



# تحلیل خسارت قاب‌های خمشی فولادی به روش بار افزون

علیرضا حبیبی<sup>۱</sup>، سید محمد امیدوار<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۹/۱۱/۲۱، پذیرش ۹۱/۶/۶)

## چکیده

شاخص‌های خسارت زیادی در سالهای اخیر جهت تخمین خسارت وارد بر سازه تحت اثر زمین لرزه، توسعه یافته‌اند که اغلب از پارامترهای متفاوت برای ارزیابی خسارت سازه استفاده می‌کنند. هدف از این تحقیق، توسعه یک روش جدید بر اساس نتایج روش بار افزون جهت ارزیابی خسارت سازه‌های فولادی می‌باشد. به این منظور چندین قاب خمشی در نظر گرفته می‌شود و تحلیل خسارت غیر ارتجاعی تحت اثر رکوردهای مختلف زمین لرزه، بر روی آنها انجام می‌شود. سپس بر روی همه‌ی قاب‌ها تحلیل استاتیکی غیر خطی (تحلیل بار افزون) انجام می‌شود و نقاط عملکردی با استفاده از روش طیف ظرفیت تعیین می‌شوند. با داشتن نقاط عملکرد، مقادیر شاخص‌های خسارت استاتیکی در این نقاط محاسبه می‌گردند. با بررسی رابطه بین شاخص‌های خسارت پیشنهادی در تحلیل استاتیکی غیر خطی و خسارت در تحلیل دینامیکی غیر خطی، معادلاتی برای تخمین خسارت وارد بر سازه براساس نتایج تحلیل بارافزون ارائه می‌شوند. به منظور ارائه یک روش موثر در تعیین وضعیت خسارت (عملکرد) سازه بوسیله معیار پیشنهادی، جدولی ارائه می‌شود.

## کلمات کلیدی

شاخص خسارت، قاب‌های خمشی فولادی، تحلیل بار افزون، تحلیل دینامیکی غیر خطی

## Damage Analysis of Steel Moment Frames Using Pushover Method

Alireza Habibi, Mohamad Omidvar

### ABSTRACT

To estimate amount of damage to structure subjected to an earthquake, various damage indices have been developed in recent years. Results of dynamic analysis are usually used to evaluate damage to structure in these indices. The objective of this study is to develop a new method to evaluate damage to steel structures based on the results of pushover analysis. For this purpose, several steel moment resisting frames are considered and inelastic damage analysis is performed on them subjected to various earthquake records. Then nonlinear static analysis (pushover analysis) is performed on all the frames and performance points are determined using the capacity spectrum method. By having the performance points, the static damages are computed at these points. By evaluation correlation between the damage index in nonlinear dynamic analysis and the damage indices in pushover analysis, some equations are present to estimate the damage to structure based on pushover results. In order to present an effective procedure in determining the structural damage by using proposed criterion, a table is presented.

### Key words

Damage Index, Steel Moment Frame, Pushover Analysis, Nonlinear Dynamic Analysis

۱. استادیار گروه عمران، دانشگاه کردستان، ar.habibi@uok.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه کردستان، mo\_str\_eng@yahoo.com



سازه‌ها، یک روش ارزیابی خسارت ابداع کردند [۲]. پاول و الله‌آبادی خسارت سازه را مطابق رابطه ۱، بر اساس شکل‌پذیری پلاستیک معرفی کردند. این شاخص برای یک المان تعریف می‌شود و بوسیله روشهای وزنی، می‌توان آن را به عنوان شاخص طبقه و خسارت کل سازه نیز استفاده نمود [۳].

$$DI_{\mu} = \frac{u_{\max} - u_y}{u_{\text{mon}} - u_y} = \frac{\mu - 1}{\mu_{\text{mon}} - 1} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $DI_{\mu}$  اندیس خسارت شکل‌پذیری،  $u_{\max}$  تغییر مکان حداکثر،  $u_y$  تغییر مکان تسلیم،  $u_{\text{mon}}$  تغییر مکان نهایی،  $\mu$  ضریب شکل‌پذیری و  $\mu_{\text{mon}}$  ضریب شکل‌پذیری نهایی می‌باشد. شاخص آسیب‌پذیری دیگری توسط تعدادی از محققین ارائه شد که از سختی قبل و بعد از زلزله استفاده می‌کند. اوتانی و سوزن در آزمایش قاب‌های چند طبقه مشاهده کردند که اگر سازه در آزمایش اول در اثر زلزله شدیدی متحمل تسلیم بعضی از اعضا شود، تغییر مکان حداکثر بام در آزمایش اول و دوم بر روی این قاب برای زلزله خاصی مقادیر یکسانی دارد اما سختی سازه با افزایش تعداد بارگذاری‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر خسارت وارده به سازه در آزمایش دوم بیشتر از خسارت وارده به آن در آزمایش اول است [۴]. کلمبو و نگرو با بررسی منحنی‌های هیستریزس مصالح مختلف، علت اصلی در خسارت دیدن سازه‌ها با مصالح مختلف را در کاهش مقاومت دانستند [۵]. این محققین در ارائه شاخص خود، این پدیده را مد نظر قرار دادند و در ضمن شاخصی عمومی برای کلیه سازه‌ها، مستقل از نوع مصالح ارائه دادند و نتایج عددی حاصل از شاخص خود را با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. این شاخص بصورت رابطه ۲ می‌باشد.

$$D = 1 - \frac{M_{ac}}{M_{y0}} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $D$  شاخص خسارت،  $M_{ac}$  لنگر تسلیم کاهش‌یافته و  $M_{y0}$  لنگر تسلیم کاهش نیافته می‌باشد. در سال ۱۹۸۴ پارک و همکارانش با ارائه شاخص خسارت که اثر تغییر شکل بارهای رفت و برگشتی را در نظر می‌گیرد،

