

Evaluation of Seismic Damage indexes in Concrete Frames and Introducing a New damage index for Detection of Damaged stories

Meisam Mazloom¹, Nosratollah Fallah^{2*}

1- Phd candidate, Faculty of Civil Engineering, University of guilan, Rasht, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Studying the undamaged structure that can identify the stories with the greatest potential for damage in the event of an earthquake, can be a great help in reducing the damage caused by the earthquake. For this purpose, the damage to the story should be determined based on the information obtained from the structure and the calculation of damage indexes. In this paper, several Rc moment frames in the IDARC program are modeled and the Pushover analysis is performed on them. Based on the results of this analysis, 5 damage scenarios were selected. In order to monitor the models' damage in these scenarios, in a part of the study, the total damage of the structure was estimated using Park & Ang Damage Index, Rafael and meyer index and Drift index and the relationship between the indexes was presented. At the Story scale, the affected Stories were detected and the results compared. Subsequently, the affected stories were identified using Story-scale damage indexes and the results were compared. Pearson's statistical criterion was used to investigate the correlation between the damage data of the beams and columns of the floors as well as the drift criterion. Based on the modal information, a new damage index called MMFDI was developed and its accuracy was compared with the other modal indexes on the studied models. Studies have shown that story drift is a reliable index for identifying damaged stories in a building and is very well matched with the results of park&ang beam damage index. The results also showed that with the help of modal indexes, the damaged stories can be accurately identified, and the new index developed in this paper can increase the accuracy of detection the probable damaged stories by using more sensitive parameters.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 January 2020

Revise Date: 30 June 2020

Accept Date: 18 July 2020

Keywords:

Pushover analysis

Damage index

Drift

RC frame

Story damage index

Modal based damage index

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.216248.2053>

*Corresponding author: Fallah Nosratollah.

Email address: nsfallah@yahoo.com

بررسی شاخص‌های تعیین آسیب لرزه‌ای در قاب‌های بتنی و معرفی یک شاخص جدید برای تشخیص طبقات آسیب‌دیده

میثم مظلوم^۱، نصرت‌اله فلاح^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، دانشکده فنی، رشت، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی عمران، بابل، ایران

چکیده

مطالعه سازه آسیب‌نندیده که منجر به تشخیص طبقات با پتانسیل آسیب‌دیدگی بیشتر در صورت وقوع زلزله بشود، می‌تواند کمک شایانی در کاهش خسارات ناشی از زلزله داشته باشد. برای این منظور باید بتوان خسارت در طبقه را بر اساس دریافت اطلاعاتی از سازه و به کمک شاخص‌های خسارت تعیین کرد. از این حیث در این مقاله، چند قاب خمشی بتنی در برنامه IDARC مدل‌سازی شده و تحت تحلیل بارافزون قرار گرفتند. با استفاده از نتایج این تحلیل و نیز مقادیر شاخص خسارت پارک و انگ، ۵ سناریوی خرابی مشخص شد. برای پایش خسارت مدل‌ها در این سناریوها، در بخشی از مطالعه، خرابی کل سازه به کمک شاخص‌های پارک و انگ، رافیل و میر و نیز تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت) بررسی شده و ارتباط بین شاخص‌ها ارائه شد و در ادامه کار به کمک شاخص‌های خسارت در مقیاس طبقه، طبقات آسیب‌دیده مشخص شدند و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. از معیار آماری پیرسون نیز برای بررسی همبستگی بین داده‌های مربوط به خسارت تیرها و ستون‌های طبقات و نیز معیار دریفت استفاده شد. بر اساس اطلاعات مودال، شاخص خسارت جدیدی به نام MMFDI بر اساس شیب بردار شکل مود و فرکانس ارائه شد و دقت آن در مقایسه با سایر شاخص‌های مودال روی مدل‌های مورد مطالعه بررسی شد. مطالعات نشان داد که دریفت طبقه، شاخص قابل اعتمادی جهت شناسایی طبقه آسیب‌دیده در ساختمان است که همخوانی بسیار مناسبی با شاخص خسارت تیرهای طبقه پارک دارد. همچنین نتایج نشان داد که به کمک شاخص‌های مودال می‌توان طبقه آسیب‌دیده را با دقت خوبی شناسایی کرد که شاخص جدید تعریف‌شده در این مقاله با استفاده از پارامترهای حساس‌تر به آسیب توانست دقت تعیین طبقه یا طبقات محتمل آسیب‌دیدگی را نیز افزایش دهد.

کلمات کلیدی: تحلیل بارافزون، شاخص خسارت، تغییر مکان جانبی نسبی، قاب بتن‌آرمه، شاخص خسارت طبقه، شاخص مودال

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|---|------------|---------------|------------------------------------|------------|------------|--|
| https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.216248.2053 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت | |
| doi: 10.22065/jsce.2020.216248.2053 | ۱۴۰۰/۰۷/۳۰ | ۱۳۹۹/۰۴/۲۸ | ۱۳۹۹/۰۴/۲۸ | ۱۳۹۹/۰۴/۱۰ | ۱۳۹۸/۱۰/۲۸ | |
| نصرت‌اله فلاح nsfallah@yahoo.com | | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | | | |

