیف میانگین در شکل (۴) و متناظر با زلزله طراحی استاندارد ۲۸۰۰ می باشند. همچنین نقاط دایره شکل متناظر با ۱/۵ برابر طیف میانگین در این شکل می باشند که به صورت تقریبی، می تواند متناظر با سطح خطر *M.E.* در *ATC40* باشد که به صورت حداکثر زلزله ای که از یک منطقه با شرایط زمین شناسی معین انتظار می رود، تعریف می شود. به صورت احتمالاتی زلزله حداکثر بیانگر سطحی از لرزه های زمین است که احتمال وقوع آن در ۵۰ سال برابر ۵ درصد باشد. اگرچه تعیین این سطح نیاز به بررسیهای بیشتری دارد اما با مراجعه به مرجع [۲]، این سطح تقریباً ۱/۲۵ تا ۱/۵ برابر طیف سطح طراحی می باشد که با توجه به این موضوع، به منظور بیان تخمینی نسبی از خسارات در این سطح، بیشترین حد این تقریب یعنی ۱/۵ برابر طیف میانگین، انتخاب گردیده است و سایر نقاط با مربع مشخص شده اند. از این پس در این تحقیق از این نقاط با ذکر شکل سخن گفته می شود.

#### ۶-۱- مقایسه شاخص خسارت پارک و انگ با شاخص تغییر شکل جانبی

در این بخش، به مقایسه شاخص خسارت پارک و انگ در تحلیل دینامیکی و شاخص خسارت تغییر شکل جانبی در تحلیل بارافزون پرداخته شده است که نتایج آن در شکل (۶) نمایش داده شده است.

همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود، این دو معیار دارای پراکندگی زیادی، نسبت به هم می باشند. از این نکته چنین نتیجه گیری می شود که معیار جابه جایی نسبی

الگوی بارگذاری توانی موجود در مرجع [۱] انجام شده است که نمودار برش پایه- تغییر مکان بام قابهای مورد نظر، در شکل (۵) نمایش داده شده است. برای انجام کلیه تحلیل ها، از نرم افزار *IDARC V6.1* استفاده شده که نرم افزاری بسیار قدرتمند در تحلیل سازه های بتن مسلح می باشد [۱۷].



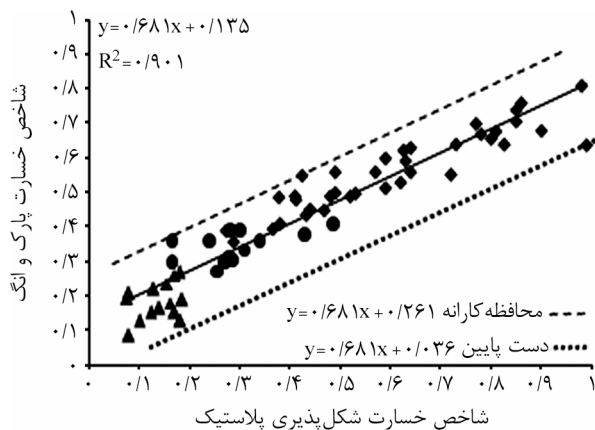
شکل (۵): منحنی برش پایه-تغییر مکان بام قابها.

جهت محاسبه شاخصهای خسارت در تحلیل بارافزون، ابتدا نقطه عملکرد سازه با روش طیف ظرفیت، تعیین شده و سپس مقادیر این شاخصها در نقطه عملکرد سازه محاسبه گردیدند. در ادامه به منظور اینکه ارتباط میان شاخصهای بیان شده در سطح وسیعی تعیین گردد، برای هر یک از قابها، پنج نقطه عملکرد محاسبه گردید که به ترتیب مربوط به طیف پاسخ میانگین نمایش داده شده در شکل (۴) و طیفهایی که با ضرائب ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ برابر طیف اولیه به مقیاس در می آیند، می باشد. سپس مقادیر شاخصهای خسارت در این نقاط محاسبه می گردند. در