شاخص‌های خسارت مختلفی در سالهای اخیر جهت پیش بینی میزان خسارت وار بر سازه در اثر زلزله، معرفی شده‌اند که هر کدام از آنها پارامترهای متفاوتی را برای مدل خسارت ساختمان بکار می‌گیرند. پارامترهای مختلفی که در محاسبه شاخص خسارت استفاده می‌شوند، شامل تغییر شکل پلاستیک، انرژی تلف شده عضو، خستگی چرخه‌ای و تغییرات در پارامترهای دینامیکی سازه مانند پریود طبیعی آن، می‌باشند. شاخص‌های خسارت اغلب به گونه‌ای نرمال می‌شوند که به ازای مقدار صفر هیچ خسارتی به سازه وارد نشده و به ازای مقدار ۱ شکست یا انهدام کلی سازه اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر شاخص خسارت در واقع یک کمیت عددی برای ارزیابی میزان خسارت وارده بر سازه می‌باشد. همچنین در یک شاخص خسارت ممکن است ترکیبی از یک یا چند پارامتر برای محاسبه آن استفاده شود. شاخص‌های خسارت آسیب‌پذیری ممکن است به صورت محلی (فقط برای یک عضو) یا بصورت کلی (برای کل سازه) تعریف شوند. اکثر شاخص‌های محلی آسیب‌پذیری، طبیعتی تجمعی دارند که وابستگی خسارت به دامنه و تعداد نوسان‌های بارگذاری را منعکس می‌کنند. از معایب اصلی بیشتر شاخص‌های محلی، نیاز به هماهنگ کردن ضرایب برای انواع سازه‌ها و فقدان مقیاسی مناسب برای درجات مختلف خسارت می‌باشد [۱]. شاخص کلی خسارت را می‌توان با میانگین‌گیری شاخص‌های محلی خسارت در کل سازه بدست آورد یا با مقایسه خواص مدی سازه قبل و بعد زلزله یا در حین زلزله محاسبه کرد. فعالیت‌های آسیب‌پذیری از دهه هفتاد با ارائه مدل‌های غیر خطی آغاز شد. تحقیقات زیادی در این خصوص انجام شده است که ذیلاً به تعدادی از مهمترین آنها اشاره می‌گردد.

در سال ۱۹۷۷ برترو و برسلر تعاریفی برای خسارت‌پذیری موضعی، خسارت‌پذیری کلی و خسارت‌پذیری تجمعی ساختمان‌ها ارائه کردند. این محققین در سال ۱۹۷۹ با استفاده از روش تحلیل استاتیکی



توابع آسیب‌پذیری را کامل کردند [۶]. در سال ۱۹۸۸ بایک مدل خود را برای ارزیابی خسارت قاب‌های فولادی در طول ارتفاع پیشنهاد داد [۷]. در این مدل تغییرشکل پلاستیک طبقات به عنوان معیار خسارت در نظر گرفته شده است و خسارت تجمعی بعد از N سیکل از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$D_i = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\Delta \delta_{pi}}{\delta_y} \right]^c \quad (3)$$

که در آن،  $D_i$  پارامتر خسارت تجمعی در طبقه i ام،  $\delta_{pi}$  تغییرشکل پلاستیک در سیکل i ام،  $\delta_y$  تغییرشکل تسلیم و C پارامتر بزرگی تغییرشکل پلاستیک می‌باشد. مطالعه تحقیقات انجام یافته قبلی در زمینه تخمین خسارت سازه‌ها، نشان می‌دهد که اغلب اندیس‌های خسارت توسعه یافته مبتنی بر نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی هستند. امروزه تحلیل بار افزون به عنوان روشی که می‌تواند ظرفیت سازه را مدل سازی کند و همچنین پیچیدگی بسیار تحلیل دینامیکی غیر خطی را ندارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به ارائه‌ی معیارهایی ساده و موثر برای ارزیابی میزان خسارت وارد بر سازه بر اساس تحلیل بار افزون پرداخته می‌شود. به این منظور با در نظر گرفتن تعدادی قاب خمشی فولادی، تحلیل خسارت تحت اثر چندین رکورد زلزله بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی انجام می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل با نتایج حاصل از خسارت‌های پیشنهادی بر اساس روش بار افزون رابطه بین آنها تعیین می‌شود. در این راستا، معادلاتی جهت تخمین و پیش‌بینی خسارت وارد بر سازه ارائه می‌شوند. همچنین جدولی بر اساس معیارهای خسارت پیشنهادی تحقیق، جهت شناسایی سطوح خسارت و عملکرد سازه پیشنهاد می‌شود که می‌تواند بصورت موثر در عمل مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- روش پیشنهادی تحقیق

به منظور توسعه روش پیشنهادی تحقیق، ابتدا تحلیل خسارت به دو روش استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی بر روی سازه‌های مختلف تحت اثر چندین رکورد

زلزله انجام می‌شود. سپس رابطه‌ی بین خسارت‌های استاتیکی و خسارت دینامیکی تعیین شده و معادلاتی جهت تخمین خسارت وارد بر سازه بر اساس نتایج تحلیل بار افزون، ارائه می‌شوند. در این راستا لازم است ابتدا عملکرد سازه‌ها تعیین شود و سپس تحلیل خسارت در سطوح عملکردی مختلف انجام پذیرد. در ادامه نحوه تعیین عملکرد و شاخص‌های خسارت بکار رفته تشریح می‌گردد.

## ۲-۱- سطوح عملکرد

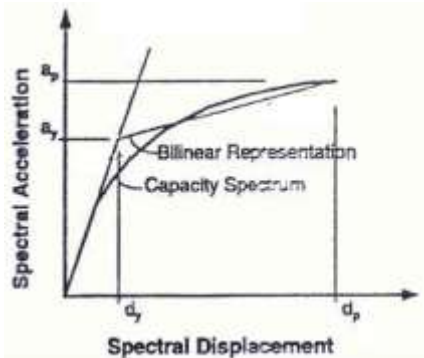
یک سطح عملکرد بیانگر محدوده‌ای از تخریب است که برای یک ساختمان مشخص و زلزله معین مناسب باشد. سطوح عملکردی برای اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای به صورت مجزا تعیین می‌شوند. بر اساس دستورالعمل FEMA273 [۸] برای اجزای سازه‌ای ۵ سطح عملکرد در نظر گرفته شده است که ۲ سطح بصورت میانی و ۳ سطح بصورت اصلی می‌باشد. در این تحقیق شاخص‌های خسارت بر اساس تحلیل بارافزون با سطوح عملکرد اصلی مقایسه می‌شود. سطوح عملکرد کلی ساختمان بصورت زیر تعریف می‌شوند:

۱- سطح عملکرد (OP): سطح عملکردی است که در آن ساختمان هیچ صدمه‌ای نمی‌بیند و یا کمترین آسیب به اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای وارد می‌شود. در این حالت ساختمان برای استفاده و بهره برداری طبیعی مناسب است.