۱- مقدمه

در طول عمر خدمت‌دهی یک سازه، ممکن است خساراتی به دلیل تغییرات در الگوهای بارگذاری و تحریکات تصادفی نظیر زلزله به سازه‌ها تحمیل شود. با بروز آسیب‌های لرزه‌ای شدید، رفتار سازه باید در حوزه غیرخطی بررسی شود. کمی‌سازی مقدار خسارت بالقوه‌ای که در اثر وقوع زلزله در سازه امکان وقوع دارد، کاربرد گسترده‌ای در زمینه تحلیل و طراحی سازه‌های جدید و همچنین ارزیابی سازه‌های موجود دارد. به همین دلیل، مفهوم شاخص خسارت محبوبیت فراوانی در بین محققین پیدا کرده است. شاخص‌های خسارت بسته به ساختار تئوریک خود قادرند تا میزان خسارت سازه را به صورت محلی و یا کلی در مقیاسی بین صفر تا یک مقداردهی کنند. انواع مختلفی از شاخص‌های خسارت تا کنون ارائه شده که از پارامترهای مختلف جهت تخمین کمی خسارت استفاده کرده‌اند. شاخص‌های وابسته به پارامترهای تغییر مکان سازه جزو ساده‌ترین انواع شاخص‌ها به شمار می‌روند. یکی از آیت‌های کنترلی آیین‌نامه‌ها برای کاهش خسارت ساختمان که قابلیت اندازه‌گیری میدانی داشته، کنترل نسبت دریافت میان‌طبقه است. بر اساس مراجعی مانند SEAOC در سال ۱۹۹۹ [۱]، FEMA450 در سال ۲۰۰۳ [۲] و کار آقای زو و دیگران [۳]، حداکثر نسبت دریافت میان‌طبقه متناسب با سطوح عملکردی مختلف ارائه گردید. تحقیقات دیگری نیز در خصوص کمی‌سازی سطوح عملکردی بر اساس معیارهای مختلف انجام شده است. بر اساس کار آردوران و یاکوت [۴]، قبارا [۵]، هاسلتون و درلین [۶]، محدوده پیشنهادی دریافت میان‌طبقه در آیین‌نامه‌ها با رویکردی محافظه‌کارانه ارائه شده‌اند. حبیبی و ایزدپناه [۷] و نیز یاکوت و دیگران [۸] امکان ارائه روابط ریاضی جهت تخمین میزان دریافت میان‌طبقه متناظر با سطوح عملکردی مختلف را بررسی کردند. شریفی و دیگران [۹] به کمک انجام تحلیل بارافزون بر روی قاب‌های خمشی بتنی توانستند دریافت میان‌طبقه متناظر در سطوح عملکردی مختلف را پیشنهاد دهند. همچنین مراجعی مانند FEMA273، درجه آسیب لرزه‌ای وارد به یک سازه را با ارتباط دادن آسیب و دریافت حاصل از تحلیل بارافزون مشخص کرده‌اند. [۱۰] از سوی دیگر شاخص ترکیبی پارک و انگ اصلاح‌شده به عنوان یکی از محبوب‌ترین شاخص‌های خسارت بوده که بر اساس ترکیب خطی شکل‌پذیری و انرژی جذب شده فرمول‌بندی شده است. [۱۱] این شاخص، مناسب‌ترین گزینه برای سازه‌های بتن‌آرمه است، زیرا که قادر است تا طیف کاملی از وضعیت‌های خرابی مقطع تا شکست کامل آن را در نظر بگیرد. [۱۲] از سوی دیگر در بحث تشخیص آسیب در سازه‌ها، یکی از روش‌های مورد علاقه، روش‌های مبتنی بر خواص ارتعاشی سازه بوده است. در بین روش‌های مبتنی بر ارتعاش، روش‌های تشخیص آسیب مودال مورد توجه بیشتری بوده‌اند. کارهای اولیه صورت گرفته، استفاده از فرکانس طبیعی و اطلاعات مودال بوده است. تغییرات فرکانس‌های طبیعی [۱۳]، معیار اطمینان مودی [۱۴] و تغییرات در معیار اطمینان مودی هم‌عرض [۱۵] و همچنین تغییرات در معیار اطمینان خسارت در نقاط چندگانه [۱۶] بین دو سازه سالم و آسیب‌دیده نظیر هم به عنوان شاخص‌های آسیب فرمول‌بندی شدند. در این بین مشتقات اشکال مودی از قبیل انحنای شکل مودی نسبت به جابه‌جایی مودی به وجود نقص‌های کوچک حساسیت بیشتری دارند. بنابراین برای تشخیص آسیب قابل استفاده هستند. [۱۷]، [۱۸] تعیین طبقه آسیب‌دیده بر اساس اطلاعات مودال در سال ۲۰۰۷ در مقاله‌ای توسط آقای وانگ [۱۹] ارائه شد، بطوریکه شاخص پیشنهادی ایشان با مشاهدات عینی خسارت در ساختمان ۷ طبقه بتنی تحت رکورد زلزله همخوانی داشت. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۴ [۲۰]، پایش سلامت قاب فولادی به کمک روش انرژی کرنشی مودال تحت اثر آسیب‌های لرزه‌ای بررسی شد. بر اساس نتایج، مشخص شد که روش انرژی کرنشی مودال قادر است به خوبی شماره طبقه آسیب‌دیده را مشخص نماید. مقایسه روش انحنای شکل مودی با روش بردارهای مشخص‌کننده آسیب [۲۱] بر روی مدل‌های ساختمان برشی، تیر و سازه خرپایی انجام شد و مشخص گردید که روش انحنای شکل مودی در مدل قاب برشی و تیر بسیار دقیق عمل کرده و بر روی خرپا قادر است تا گره‌های مجاور آسیب را نشان دهد.