نسبی از ۰/۶۷۳ تا ۱/۲۵ و برای نقاط دایره شکل از ۰/۹۱۵ تا ۲/۱ می‌باشد که با توجه به مشخصات سطوح عملکردی تعریف شده در مرجع [۱] بر اساس مقادیر این معیار، نشان از عملکرد مناسب سازه‌ها دارد. از دیگر نکات قابل تأمل در این اشکال، می‌توان به این نکته اشاره کرد که تا حدود جابه‌جایی نسبی ۱/۷٪، مقادیر شاخص پارک و انگ کمتر از مقدار ۰/۴ که مرز سطوح خسارت تعمیرپذیری و تعمیرناپذیری است.

## ۶-۲- مقایسه شاخص خسارت پارک و انگ با شاخص شکل پذیری پلاستیک

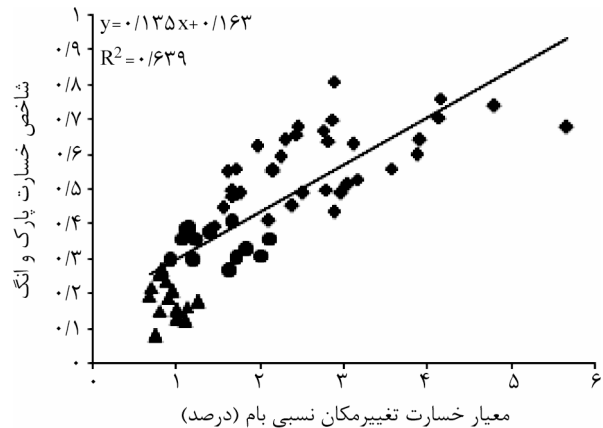
در این بخش، مقادیر شاخص خسارت پارک و انگ در تحلیل دینامیکی، با مقادیر شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک که در بخش ۳-۳ معرفی گردید، مقایسه و نتایج مربوط به آن در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل (۷): مقایسه شاخص خسارت پارک و انگ و شاخص شکل‌پذیری پلاستیک با درون‌یابی خطی.

از نکات قابل توجه در این شکلها می‌توان به پراکندگی کمتر نقاط نسبت به معیار جابه‌جایی نسبی اشاره نمود که سبب می‌شود بتوان با استفاده از روابط ارائه شده، با دقت مناسبی، مقادیر شاخص خسارت پارک و انگ (دینامیکی) را از مقادیر شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک (استاتیکی)، استخراج نمود. همچنین در این شاخص نقاط دور از تراکم کمتری نسبت به جابه‌جایی نسبی وجود دارند. از دیگر نکات قابل مشاهده در این منحنی، می‌توان

می‌تواند شاخص مناسبی برای سنجش عملکرد سازه باشد. علت این موضوع را می‌توان با لحاظ نکردن ظرفیت نهایی سازه در این شاخص، مرتبط دانست. چرا که در این معیار فقط به میزان تغییر مکان جانبی بام توجه شده و ظرفیت کلی سازه در تحمل این تغییر مکان لحاظ نمی‌گردد.



شکل (۶): مقایسه شاخص خسارت پارک و انگ و جابه‌جایی نسبی بام با درون‌یابی خطی.

با توجه به نقاط مثلث شکل که متناظر با طیف طراحی می‌باشند و معرف سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال می‌باشد، مشاهده می‌شود که مقادیر شاخص خسارت پارک، از ۰/۰۸۴۱ تا ۰/۲۷ متغیر است. با رجوع به جدول (۱)، این بازه تغییرات، معرف وضعیتهای بدون خسارت و خسارت اندک می‌باشد که با توجه به مشخصات سطوح عملکردی معرفی شده، می‌تواند سطح عملکردی  $OP$  و  $IO$  تلقی گردد. این موضوع نشان از عملکرد مناسب آیین‌نامه آبا و استاندارد ۲۸۰۰ در محدود نمودن خسارت وارد بر سازه‌های طراحی شده با استفاده از ضوابط این آیین‌نامه‌ها و عملکرد دست بالای آنها دارد. همچنین با مراجعه به نقاط کروی که معرف سطح خطر ۵ درصد در ۵۰ سال می‌باشد، مشاهده می‌شود که بازه تغییرات این نقاط از ۰/۲۷ تا ۰/۴۲ می‌باشد که با مراجعه به جدول (۱)، نشان‌دهنده سطح خسارت متوسط و با مراجعه به سطوح عملکردی، می‌تواند معرف سطح عملکردی  $LS$  باشد. این موضوع باز هم نشان از عملکرد مناسب آیین‌نامه آبا و استاندارد ۲۸۰۰ دارد. نتایج نشان می‌دهند که برای نقاط مثلثی، بازه تغییرات جابه‌جایی