۲- سطح عملکرد قابلیت استفاده بدون وقفه (IO): در این سطح عملکرد خسارت زیاد به اعضای سازه‌ای وارد نمی‌شود و این اعضا تقریباً تمام مقاومت و سختی پیش از زلزله خود را دارا هستند. اجزای غیرسازه‌ای ایمن هستند و کارایی خود را دارند. ساختمان برای اهداف مورد نظر قابل استفاده می‌باشند.

۳- سطح عملکرد ایمنی جانی (LS): در این سطح عملکرد خسارت قابل توجه و افت اساسی در سختی اعضای سازه‌ای پدید آمده، لیکن هنوز حاشیه امنی تا فرو ریزش باقی است. ممکن است امکان استفاده از ساختمان قبل از تعمیر وجود نداشته باشد.

شوند. با استفاده از این تساوی نقطه‌ی تسلیم مربوطه مشخص می‌شود و با داشتن این نقطه می‌توان کلیه اطلاعات نامبرده برای هر نقطه از منحنی ظرفیت را مشخص نمود.



شکل (۲): منحنی ظرفیت و منحنی دوخطی معادل

برای کاهش طیف پاسخ زلزله، باید میرایی غیرخطی سازه تخمین زده شود. میرایی‌ای که در هنگام وقوع زلزله در سازه در محدوده غیر الاستیک رخ می‌دهد، ترکیبی از میرایی ویسکوالاستیک و میرایی چرخه‌ای (هیسترتیک) است. میرایی ویسکوالاستیک، میرایی ذاتی سازه است که برابر ۵ درصد فرض می‌شود. میرایی چرخه‌ای به مساحت داخل چرخه‌ای که با ترسیم نیروی رفت و برگشتی زلزله (برش پایه) در مقابل تغییر مکان سازه بدست می‌آید، مربوط می‌شود. بر این اساس، دستورالعمل ATC40 با استفاده از مدل دو خطی منحنی ظرفیت، استفاده از میرایی موثر مطابق رابطه‌ی زیر را جهت تعیین طیف نیاز کاهش یافته پیشنهاد می‌دهد:

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{63.7k_h(a_y d_p - a_p d_y)}{a_p d_p} + 5 \quad (4)$$

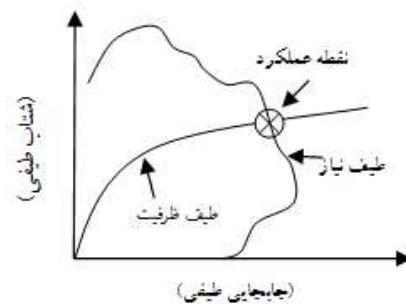
که در آن، ضریب  $k_h$  برای تبدیل نمودار چرخه‌ای ایده‌آل ساختمان به یک متوازی‌الاضلاع بکار رفته است [۹]. بقیه‌ی پارامترهای به کار رفته در رابطه‌ی (۴) در شکل (۲) تعریف شده است. ضرایب کاهش طیف پاسخ شامل ضریب کاهش طیفی در محدوده شتاب ثابت و ضریب کاهش طیفی در محدوده سرعت ثابت، بترتیب از معادلات ۵ و ۶ تعیین می‌شوند. نحوه اعمال کاهش طیف با این ضرایب در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۴- سطح عملکرد آستانه فروریزش (CP): در این سطح عملکرد، خسارت زیادی به اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای وارد آمده است. مقاومت و سختی اعضای سازه‌ای بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است و خطر فروریزش قطعات وجود دارد.

جهت تعیین عملکرد سازه که مبنای ارزیابی خسارت وارده قرار خواهد گرفت، از روش طیف ظرفیت، ارائه شده در مرجع [۹]، استفاده می‌شود که ذیلاً تشریح می‌گردد.

در این روش نقطه‌ی عملکرد، مطابق با شکل (۱)، باید دو شرط زیر را همزمان ارضا کند:

۱. نقطه باید روی طیف ظرفیت قرار گیرد.
۲. نقطه باید روی طیف تقاضای غیرخطی قرار گیرد.



شکل (۱): نقطه‌ی عملکرد در روش طیف ظرفیت

بدین منظور لازم است تا منحنی نیاز و ظرفیت در دستگاه واحد شتاب طیفی در مقابل جابجایی طیفی موسوم به  $ADRS^1$  ترسیم شوند که بدین منظور، روابطی در مرجع [۹]، ارائه شده است. یکی از مهمترین مسائل در روش طیف ظرفیت تخمین میرایی مؤثر سازه در حالت غیرخطی و تهیه طیف نیاز کاهش یافته می‌باشد. هر نقطه روی منحنی ظرفیت دارای یک میرایی معادل، یک پریود معادل، یک شکل پذیری و یک نقطه‌ی تسلیم مشخص می‌باشد که برای تعیین این مشخصات، منحنی ظرفیت با یک منحنی دو خطی، مطابق با شکل (۲)، به گونه‌ای تقریب زده می‌شود که سطح زیر این دو منحنی تا نقطه‌ی مورد نظر که معرف انرژی جذب شده توسط سیستم است، با هم برابر

<sup>1</sup> Acceleration Displacement Response Spectrum



۷- توقف محاسبات در صورتیکه اختلاف تغییر مکان طیفی مربوط به نقاط عملکرد اصلاح شده و اولیه ناچیز باشد. در صورتیکه این اختلاف قابل صرف نظر کردن نباشد، نقطه‌ی عملکرد اصلاح شده به عنوان نقطه‌ی عملکرد اولیه در نظر گرفته شده و محاسبات از مرحله‌ی ۴ تکرار می‌شود.

## ۲-۲- تحلیل خسارت

در این تحقیق شاخص خسارت پارک و آنگک به عنوان شاخصی که مبنای ارزیابی و مقایسه با شاخص‌های خسارت استاتیکی قرار می‌گیرد، برای تعیین خسارت سازه‌های مورد مطالعه با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی بکار می‌رود. شاخص‌های خسارت استاتیکی مورد بررسی شامل خسارت شکل پذیری پلاستیک، شاخص خسارت سختی و شاخص تغییر مکان نسبی بام می‌باشد. در ادامه نحوه تعیین شاخص‌های خسارت مورد استفاده در تحقیق تشریح می‌گردد.