با توجه به متفاوت بودن مفاهیم تئوریک شاخص‌های خسارت مودال و غیرمودال و لزوم مقایسه بین آنها و نیز بررسی عملکرد شاخص‌های مودال در خصوص سناریوهای خسارت لرزه‌ای، هدف از این مقاله بررسی ارتباط بین شاخص خسارت مبتنی بر اطلاعات مودال سازه و شاخص خسارت بر اساس اطلاعات پاسخ سازه است. در این مقاله پس از معرفی مفهوم شاخص خسارت و تعریف چند مدل از شاخص‌های خسارت، سه مدل قاب خمشی بتنی با مشخصات فنی موجود در برنامه IDARC 2D به صورت دوبعدی مدل شدند. با هدف قراردادن مدل‌ها در شرایط آسیب‌دیدگی لرزه‌ای و تدوین سناریوهای خرابی پس از زلزله و سپس بررسی روش‌های تشخیص و تخمین آسیب که قادر به شناسایی طبقه (طبقات) آسیب‌دیده باشند، تحلیل بارافزون بر روی مدل‌ها انجام شد. پس از اعتبارسنجی نتایج اولیه

شامل مودهای ارتعاشی و منحنی بارافزون، کفایت روش و ابزار مدلسازی بررسی شد و همچنین خروجی‌های لازم جهت محاسبه شاخص خسارت از برنامه دریافت گردید. بر اساس نتایج، ۵ سناریوی خرابی بر اساس مقادیر شاخص پارک انتخاب شد و در هر یک از این سناریوها، خسارت در مقیاس کلی و سپس در مقیاس طبقه بررسی شد. در کار حاضر، شاخص‌های دریافت در دو سطح کلی و میان طبقه، شاخص رافیل و میر به عنوان شاخص خسارت کلی و نیز شاخص پارک در دو سطح کلی و طبقه‌ای به عنوان شاخص‌های وابسته به پاسخ سازه و نیز شاخص‌های مودال به عنوان شاخص‌های خسارت طبقه‌ای استفاده شدند. سپس ارتباط بین شاخص‌های خسارت با برازش منحنی ارائه گردید و جهت بررسی میزان همبستگی بین داده‌ها از ابزار آماری دیگری به نام ضریب پیرسون نیز استفاده شد. در این مقاله، همچنین شاخص خسارت جدیدی به نام MMFDI بر اساس اطلاعات مودال تعریف شده که نتایج نشان می‌دهد که شاخص مورد نظر قادر است با دقت بهتری، طبقه آسیب‌دیده را شناسایی کند.

۲- ارزیابی خسارت

در دهه‌های گذشته، روش‌های زیادی در خصوص پیش‌بینی آسیب‌های لرزه‌ای توسعه داده شده است. در دستورالعمل‌های طراحی بر اساس عملکرد، سطوح عملکرد بر اساس تغییر شکل‌های غیرالاستیک عناصر سازه‌ای تعریف می‌شود، بنابراین ضروری است تا بتوان به رابطه بین تغییرات سطوح عملکرد سازه و میزان خسارت ایجاد شده در اعضا پی برد. مشکل عمده‌ای که در این خصوص با آن مواجه هستیم، کسب دانش لازم در مورد تخمین کمی آسیب است. علیرغم پیشرفت قابل ملاحظه در زمینه تدوین دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای، در بحث اندازه‌گیری آسیب کمبود محسوسی وجود دارد. تحقیقات گسترده‌ای برای ایجاد یک مدل دقیق ارزیابی میزان خسارت وارد بر سازه‌ها در سالیان گذشته انجام گرفته است. بر همین اساس، در این مقاله از دو دسته شاخص استفاده شده است:

(۱) شاخص خسارت بر مبنای پارامترهای پاسخ سازه

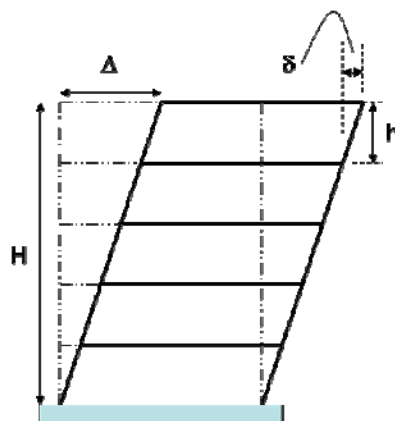
این دسته از شاخص‌ها بر اساس اندازه‌گیری پارامترهای پاسخ سازه نظیر تغییر مکان، دوران، انحنا، مقدار انرژی مستهلک شده شکل گرفته‌اند. در این تحقیق از شاخص‌های خسارت تغییر مکان جانبی نسبی در دو سطح کلی و طبقه، شاخص خسارت پارک و انگ، شاخص رافیل و میر به عنوان شاخص خسارت بر مبنای پارامترهای پاسخ سازه استفاده شده است.

۲-۱- شاخص تغییر مکان جانبی نسبی (دریافت)

شاخص دریافت، به عنوان ابزاری محبوب جهت تخمین وضعیت سلامت کلی ساختمان، برآورد ساده‌ای از سختی جانبی ساختمان بوده و در اغلب موارد به جهت محدود کردن آسیب به اجزای غیرسازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معیار توسط دستورالعمل‌های معتبری چون FEMA273 جهت ارزیابی سطح عملکرد ساختمان پیشنهاد شده است. دریافت به دو صورت دریافت کلی (تغییر مکان جانبی بالاترین نقطه ساختمان نسبت به ارتفاع) که در این مقاله به اختصار TDR^1 معرفی شده و دریافت میان طبقه (جابه‌جایی جانبی نسبی بین دو طبقه متوالی تقسیم بر ارتفاع طبقه) با نام اختصاری IDR^2 تعریف می‌شود. با توجه به شکل (۱)، مقادیر شاخص‌های فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

¹ Total drift index

² Interstorey drift index



شکل ۱: اندازه گیری دررفت [۲۲].