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا به ارزیابی معیار جابه‌جایی نسبی پرداخته شد. نتایج حاکی از این نکته است که استفاده از معیار تغییرشکل جانبی بام، به عنوان شاخص خرابی سازه‌ها، چندان مناسب نیست. مقایسه شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک در تحلیل بارافزون و شاخص خسارت پارک و انگ در تحلیل دینامیکی، حاکی از عملکرد مناسبتر شاخص شکل‌پذیری نسبت به معیار جابه‌جایی نسبی می‌باشد. همچنین با استفاده از نتایج تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی انجام گرفته و مقایسه آنها، روابطی برای تخمین مقدار شاخص دینامیکی بر حسب نتایج استاتیکی استخراج شدند که این امکان را می‌دهد تا بدون انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، بتوان میزان خسارت وارد بر سازه را، با انجام تحلیل بار افزون، به دست آورد. ارزیابی خسارت وارد بر سازه‌های طراحی شده بر مبنای آیین‌نامه آبا و استاندارد ۲۸۰۰ ایران نشان داد که در زلزله سطح طراحی استاندارد ۲۸۰۰ و سطح خطر *M.E.* در *ATC40* (احتمال وقوع ۵ درصد در ۵۰ سال)، آیین‌نامه آبا و استاندارد ۲۸۰۰ ایران در محدود نمودن خسارت وارد بر سازه‌ها، عملکرد مناسبی در سطح عملکرد ایمنی جانی دارند.

## ۸- مراجع

1. Federal Emergency Management Agency, FEMA273 (1997). NEHRP guideline for the seismic rehabilitation of building, Building Seismic Safety Council, Washington DC.
2. Applied Technology Council, ATC40 (1997). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, California Seismic Safety Commission.
3. حبیبی، علیرضا، محرمی، حمید و تسنیمی، عباسعلی (۱۳۸۵). ارزیابی عملکرد لرزه‌های قابهای خمشی بتن مسلح با استفاده از اندیس خسارت سختی، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۵، صفحه ۷۰۱.
4. Park, Y.J. and Ang, A.H.S. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **111**(4),

به محدوده تغییرات این شاخص متناظر با نقاط مثلثی و دایروی اشاره نمود که به ترتیب برابر با بازه تغییرات ۰/۰۷۶ تا ۰/۱۸۵ برای نقاط مثلثی و ۰/۱۶۵ تا ۰/۴۸۷ برای نقاط دایروی می‌باشد. همچنین، همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، علاوه بر خط درون‌یابی (طرح بهین)، دو خط به نامهای خطوط محافظه‌کارانه و دست پایین ارائه شده است که با توجه به مناسب بودن نتایج شاخص شکل‌پذیری پلاستیک و انطباق آن با شاخص پارک، می‌توان از روابط ارائه شده، به منظور پیش‌بینی میزان خسارت محتمل در سطوح نیاز متفاوت و برای سطوح عملکردی مختلف استفاده نمود. در ضمن می‌توان با استفاده از حدود ارائه شده توسط پارک برای سطوح خسارت، مرز میزان خسارت استاتیکی متناظر با هر سطح خسارت را، برای یک طرح دست بالا به دست آورد و بدون انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از ایمن بودن طرح اطمینان حاصل کرد.