### ۲-۲-۱- شاخص خسارت پارک و آنگک

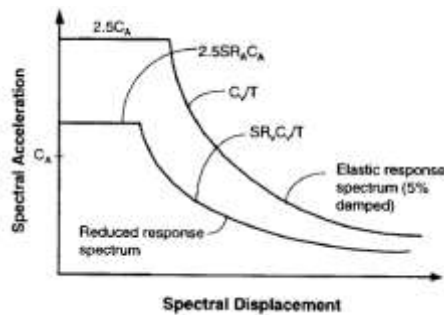
این شاخص توسط پارک و همکارانش در سال ۱۹۸۴ ارائه گردید [۶]. مزیت اصلی این مدل در سادگی آن و تناسب درجه‌بندی آن با خسارت مشاهده شده می‌باشد و از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{\phi_m - \phi_y}{\phi_u - \phi_y} + \beta \frac{\int dE}{M_y \phi_u} \quad (7)$$

در این رابطه  $O_m$  بیشترین انحنای تجربه شده در عضو،  $O_u$  انحنای نهایی عضو،  $O_y$  انحنای تسلیم عضو،  $M_y$  ممان تسلیم عضو،  $\int dE$  انرژی جذب شده در عضو به هنگام تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ و  $\beta$  ثابت مدل است. عبارت اول در رابطه ۷ معیار تغییر مکان استاتیکی است و خسارت تجمعی را در نظر نمی‌گیرد. عبارت دوم معیار انرژی جذب شده است و خسارت تجمعی را لحاظ می‌کند. اگر چه این شاخص برای المان‌های بتنی درجه-بندی شده است؛ به دلیل مفهوم فیزیکی روشن آن، هم برای المان‌های فولادی و هم برای المان‌های بتنی استفاده

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \times \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (5)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \times \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (6)$$



شکل ۳: طیف پاسخ کاهش یافته

تعیین نقطه‌ی عملکرد در روش طیف ظرفیت، عملیاتی با سعی و خطا می‌باشد و در این راستا روش‌های مختلفی در مراجع موجود می‌باشد. در استاندارد ATC40، سه روش برای تعیین نقطه‌ی عملکرد، تحت عنوان، روش A، B و C پیشنهاد شده است. روش‌های A و B روش‌هایی تحلیلی و روش C روشی گرافیکی می‌باشد که از دقت کمتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. در این تحقیق از روش A در تعیین نقاط عملکرد استفاده شده است. محاسبات مربوط به تعیین نقطه‌ی عملکرد با روش A را می‌توان در مراحل زیر خلاصه نمود:

۱- ترسیم طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۵٪ متناسب با محل رخداد زلزله

۲- تبدیل منحنی ظرفیت به طیف ظرفیت مطابق روابط ارائه شده در ATC40

۳- انتخاب یک نقطه روی طیف ظرفیت به عنوان نقطه‌ی عملکرد اولیه

۴- دو خطی کردن منحنی طیف ظرفیت در نقطه‌ی عملکرد انتخابی مطابق شکل ۲

۵- محاسبه‌ی میرایی موثر و ضرائب کاهش طیفی در نقطه‌ی عملکرد انتخابی مطابق روابط ۴ تا ۶ و ساخت طیف پاسخ کاهش یافته

۶- تعیین محل تلاقی طیف کاهش یافته و طیف ظرفیت به عنوان نقطه عملکرد اصلاح شده



می‌شود. این شاخص از مشهورترین شاخص‌ها در میان محققین است. جدول ۱ سطوح مختلف عملکردی سازه بر اساس شاخص خسارت پارک و آنگ که در آیین نامه ATC40 آورده شده است را نشان می‌دهد [۹].

جدول (۱): مقدار شاخص خسارت پارک و آنگ

برای سطوح مختلف عملکردی

شاخص خسارت پارک و آنگ	سطوح عملکردی
0-0.2	(استفاده بی وقفه) IO
0.2-0.5	(ایمنی جانی) LS
0.5-0.8	(آستانه فرو ریزش) CP

شاخص‌های خسارت مانند شاخص خسارت پارک و آنگ که از ظرفیت جذب انرژی استفاده می‌کنند و همچنین شاخص‌های خسارتی که از ظرفیت چرخه‌ای عضو استفاده می‌کنند، در سطوح خسارت پایین‌تر دقیق‌تر می‌باشند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که مدل‌های عددی، خسارت بیشتری بعد از ۱۰٪ زوال نشان می‌دهند و مدل‌های عددی تخمین نادرستی از مقدار خسارت در بیشتر از ۱۵٪ زوال دارند. به همین منظور در این تحقیق شاخص خسارت پارک و آنگ به صورتی که برابر با صفر در حالت بدون زوال و برابر با ۱ در ۱۰٪ زوال است، مقیاس شده است [۱۰].

#### ۲-۲-۲- شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک

این شاخص توسط پاول و الاهابدی [۲] پیشنهاد گردید و جزء شاخص‌های محلی و غیرتجمعی محسوب می‌شود. این شاخص به دلیل ماهیت ساده‌ی آن، جزء شاخص‌های محبوب در میان محققین و مهندسان می‌باشد. در این تحقیق، این شاخص به صورت استاتیکی و متناسب با منحنی ظرفیت کل سازه در تحلیل بارافزون، مطابق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌گردد و با شاخص پارک و آنگ مقایسه می‌گردد.

$$DI_{\mu} = \frac{U_{max} - U_y}{U_{mon} - U_y} \quad (8)$$

در رابطه ۸  $U_{max}$  تغییر مکان حداکثر و  $U_y$  تغییر مکان تسلیم می‌باشند. در محاسبه‌ی این شاخص در تحقیق حاضر، ابتدا تغییر مکان حداکثر متناظر با تغییر مکان نقطه عملکرد، تغییر مکان نهایی متناظر با نقطه نهایی در منحنی ظرفیت و تغییر مکان تسلیم با توجه به روش مربوط به تساوی انرژی‌ها که در مرجع [۹] آمده است، محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از رابطه ۸ مقدار خسارت بدست می‌آید.

#### ۲-۲-۳- شاخص خسارت سختی

این شاخص که توسط حبیبی و همکارانش [۱۱] در سال ۱۳۸۵ بر اساس ساده سازی شاخص خسارت قبارا [۷] معرفی گردید، در حالت استاتیکی با استفاده از نتایج تحلیل بار افزون از رابطه ۹ تعیین می‌شود:

$$DI_j = 1 - \frac{K_j}{K_{OP}} \quad (9)$$

که در آن  $DI_j$  اندیس خسارت و  $K_j$  شیب منحنی برش پایه تغییر مکان بام مربوط به سطح عملکردی  $J$  (IO, OP, LS و CP) و  $K_{OP}$  شیب منحنی برش پایه تغییر مکان بام مربوط به سطح OP می‌باشد.