$$TDR = \Delta/H \quad (1)$$

$$IDR = \delta/h \quad (2)$$

۲-۲- شاخص پارک-انگ

مدل پارک-انگ از متداول ترین شاخص های خسارتی است که برای تحلیل خسارت سازه ها به کار گرفته می شود. این شاخص در ابتدا به صورت تابعی از تغییر شکل حداکثر، مقاومت تسلیم عضو و انرژی هیسترتیک جذب شده در طی فرایند بارگذاری بود. [۱۲] کونات و همکارانش، مدل خسارت پارک-انگ را مطابق رابطه (۳) اصلاح کردند. [۱۲] در این رابطه θ_r ، θ_m و θ_u به ترتیب نشان دهنده دوران قابل بازگشت در هنگام باربرداری، بیشینه ی دوران در تاریخچه بارگذاری و ظرفیت نهایی دوران مقطع انتهایی عضو تحت بررسی است. همچنین M_y لنگر متناظر با تسلیم عضو و dE انرژی مستهلک شده در آن مقطع از عضو است. برنامه IDARC-2D که شاخص پارک-انگ را بر اساس رابطه (۳) برای هر عضو و در دو انتهای آن محاسبه می کند، بزرگترین مقدار شاخص خسارت در مقاطع انتهایی را به عنوان مقدار خسارت عضو در نرم افزار معرفی می کند. [۱۱] این شاخص بین دو مقدار صفر (حالت بدون خسارت) و یک (خرابی کامل) تغییر می کند. این شاخص متناسب با خسارت مشاهده شده در عضو، درجه بندی شده که در جدول ۲ نشان داده شده است. [۲۳]

$$DI = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} \int dE \quad (3)$$

جدول ۲: درجه بندی خسارت عضو بتن آرمه با توجه به مقادیر شاخص پارک و انگ

| درجه آسیب | جزئیات کیفی | مقدار شاخص |
|-----------|---|-------------------------|
| ناچیز | بدون خسارت: وجود ترک های موضعی با تعداد کم و کوچک | $DI \leq 0.1$ |
| کم | خسارت کم: خرد شدن موضعی بتن در ستون ها | $0.1 \leq DI \leq 0.25$ |
| متوسط | خسارت متوسط: وجود ترک های شدید و وجود شکاف، ناتوانی در اعضای خمشی | $0.25 \leq DI \leq 0.4$ |
| شدید | خسارت شدید: خرد شدن گسترده بتن، نمایان شدن آرماتورهای کمانه کرده | $0.4 \leq DI \leq 1$ |
| فروریزش | فروریختگی جزئی یا کل سازه | $1 \leq DI$ |

همچنین می‌توان با میانگین‌گیری وزنی مقادیر شاخص خسارت اعضا بر اساس فاکتور وزنی میزان انرژی مستهلک‌شده، شاخص خسارت طبقه را به دو صورت شاخص تیرهای طبقه و شاخص ستون‌ها به صورت جداگانه و نیز شاخص خسارت کلی سازه محاسبه نمود. [۱۱] شاخص طبقه و کلی پارک به صورت روابط (۴) تا (۷) تعریف می‌شوند. در این روابط، λ و E به ترتیب فاکتور میانگین وزنی و میزان انرژی جذب‌شده هستند. برنامه IDARC بر اساس این روابط، قادر است تا شاخص خسارت طبقات و کلی سازه را ارائه نماید.

i) Story Damage

$$DI_{Story} = \sum (\lambda_i)_{Component} (DI_i)_{Component} \quad (4)$$

$$(\lambda_i)_{Component} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{Component} \quad (5)$$

i) Overall Damage

$$DI_{Overall} = \sum (\lambda_i)_{Story} (DI_i)_{Story} \quad (6)$$

$$(\lambda_i)_{Story} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{Story} \quad (7)$$

۳-۲- شاخص رافائل و میر

در سال ۱۹۸۷، رافائل و میر با استفاده از منحنی ظرفیت سازه‌ها، شاخص خرابی کلی سازه را به صورت رابطه (۸) بیان نمودند. [۲۴] در این رابطه d_u ، d_m ، d_y به ترتیب نشان‌دهنده تغییر مکان آخرین سقف در لحظه وقوع اولین تسلیم عضو قاب، حداکثر تغییر مکان آن سقف و تغییر مکان سقف مورد نظر متناظر با وقوع گسیختگی در سازه است. مطالعات نشان داده که این شاخص، معرف خوبی جهت تشخیص خرابی در سازه‌های با ارتفاع کوتاه و متوسط است. [۲۴]

$$DI = \frac{d_m - d_y}{d_u - d_y} \quad (8)$$

همچنین رافائل و میر با بررسی آزمایشگاهی نشان دادند که تغییر مکان متناظر با گسیختگی سازه به صورت درصدی از ارتفاع ساختمان (H) و برابر مقدار رابطه (۹) است.

$$d_u = 0.06H \quad (9)$$

۲) شاخص خسارت بر اساس اطلاعات مودال سازه

برای ردیابی تراز ارتفاعی آسیب، می‌توان بر اساس بردارهای شکل مود و فرکانس متناظر با آن، طبقه آسیب‌دیده را حدس زد. [۱۹] در این بخش از تحقیق، به جهت تعیین موقعیت طبقه آسیب‌دیده، از روش‌های تشخیص آسیب بر مبنای اطلاعات مودال استفاده شده است. به کمک مقایسه اطلاعات، محل و حتی مقدار آسیب با دقت‌های مختلف مشخص می‌شود. در این تحقیق، از دو شاخص آسیب نرمی مودال MFDI، شاخص خسارت طبقه ASDI استفاده کرده و دقت آن در مقایسه با شاخص‌های دسته الف بررسی شده است.