حال چنانچه هدف ارائه جدولی مانند جدول (۱) برای معرفی سطوح خسارت قابل انتظار متناظر با مقادیر جابه‌جایی نسبی و شکل‌پذیری باشد، با مراجعه به شکل‌های (۶) و (۷)، می‌توان جدولی را به صورت جدول (۴)، تهیه نمود. این جدول در تعیین سطح عملکرد و خسارت یک قاب بتنی تنها بر اساس نتایج تحلیل بار افزون، می‌تواند بسیار مفید و مؤثر واقع شود.

**جدول (۴): سطوح مختلف خسارت، متناسب با مقادیر شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک و جابه‌جایی نسبی بام.**

| مقادیر جابه‌جایی نسبی بام (درصد) | مقادیر شاخص خسارت انرژی | جزئیات خسارت                            |
|----------------------------------|-------------------------|---|
| $D < 0.067$                      | $D < 0.076$             | بدون خسارت: وجود ترک با تعداد کم و کوچک |
| $0.067 < D < 0.115$              | $0.076 < D < 0.165$     | خسارت اندک: ترک کوچک در طول عضو         |
| $0.115 < D < 0.18$               | $0.165 < D < 0.38$      | خسارت متوسط: ترک شدید و وجود شکاف       |
| $D < 0.18$                       | $0.38 < D < 1$          | خسارت شدید: پکیدن بتن و ظاهر شدن فولاد  |



- systems, Report No. PEER-1999/02, Berkeley (CA): Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
13. Powell, H., Graham, R., and Allahabadi, R. (1988). Seismic damage prediction by deterministic methods: Concepts and Procedures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**, 719-734.
۱۴. سلیمی، محمد (۱۳۸۳). تحلیل غیرخطی قابهای خمشی بتن مسلح با تأکید بر اثر محصورشدگی بتن بر ضریب رفتار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
۱۵. ایزدپناه، مهدی (۱۳۸۸). ارزیابی یک معیار ساده و مؤثر برای تخمین خسارت قابهای خمشی بتن مسلح، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان.
16. FEMA440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC (2005).
17. Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath. S.K., Li, C., and Madan, A. (1996). IDARC version 4.0: a program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures, Technical Report NCEER-96-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY.
- 722-739.
5. Bracci, J.M., Reinhorn, A.M., Mander, J.B., and Kunnath, S.K. (1989). Deterministic model for seismic damage evaluation of RC structures, Technical Report NCCEER-89-0033, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY.
6. Cakmak, A.S. and Dipasquale, E. (1998). Identification of the serviceability limit state and detection of seismic structure damage, Report NCEER-88-0022, National Center for Earthquake Engineering Research. State University of New York at Buffalo, NY.
7. Cakmak, A.S. and Dipasquale, E. (1989). On the relation between local and global damage indices, Technical Report NCEER-89-0034, State University of New York at Buffalo, NY.
8. Cakmak, A.S. and Dipasquale, E. (1988). Identification of the serviceability limit state and detection of seismic structure damage. Report NCEER-88-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY.
9. Usami, T. and Kumar, S. (1998). Inelastic seismic design verification method for steel bridge piers using a damage index based hysteretic model, *Engineering Structures*, **20**, 472-480.
10. Ghobarah, A., Abou-Elfath, H., and Biddah, A. (1999). Response-based damage assessment of structures, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **28**, 79-104.
11. Zhang, X., Wong, K., and Wang, Y. (2007). Performance assessment of moment resisting during earthquakes based on the force analogy method, *Engineering Structures*, **29**, 2792-2802.
12. Chopra, A.K. and Goel, R.K. (1999). Capacity-demand-diagram-methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF

## ۹- پانویس

- ۱- Acceleration Displacement Response Spectrum  
 ۲- Operational  
 ۳- Immediately Occupancy  
 ۴- Life Safety  
 ۵- Collapse Prevention  
 ۶- Local  
 ۷- Global