#### ۲-۲-۴- شاخص خسارت تغییر مکان نسبی بام

یکی از مشهورترین شاخص‌ها در دسته شاخص‌های کلی سازه، این شاخص می‌باشد که از رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد.

$$DI_{DR} = \frac{\Delta_m}{H} \quad (10)$$

که در آن  $\Delta_m$  تغییر مکان حداکثر بام (متناظر با نقطه عملکرد) و  $H$  ارتفاع سازه می‌باشد. لازم به ذکر است این شاخص با استفاده از تحلیل دینامیکی و بار افزون قابل محاسبه می‌باشد؛ ولی در تحقیق حاضر، از نتایج تحلیل بارافزون برای محاسبه آن استفاده می‌شود. در جدول ۲ سطوح مختلف عملکردی سازه (بر مبنای دستورالعمل FEMA356) و بر اساس شاخص خسارت تغییر شکل نسبی نشان داده شده است [۱۲].



## جدول (۲): محدودیت جابجایی نسبی طبقات

### برای سطوح مختلف عملکردی

سطح عملکردی	محدودیت نسبت تغییر شکل به ارتفاع طبقه (%)	محدودیت نسبت تغییر شکل ماندگار به ارتفاع طبقه (%)
IO (استفاده بی وقفه)	0.7	-
LS (ایمنی جانی)	2.5	1
CP (آستانه فروریزش)	5	5

### ۳- مدل سازی قابها

در این بخش به منظور تحلیل خسارت بر اساس شاخص‌های معرفی شده در بخش قبل، تعداد ۱۲ قاب فولادی با شکل پذیری معمولی (OMRF) بر روی خاک نوع  $S_c$  به صورتی انتخاب شده است که سطح وسیعی از تعداد طبقات و دهانه را شامل می‌شود. قاب‌ها بر اساس آیین‌نامه UBC97 و به روش ASD طراحی شده است [۱۳]. مطابق با شکل ۴، قاب ۱ دهانه دارای ۲ طبقه، قاب‌های ۲ دهانه دارای ۳، ۵ و ۷ طبقه و قاب‌های ۳ و ۵ دهانه دارای ۳، ۵، ۷ و ۹ طبقه می‌باشد. ارتفاع کلیه طبقات ۳/۲ متر و طول کلیه دهانه‌ها ۴ متر می‌باشد. بار مرده سقف  $600 \text{ kg/m}^2$  و بار مرده تیغه‌بندی  $200 \text{ kg/m}^2$  برای محاسبه بارهای ثقلی، و  $350 \text{ kg/m}^2$  برای محاسبه بار جانبی زلزله در نظر گرفته شده است. کلیه قاب‌ها دارای عرض باربر ۴ متر می‌باشد. اهمیت قاب‌ها از نوع متوسط طبق آیین‌نامه UBC97 فرض شده است.



شکل (۴): قابهای مورد بررسی

برای تیرها و ستون‌ها بترتیب از پروفیل IPE و IPB استفاده شده است. جزئیات مربوط به طراحی این قاب‌ها در جدول

(۳) آمده است. تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بر روی قابهای مورد بررسی، از طریق نرم افزار IDARC-2D که یکی از نرم‌افزارهای توانمند در زمینه تحلیل غیر خطی سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشد، انجام شده است [۱۴]. در انجام این تحلیل‌های غیر خطی منحنی هیستریزس دو خطی با نسبت کرنش سخت شدگی  $0.03$  برای اعضای سازه‌ای در نظر گرفته شده است. انحنای نهایی مقطع برای عضو برابر با کرنش در گسیختگی ( $1.5\%$ ) تقسیم بر فاصله تا تار خشی فرض می‌شود. انحنای تسلیم متناظر با کرنش  $0.14\%$  و انحنای شروع کرنش سخت شدگی متناظر با کرنش  $1.15\%$  در نظر گرفته می‌شوند که با مشخصات فولاد A36 سازگار هستند [۱۴].

### جدول (۳): مشخصات کلی قابهای مورد مطالعه

شماره قاب	ارتفاع کل (متر)	پریود سازه (S)	برش پایه
S2B1	۶/۴	۰/۴۴	۵۷/۴۹
S3B2	۹/۶	۰/۶۰	۱۷۱
S5B2	۱۶	۰/۸۹	۲۰۴
S7B2	۲۲/۴	۱/۱۴	۲۲۷
S3B3	۹/۶	۰/۶۰	۲۵۶
S5B3	۱۶	۰/۸۹	۳۰۶
S7B3	۲۲/۴	۱/۱۴	۳۴۰
S9B3	۲۸/۸	۱/۳۸	۳۶۷
S3B5	۹/۶	۰/۶۰	۴۲۷
S5B5	۱۶	۰/۸۹	۵۱۱
S7B5	۲۲/۴	۱/۱۴	۵۶۷
S9B5	۲۸/۸	۱/۳۸	۶۱۱

#### ۴- انتخاب زلزله

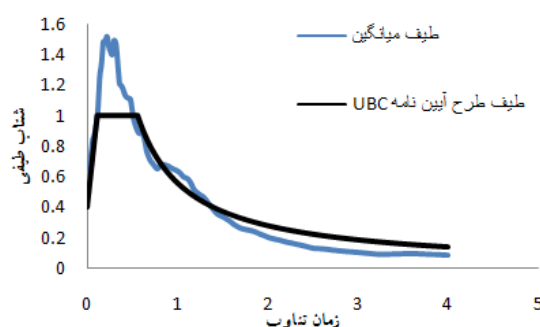
میانگین گیری از پاسخ های زلزله در این نواحی می تواند تخمین مناسبی را ارائه نماید. شایان ذکر است که با توجه به اختلاف قابل توجه میانگین طیف پاسخ میانگین زلزله- های انتخابی با طیف طرح آیین نامه در محدوده زمان تناوب بین ۰/۱ و ۰/۶ ثانیه، نتایج حاصل از تحقیق برای ساختمانهای بسیار کوتاه مانند ساختمانهای یک طبقه که پیروید طبیعی آنها در این محدوده قرار دارد، دارای تقریب نامناسبی خواهد بود.