۴-۲- شاخص نرمی مودال

با وقوع آسیب در سازه و تغییر سختی سازه، باید مشخصات مودال سازه آسیب دیده اندازه گیری و استخراج شود تا بتوان از طریق مقایسه با مشخصات مودال سازه سالم، در خصوص محل آسیبها اظهار نظر کرد. با توجه به این که توسعه ترکها و مفاصل پلاستیک در اعضای سازه منجر به افزایش نرمی سازه می شود، از این رو، تغییرات ماتریس نرمی را می توان به عنوان شاخصی در مورد خسارت ایجاد شده در سازه به شمار آورد. [۱۷] این شاخص خسارت که به شاخص خسارت نرمی مودال معروف است بر اساس مقایسه ماتریس نرمی حاصل از دو سری داده مربوط به بردار شکل مود سازه مورد نظر قبل و بعد از وقوع آسیب می باشد. اگر ϕ و ω بردار شکل مود و فرکانس سازه باشند، ماتریس نرمی مودال سازه به صورت رابطه (۱۰) تعریف می شود. به کمک رابطه (۱۰)، اگر ϕ_{ij} بردار شکل مود نرمالایز شده به جرم و ω فرکانس سازه در مود j باشد، نرمی مودال سازه در طبقه i ام یک قاب را می توان با F_i نشان داد و به صورت رابطه (۱۱) تعریف کرد [۱۷]:

$$[F] = [\phi] \left[\frac{1}{\omega^2} \right] [\phi]^T \quad (10)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^{N_m} \frac{\phi_{ij}^2}{\omega_j^2} \quad (11)$$

شاخص خسارت نرمی مودال MFDI در طبقه دلخواه i ام به کمک مفهوم نرمی مودال بر اساس رابطه (۱۱)، به صورت رابطه (۱۲) تعریف شد. [۱۷] این شاخص بین دو مقدار صفر و یک متغیر است. در رابطه (۱۲)، نماد * نشان دهنده وضعیت سازه پس از وقوع آسیب است. همچنین اندیس N_m نشان دهنده تعداد مودهای ارتعاش اندازه گیری شده است. در این تحقیق از سه مود نخست سازه استفاده شده است.

$$MFDI_i = 1 - \frac{F_i}{F_i^*} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_m} \frac{\phi_{ij}^2}{\omega_j^2}}{\sum_{j=1}^{N_m} \frac{\phi_{ij}^{*2}}{\omega_j^{*2}}} \quad (12)$$

۵-۲- شاخص خسارت طبقه مودال

وانگ در سال ۲۰۰۷، با توجه به معادله تعادل دینامیکی یک قاب ساختمانی خطی تحت اثر شتاب زمین، با در نظر گرفتن جرم، شکل مود انتخابی و فرکانس مودال، برای تخمین خسارات در طبقات سازه ها، شاخص خسارت طبقه SDI_l را به صورت رابطه (۱۳) و (۱۴) برای طبقه l تعریف کرد. [۱۹] در رابطه (۱۳)، k_l سختی طبقه دلخواه l در مود l است. همچنین در این رابطه، از اثرات میرایی سیستم صرف نظر شده است. شاخص SDI بر اساس مقادیر بین ۰ (بدون خسارت) تا ۱ (فروریزش)، مقدار آسیب در طبقه را ارائه خواهد داد. در این رابطه علامت (*) معرف وضعیت آسیب دیدگی است. با توجه به این که در اکثر ساختمانها، توزیع جرم طبقه عموماً یکنواخت است، لذا شاخص SDI را می توان به صورت شاخص جدید $ASDI$ برای طبقه l ام طبق رابطه (۱۵) بدست آورد. شاخص فوق بر اساس مطالعات انجام شده در مرجع [۱۹] با دریافت اطلاعات مودهای نخست سازه به دقت قابل قبولی می رسد.

$$SDI_l = 1 - \frac{k_l^*}{k_l} = 1 - \frac{\omega_j^{*2} \sum_{i=1}^N \frac{m_i \phi_{ij}^*}{m_i \Delta \phi_{ij}^*}}{\omega_j^2 \sum_{i=1}^N \frac{m_i \phi_{ij}}{m_i \Delta \phi_{ij}}} \quad (13)$$

³ Story damage index

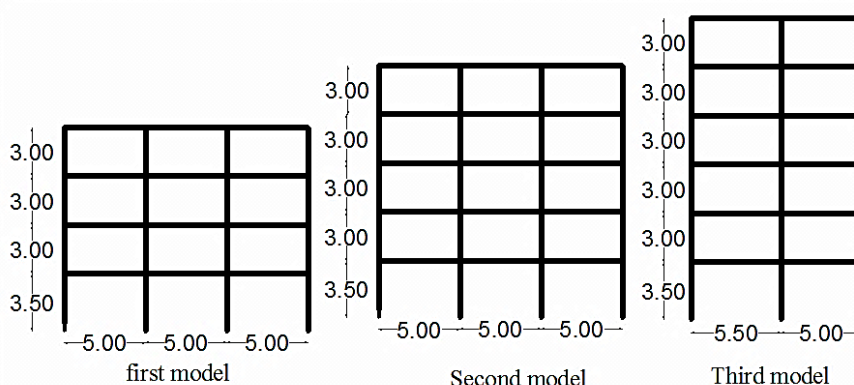
$$\begin{cases} \Delta\varphi_{ij} = \varphi_{ij} - \varphi_{(i-1)j} & \text{for } i = 2, 3, \dots, N \\ \Delta\varphi_{ij} = \varphi_{ij} & \text{for } i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$ASD_l = 1 - \frac{\omega_j^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_{ij}^*}{\Delta\varphi_{ij}^*}}{\omega_j^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_{ij}}{\Delta\varphi_{ij}}} \quad (15)$$

۳- روند مطالعاتی

۳-۱- معرفی مدل های عددی

سه مدل قاب بتن آرمه میان مرتبه با تعداد طبقات ۴ و ۵ و ۶ و تعداد دهانه های به ترتیب برابر ۳ و ۳ و ۲ بر اساس مشخصات مرجع [۲۵] انتخاب شده و به صورت دویعدی مدل شدند. سه مدل انتخابی در عرض و ارتفاع منظم بوده که ارتفاع طبقات و طول دهانه هر یک از آنها در شکل (۲) ملاحظه می شود. فرض می شود که مشخصات مکانیکی و هندسی فرض شده قابل قبول است و لذا هیچ گونه عملیات طراحی انجام نشد. بتن مورد استفاده در مدل های ۴ و ۵ طبقه دارای مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و در مدل ۶ طبقه ۳۳ مگاپاسکال و فولاد مصرفی با مقاومت تسلیم ۴۱۴ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. همچنین بار گسترده یکنواخت ۲۰ کیلونیوتن بر متر به عنوان بار ثقلی بر روی تیرهای تمام طبقات قرار دارد. پای ستون ها به صورت گیردار مدل شده و از اثرات شالوده صرف نظر گردید.

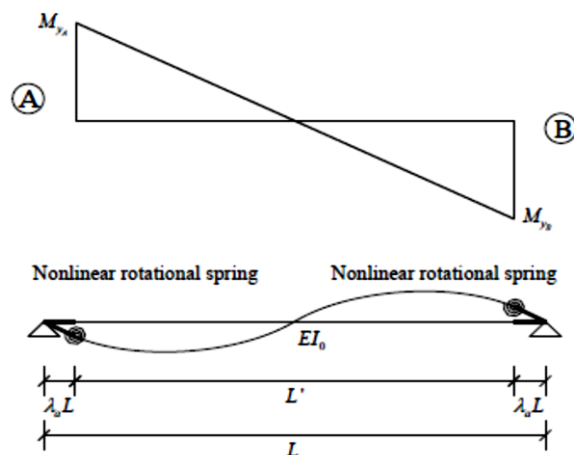


شکل ۲: مشخصات هندسی مدل ها.

۳-۲- مدلسازی عددی در برنامه و انجام تحلیل غیرخطی

مدل های فوق در برنامه IDARC-2D V7.0 ساخته شدند. برنامه IDARC به عنوان مجموعه ای با قابلیت در نظر گرفتن جنبه های مختلف رفتار عضو بتنی، با هدف مطالعه پاسخ غیرخطی ساختمان های بتن آرمه در سال ۱۹۸۷ معرفی شد. [۱۱] این برنامه قادر به انجام تحلیل های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بوده و قادر است تا با توجه به درخواست کاربر، اطلاعات مختلفی نظیر وضعیت تغییر مکان، نسبت تنش در اعضا، روند تشکیل مفاصل، نمایش مقدار خسارت در سازه و اطلاعات مودی سازه را در گام های مختلف در خلال پیشرفت تحلیل نمایش دهد. در این برنامه، المان های ستونی به صورت مدل های ماکرو با دارا بودن تغییرشکل های خمشی غیرالاستیک و تغییرشکل های برشی و محوری الاستیک و در المان تیرها نیز تغییرشکل های خمشی غیرالاستیک به همراه تغییرشکل های برشی الاستیک در نظر گرفته شده است. [۱۱] در این مقاله، روی مدل های عددی تحلیل استاتیکی غیرخطی صورت گرفته است. جهت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در تیر و ستون ها، از مدل خمیری متمرکز (شکل ۳) در دو انتهای عضو استفاده شد. برنامه IDARC-2D از مدل اصلاح شده ای بهره می برد که در آن برنامه در حالی که عضو را به صورت الاستیک در نظر دارد، دو فنر چرخشی غیرخطی را در دو انتهای عضو در نظر

می‌گیرد و در نتیجه رفتار خمیری عضو تنها در دو انتهای تیر و ستون‌ها فعال خواهد بود. همچنین این مدل شامل نواحی صلب انتهایی است. [۱۱]



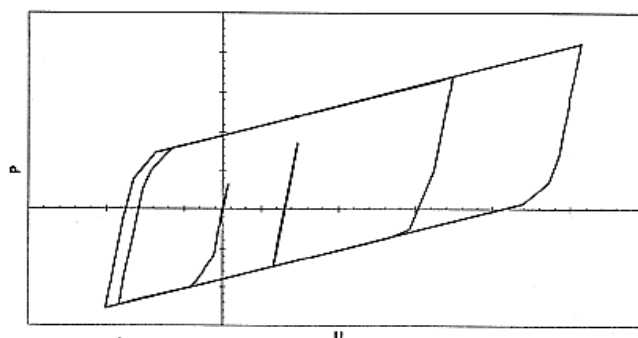
شکل ۳: مدل خمیری متمرکز [۱۱].