برای انجام تحلیل های دینامیکی غیرخطی تعدادی شتاب- نگاشت متناسب با مشخصات ژئوتکنیکی و شرایط خاک محل احداث قابها انتخاب می شود. مشخصات زلزله های مناسب در جدول ۳ آمده است. مقایسه میانگین طیف پاسخ زلزله های انتخابی با طیف طرح آیین نامه UBC97 متناسب با خاک  $S_c$  و پارامترهای  $C_v=0.56$  و  $C_a=0.4$  مطابق شکل ۵، نشان می دهد که در اغلب نواحی که طیف میانگین زلزله ها مطابقت خوبی با طیف طرح دارد. بنابراین

جدول (۳): مشخصات رکوردهای انتخابی

شماره	نام زلزله	مقدار	مولفه (درجه)	PGA
1	Duzce, Turkey	MS(7.3)	E	0.134
2	Northridge	MS(6.7)	90	0.239
3	Trinidad, California	MS(7.2)	270	0.147
4	Victoria, Mexico	MS(6.4)	45	0.621
5	Hollister	MS(5.5)	295	0.09
6	Imperial Valley	MS(6.9)	315	0.204
7	Morgan Hill	MS(6.1)	310	0.109

بارافزون در این تحقیق با استفاده از الگوی بارگذاری توانی موجود در مرجع [۸] انجام شده است. نمودار برش پایه- تغییر مکان بام قاب های مورد نظر، در شکل ۶ نمایش داده شده است. برای انجام کلیه ی تحلیل ها، از نرم افزار IDARC V6.1 استفاده شده است. جهت محاسبه ی شاخص های خسارت در تحلیل بارافزون، ابتدا نقطه ی عملکرد سازه با روش طیف ظرفیت تعیین شده و سپس مقادیر این شاخص ها در نقطه ی عملکرد سازه محاسبه گردیدند. در ادامه به منظور اینکه ارتباط میان شاخص های بیان شده در سطح وسیعی تعیین گردد، برای هر یک از قاب ها، ۴ نقطه ی عملکرد محاسبه گردید که به ترتیب مربوط به طیف پاسخ میانگین نمایش داده شده در شکل ۵ و طیف هایی که با ضرائب ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ نسبت به طیف اولیه به مقیاس در می آیند، می باشد. سپس مقادیر شاخص های خسارت در این نقاط محاسبه شد. به منظور محاسبه ی شاخص خسارت در حالت دینامیکی، رکوردهای موجود، با طیف های به مقیاس در آمده، سازگار



شکل (۵): مقایسه طیف میانگین زلزله های انتخابی با طیف طرح UBC

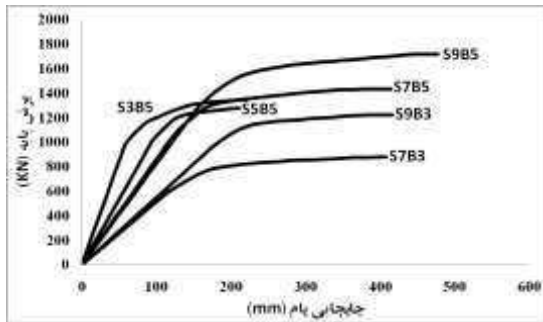
#### ۵- رابطه شاخص خسارت دینامیکی و استاتیکی

در این بخش به تعیین رابطه شاخص خسارت پارک و آنگ در حالت دینامیکی با سه شاخص شکل پذیری پلاستیک، شاخص سختی و شاخص تغییر مکان نسبی در تحلیل استاتیکی غیر خطی پرداخته می شود. به این منظور، قاب های مورد نظر، مدل سازی شده و تحلیل های بارافزون و دینامیکی غیرخطی بر روی مدل ها انجام می گیرد. تحلیل





سازگار شده با طیف به مقیاس درآمده، خسارت مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی محاسبه گردید.



شکل (۶): منحنیهای ظرفیت قابها

نهایی سازه در این شاخص، مرتبط دانست، چرا که در این معیار فقط به میزان تغییر مکان جانبی بام توجه شده است و ظرفیت کلی سازه در تحمل این تغییر مکان لحاظ نمی‌گردد. به عبارت دیگر چون این شاخص خسارت بسیاری از پارامترهای خسارت مانند انرژی جذب شده، رفتار چرخه-ای و ... را در نظر نمی‌گیرد، نمی‌توان آن را معیار مناسبی برای تعیین عملکرد سازه در نظر گرفت. پس از ارزیابی دقت توابع تقریب مختلف، تابع چند جمله‌ای درجه‌ی ۳ جهت برازش بهترین منحنی از بین نقاط انتخاب گردید. به این ترتیب، در این حالت، رابطه ۱۱ را می‌توان برای شاخص خسارت استاتیکی ارائه نمود:

$$DI_{DR} = -17.41 DI_{PA}^3 + 27.92 DI_{PA}^2 - 11.85 DI_{PA} + 2.41 \quad (11)$$

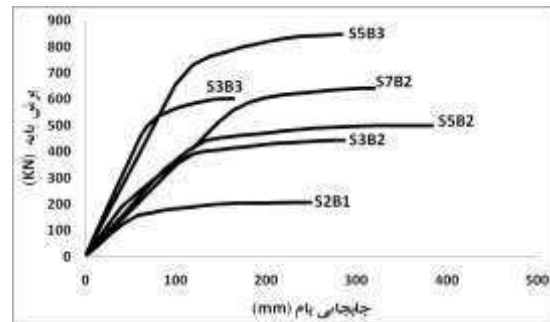
که در رابطه بالا  $DI_{PA}$  شاخص خسارت پارک و آنگ در تحلیل دینامیکی غیرخطی و  $DI_{DR}$  شاخص خسارت تغییر مکان نسبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشد.

#### ۲-۵- مقایسه‌ی شاخص خسارت پارک و آنگ با

##### شاخص شکل پذیری پلاستیک

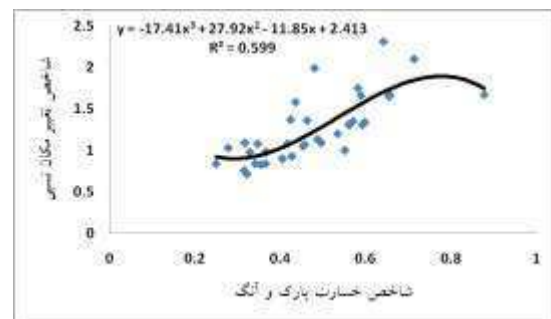
در این بخش، مقادیر شاخص خسارت پارک و آنگ در تحلیل دینامیکی، با مقادیر شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک که در بخش ۲-۲-۲ معرفی گردید، مقایسه شده است و نتایج مربوط به آن در شکل ۸ نمایش داده شده است.