با توجه به این که طول تیر و ستون‌ها به صورت مرکز به مرکز به برنامه معرفی می‌شود، منظور از نواحی صلب انتهایی که باید توسط کاربر برای دو سر اعضا تعریف شود، ناحیه مشترک محل اتصال اعضا به یکدیگر و نیز به زمین است که در المان تیر یا ستون مورد نظر به صورت صلب در نظر گرفته می‌شود. همچنین از مدل چرخه‌ای چندخطی جهت مدلسازی رفتار تیر و ستون استفاده شد. پارامترهای چرخه‌ای انتخاب شده برای اعضا به صورت مقاطع شکل‌پذیر با جزئیات مناسب معرفی شد. لازم به ذکر است که برنامه IDARC رفتار چرخه‌ای را برای هر دو انتهای عضو در نظر می‌گیرد. برای معرفی رفتار چرخه‌ای به برنامه، کاربر باید با توجه به راهنمای برنامه [۱۱] مقادیر HS، HBE، HBD، HC و HS را مشخص نماید. این مقادیر بر اساس تعاریف ارائه شده در جدول شماره (۳) تعیین می‌شوند. به طور کلی افزایش مقدار HC مقدار افت سختی را به تاخیر می‌اندازد. همچنین افزایش HBE و HBD سبب افزایش نرخ افت مقاومت و افزایش HS سبب کاهش مقدار لغزش^۴ خواهد شد. بر این اساس مقدار HC برابر مقدار پیشفرض ۲۰۰ که حداکثر مقدار پیشنهادی برای معرفی رفتار بدون افت سختی است در نظر گرفته شد. برای معرفی پارامتر کاهش مقاومت، مقدار HBE و HBD برابر ۰،۰۱ برای معرفی حالت بدون افت مقاومت و همچنین مقدار HS برابر ۱ برای لغزش اتصال (Pinching) در نظر گرفته شد. با توجه به راهنمای برنامه، مدل در نظر گرفته شده برای رفتار چرخشی اعضا به صورت شکل ۴ معرفی شد:

^۴ Slip or pinching

جدول ۳: مشخصات پارامترهای تیپ و مقادیر پیش فرض برای معرفی رفتار چرخه‌های اعضا [۱۱]

| پارامتر | مفهوم | مقدار | نوع اثرگذاری |
|---------|--|-------|------------------------|
| HC | پارامتر تنزل سختی | ۴ | تنزل شدید |
| | | ۱۰ | تنزل متوسط |
| | | ۱۵ | تنزل ملایم |
| | | ۲۰۰ | بدون تنزل (پیش فرض) |
| HBD | پارامتر تنزل مقاومت (بر مبنای شکل پذیری) | ۰/۱۶ | تنزل شدید |
| | | ۰/۳ | تنزل متوسط |
| | | ۰/۱۵ | تنزل ملایم |
| | | ۰/۰۱ | بدون تنزل (پیش فرض) |
| HBE | پارامتر تنزل مقاومت (بر مبنای کنترل انرژی) | ۰/۱۶ | تنزل شدید |
| | | ۰/۱۵ | تنزل متوسط |
| | | ۰/۰۸ | تنزل ملایم |
| | | ۰/۰۱ | بدون تنزل (پیش فرض) |
| HS | پارامتر بسته شدن ترک | ۰/۰۵ | پینچینگ شدید |
| | | ۰/۲۵ | پینچینگ متوسط |
| | | ۰/۴ | پینچینگ ملایم |
| | | ۱ | بدون پینچینگ (پیش فرض) |



شکل ۴: مدل هیستریسیک چندخطی [۱۱].

اثرات غیرخطی هندسی $P-\Delta$ نیز فعال گردید. از تحلیل بارافزون بر مبنای کنترل نیرو با توزیع بار جانبی به صورت یکنواخت استفاده شد. این توزیع در واقع یک بار جانبی را به صورت ثابت در ارتفاع ساختمان بدون توجه به وزن طبقات در نظر می‌گیرد. افزایش

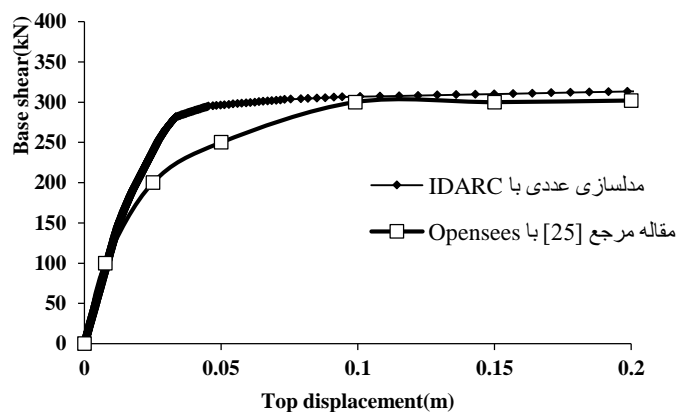
نیروی جانبی در هر گام برای طبقه i برابر ΔF_i بوده و به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌شود:

$$\Delta F_i = \frac{\Delta V_b}{N} \quad (16)$$

در این رابطه N تعداد طبقات ساختمان و ΔV_b افزایش برش پایه سازه است. [۱۱] پس از انجام تحلیل بارافزون، به منظور اعتبارسنجی روش مدلسازی و ابزار مورد استفاده، مقایسه‌ای بین نتایج اولیه تحلیل که شامل دوره تناوب سه مود نخست و همچنین منحنی ظرفیت سازه بوده صورت گرفت. به جهت اختصار، اطلاعات مربوط به مدل ۴ طبقه در ادامه ارائه شده‌اند. بر اساس مقایسه سه مود نخست ارتعاش مشخص شد که مدل ساخته شده در مقاله حاضر از توزیع جرم و سختی تقریباً مشابهی نسبت به مقاله مرجع [۲۵] برخوردار است. همچنین با انجام تحلیل بارافزون مشخص شد که روند مشاهده شده در منحنی ظرفیت حاصل شده، با نتایج ارائه شده در مقاله مرجع مشابهت دارد.