شدند و تحلیل دینامیکی غیرخطی قابها انجام شد. متناظر با هر خسارت محاسبه شده در نقاط عملکرد در تحلیل بارافزون، با میانگین گرفتن از نتایج مربوط به ۷ زلزله‌ی



#### ۵-۱- مقایسه‌ی شاخص خسارت پارک و آنگ با شاخص تغییر مکان نسبی بام

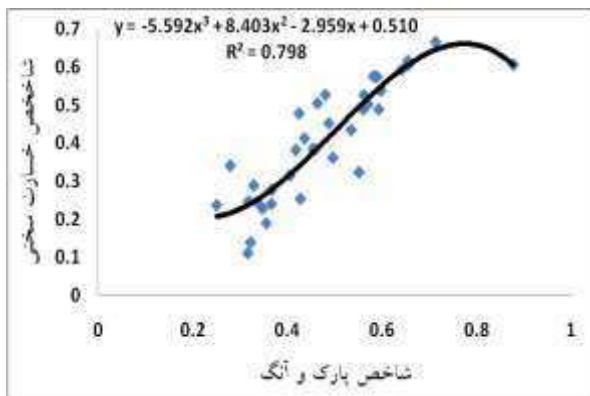
در این بخش به مقایسه‌ی شاخص خسارت پارک و آنگ در تحلیل دینامیکی و شاخص خسارت تغییر شکل جانبی در تحلیل بارافزون پرداخته شده است که نتایج آن در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این حالت شاخص دینامیکی شاخص خسارت پارک و آنگ و شاخص استاتیکی شاخص تغییر مکان نسبی بام می‌باشد.



شکل (۷): رابطه‌ی شاخص خسارت پارک و آنگ با معیار

##### تغییر مکان نسبی

مقایسه شاخص خسارت دینامیکی و استاتیکی در شکل ۷ نشان می‌دهد که دو شاخص مورد بررسی دارای پراکنندگی زیادی، نسبت به هم می‌باشند. از این نکته می‌توان نتیجه‌گیری نمود که معیار جابجایی نسبی نمی‌تواند شاخص مناسبی برای سنجش عملکرد سازه باشد. البته این موضوع در تحقیقات حبیبی و همکارانش نیز نشان داده شده است [۱۱]. علت این موضوع را می‌توان با لحاظ نکردن ظرفیت



شکل (۹): مقایسه‌ی شاخص پارک و آنگ و

#### شاخص خسارت سختی

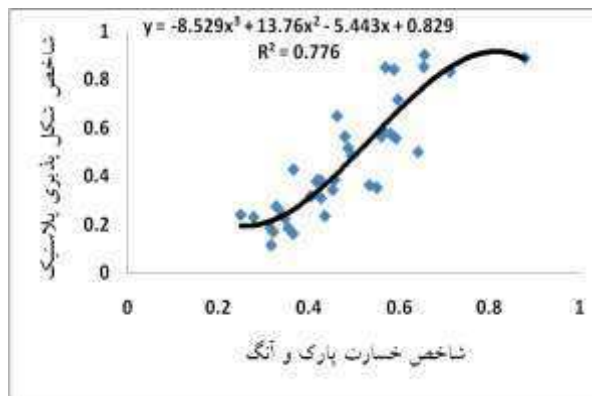
با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که شاخص خسارت سختی از پراکندگی کمتری نسبت به شاخص خسارت تغییر مکان نسبی برخوردار است. از این موضوع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده از رابطه ارائه شده برای این شاخص خسارت تخمین بهتری از خسارت نسبت به شاخص تغییر مکان نسبی ارائه می‌کند. با برآزش بهترین منحنی (با خطای حداقل) با استفاده از روش کمترین مجذور مربعات، معادله‌ی زیر برای رابطه‌ی بین شاخص خسارت پارک و آنگ و شاخص سختی بدست می‌آید:

$$DI_S = -5.59DI_{PA}^3 + 8.40DI_{PA}^2 - 2.96DI_{PA} + 0.51 \quad (13)$$

که در آن،  $DI_{PA}$  شاخص خسارت پارک و آنگ در تحلیل دینامیکی غیرخطی و  $DI_S$  شاخص خسارت سختی در تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشد.

#### ۶- معیارهای پیشنهادی تحقیق برای شناسایی سطوح عملکرد

معادلات استخراج شده مطابق روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ در بخش قبل نشان داد که با محاسبات استاتیکی ساده بر اساس نتایج روش بار افزون و با داشتن هرکدام از شاخص‌های تغییر مکان نسبی، سختی و شکل‌پذیری پلاستیک، می‌توان خسارت قاب فولادی را تخمین زد. با توجه به پیچیدگی و وقت گیر بودن تحلیل خسارت دینامیکی جهت تعیین عملکرد لرزه‌ای از یک طرف و ناکافی بودن معیار ساده تغییر مکان نسبی (ارائه شده در دستورالعمل‌هایی نظیر FEMA356) از طرف دیگر، می‌توان



شکل (۸): رابطه‌ی شاخص پارک و آنگ و شاخص

#### شکل‌پذیری پلاستیک

از نکات قابل توجه در این شکل می‌توان به پراکندگی کمتر نقاط نسبت به معیار جابجایی نسبی اشاره نمود که سبب می‌شود بتوان با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده، با دقت بهتری، مقادیر شاخص خسارت پارک و آنگ (دینامیکی) را از مقادیر شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک (استاتیکی)، استخراج نمود. در این حالت نیز با برآزش یک منحنی درجه‌ی ۳ با روش حداقل مربعات رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی شاخص خسارت پیشنهادی بدست می‌آید:

$$DI_{DU} = -8.53DI_{PA}^3 + 13.76DI_{PA}^2 - 5.44DI_{PA} + 0.83 \quad (12)$$

که در رابطه بالا  $DI_{PA}$  شاخص خسارت پارک و آنگ در تحلیل دینامیکی غیر خطی و  $DI_{DU}$  شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک در تحلیل استاتیکی غیر خطی می‌باشد. این معادله نشان می‌دهد که با معلوم بودن شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک از محاسبات استاتیکی می‌توان مقدار خسارت وارد بر سازه را پیش‌بینی نمود.

#### ۵-۳- مقایسه‌ی شاخص خسارت پارک و آنگ با

#### شاخص خسارت سختی

در این بخش، مقادیر شاخص خسارت پارک و آنگ در تحلیل دینامیکی، با مقادیر شاخص خسارت سختی که در بخش ۲-۲-۳ معرفی گردید، مقایسه شده است و نتایج مربوط به آن در شکل ۹ نمایش داده شده است.



نسبی می‌باشد. بر اساس نقاط نسبتاً زیاد حاصل شده که هر کدام از آنها نتیجه دو تحلیل خسارت در حالات دینامیکی غیرخطی و استاتیکی غیرخطی می‌باشد، روابطی برای تخمین مقدار شاخص دینامیکی بر حسب نتایج استاتیکی استخراج شدند. جدول ارائه شده در این تحقیق بر اساس شاخص‌های استاتیکی، معیارهای ساده و مؤثری را برای پیش‌بینی سطح عملکرد و خسارت قاب‌های خمشی فولادی، بدون نیاز به انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی پیچیده و وقت‌گیر، در اختیار طراحان قرار می‌دهد.

### مراجع

- 1- رهایی، ع. و نعمتی، س. (تابستان ۱۳۸۳)، ارزیابی عملکرد و روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی. تهران
- 2-Bertero, R.D and Bresler, B. (1971), Seismic safety of reinforce concrete members and structure earthquake Engineering and Structural dynamic Vol. 10 1982 p. 179-193
- 3-powell H.Graham and Allahabadi R. (1988), "Seismic damage prediction by deterministic methods" Concepts and Procedures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, 719-734.
- 4-Sozen, R.F. and Lybas, B. (1977), Inelastic dynamic analysis of reinforced concrete structure in three dimension, Ph.D. thesis Department of civil Engineering state University of new York at Buffalo.
- 5-Antonella Colombo, paol Negro(2005) a damage index of generalized applicability; Engineering structures; Vol.27 P: 1163-1174
- 6-Park Y.J., Ang A.H.S, (1985), "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, PP.722-739.
- 7-Ghobarah A, Abou-Elfath H, Biddah A, (1999), "Response- Based Damage Assessment of Structures", Earthquake Engng. Struct. Dyn. Vol. 28, pp 79-104
- 8-Federal Emergency Management Agency, FEMA273. "NEHRP Guideline for The Seismic Rehabilitation of Building", Building Seismic Safety Council, Washington DC.1997
- 9-Applied Technology Council, ATC40; (1997) "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings California Seismic Safety Commission".

بر اساس روش پیشنهادی تحقیق و نتایج عددی حاصله، معیارهای مناسبی را جهت شناسایی سطوح عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی معرفی نمود. به این منظور با قرار دادن مقادیر شاخص خسارت پارک و آنگ که در جدول (۱) برای سطوح عملکردی مختلف ارائه شده است، در معادلات (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)، محدودیت‌های شاخص‌های خسارت استاتیکی شامل شکل‌پذیری پلاستیک، سختی و تغییر مکان نسبی در سطوح عملکردی مختلف محاسبه می‌شوند. این محدودیت‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. این جدول در تعیین سطح عملکرد و خسارت یک قاب فولادی تنها بر اساس نتایج تحلیل بار افزون و بدون استفاده از تحلیل خسارت دینامیکی، می‌تواند در شناسایی سطوح عملکرد سازه بسیار مفید و موثر واقع شود.

### جدول (۴): مقادیر شاخص‌های خسارت شکل‌پذیری

پلاستیک، سختی و تغییر مکان نسبی در سطوح عملکردی

تغییر مکان نسبی	شاخص سختی	شاخص شکل پذیری پلاستیک	سطوح عملکرد
$< 1/0.2$	$< 0.21$	$< 0.22$	IO
$1/0.2 - 1/2.9$	$0.21 - 0.43$	$0.22 - 0.48$	LS
$1/2.9 - 1/8.9$	$0.43 - 0.66$	$0.48 - 0.91$	CP
$> 1/8.9$	$> 0.66$	$> 0.91$	COLAP SE

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک روش جدید برای تخمین خسارت و تعیین سطوح عملکردی سازه بر اساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی توسعه یافت. ارزیابی معیار جابجایی نسبی با استفاده از شاخص خسارت پارک نشان داد که استفاده از معیار تغییر شکل جانبی بام، به عنوان تنها معیار تشخیص عملکرد سازه، مناسب نیست. مقایسه‌ی شاخص خسارت شکل‌پذیری پلاستیک و شاخص سختی در تحلیل بارافزون با شاخص خسارت پارک و آنگ در تحلیل دینامیکی غیرخطی، حاکی از عملکرد مناسب‌تر شاخص‌های شکل‌پذیری و سختی نسبت به معیار جابجایی



10-Kianfar, A., Estekanchi, H., Vafai (2005). A.A.,  
Study of Damage Indexes Performance in  
Seismic Analysis of Steel Frames (in Farsi).  
Proceedings of The 2nd National Congress on  
Civil Engineering, IUST, Iran; No. 1025, 1-8

۱۱- حبیبی. ع.ر.، محرمی. ح. و تسنیمی. ع.ع. (۱۳۸۵)،

ارزیابی عملکرد لرزه‌های قابهای خمشی بتن مسلح یا  
استفاده از اندیس خسارت سختی، نشریه دانشکده  
فنی (ویژه مهندسی عمران)، جلد ۴۰ شماره ۵ صفحه

۷۱۲۷۰۱

12-Federal Emergency Management Agency  
Fema356(1997). Prestarnd and commentary for  
the seismic rehabilitation of Building Seismic  
Safety Council Washington Dc.

13-UBC (Uniform Building Code),( 1997.);  
International conference of building officials;  
Whittier, California

14-IDARC 2D Version 4.0: A Program for the  
Inelastic Damage Analysis of Buildings by R. E.  
Valles, A. M. Reinhorn, S. K. Kunnath3, C.  
Li, and A. Madan, January 8, 1996, Technical  
Report NCEER-96-0010.