جدول ۴: مقایسه بین نتایج مدلسازی و نتایج مرجع [۲۵]

| مقایسه نتایج | مود اول | مود دوم | مود سوم |
|-----------------|---------|---------|---------|
| مقاله مرجع [۲۵] | ۰/۵۰ | ۰/۱۷ | ۰/۱۱ |
| مدلسازی حاضر | ۰/۵۰۷ | ۰/۱۷۵ | ۰/۱۰۴ |
| اختلاف % | ۱/۴۰ | ۲/۹۴ | ۵/۴۵ |



شکل ۵: مقایسه منحنی بارافزون در برنامه IDARC و برنامه Opensees.

۳-۳- دسته‌بندی سناریوهای خرابی بر اساس مقادیر شاخص خسارت پارک

در تحقیقاتی که در سالیان اخیر صورت گرفته، پیکره تحقیقات بررسی آسیب بدین صورت بوده که در ابتدا یک سناریوی خرابی به صورت فرضی و در یک یا چند محل فرضی در نظر گرفته شده و مشخصات ارتعاشی سیستم در حالت اصطلاح آسیب‌دیده استخراج می‌شود. در نهایت، مقایسه‌ای بین خواص ارتعاشی وضعیت موجود سازه نسبت به حالت آسیب‌ندیده انجام شده و در پایان کفایت روش از لحاظ شناسایی عضو یا اعضای آسیب‌دیده (دارای آسیب فرض شده) نقد می‌شود. در این پژوهش، سناریوهای آسیب با رویکردی متفاوت و بر اساس عملکرد یکپارچه سیستم در هنگام اثر بار جانبی به آن و میزان آسیب رخ داده در اعضا انتخاب شد. این انتخاب از حیث تحمیلی نبودن محل آسیب و محتمل‌بودن بیشتر نقاط آسیب‌پذیر سازه در زلزله‌ها نسبت به روش‌های متداول ارجحیت دارد. حال با فرض صحیح‌بودن نقاط آسیب‌دیده، برای پایش درستی یا عدم درستی فرض مورد نظر، باید معیارهایی کمی برای اندازه‌گیری میزان آسیب‌دیدگی استفاده شود تا بتوان به کمک آن هم محل آسیب و هم مقدار آن را رهگیری نمود. پس از انجام تحلیل بارافزون، می‌توان به کمک داده‌های خروجی برنامه IDARC، ایجاد آسیب در سازه را به صورت عضو به عضو از لحظه وقوع نخستین ترک‌ها در بتن تا لحظه تسلیم میلگردهای طولی و در نهایت ناتوان‌شدن عضو رصد کرد. به همین منظور در این قسمت، بر اساس مقادیر شاخص خسارت پارک و انگ که خود برنامه قادر به محاسبه و ارائه آن است، پنج سناریوی خرابی در ساختمان بررسی شد. انتخاب مقدار شاخص با توجه به دسته‌بندی سطوح خسارت پارک صورت گرفت. در سناریوی مورد نظر، وضعیت خسارت در طبقات نیز مشخص شد و به کمک آن طبقه یا طبقات با خرابی بیشتر مشخص گردید. در شکل‌های ۶ تا ۸، مشخصات خرابی اعضا در هر سناریوی خرابی بر اساس مقادیر شاخص پارک روی عضو مشخص شده است.

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 0.00 (0.00) 10.00 (.01) | 0.00 (0.00) 10.00 (.46) | 0.00 (0.00) 10.00 (.51) | 10.00 (.01) | 0.00 (0.00) 10.00 (.01) | 0.00 (0.00) 10.00 (.47) | 0.00 (0.00) 10.00 (.52) | 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.47) | 0.00 (0.00) 10.00 (.52) | 10.00 (.00) | |
| 0.01 (0.03) 10.05 (.15) | 0.00 (0.01) 10.04 (.30) | 0.00 (0.01) 10.04 (.33) | 10.06 (.17) | 0.01 (0.01) 10.14 (.16) | 0.00 (0.00) 10.09 (.32) | 0.00 (0.00) 10.09 (.33) | 10.14 (.17) | 0.02 (0.01) 10.24 (.16) | 0.00 (0.00) 10.15 (.33) | 0.00 (0.00) 10.15 (.33) | 10.24 (.17) |
| 0.09 (0.20) 10.01 (.01) | 0.05 (0.15) 10.06 (.17) | 0.08 (0.23) 10.06 (.16) | 10.04 (.07) | 0.17 (0.19) 10.01 (.01) | 0.08 (0.13) 10.13 (.18) | 0.19 (0.28) 10.12 (.17) | 10.04 (.04) | 0.27 (0.20) 10.01 (.00) | 0.12 (0.12) 10.19 (.18) | 0.31 (0.30) 10.19 (.17) | 10.04 (.02) |
| 0.15 (0.19) 10.01 (.09) | 0.15 (0.19) 10.02 (.13) | 0.14 (0.18) 10.02 (.13) | 10.01 (.09) | 0.27 (0.19) 10.02 (.09) | 0.27 (0.19) 10.04 (.13) | 0.26 (0.18) 10.04 (.13) | 10.02 (.09) | 0.40 (0.19) 10.03 (.09) | 0.41 (0.19) 10.07 (.13) | 0.39 (0.18) 10.07 (.13) | 10.04 (.09) |

Sen1: DI=0.079

Sen2: DI=0.15

Sen3: DI=0.234

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0.00 (0.00) 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.45) | 0.00 (0.00) 10.00 (.50) | 10.00 (.05) | 0.00 (0.00) 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.43) | 0.00 (0.00) 10.00 (.47) | 10.00 (.09) | 0.00 (0.00) 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.00) |
| 0.02 (0.01) 10.38 (.17) | 0.00 (0.00) 10.23 (.33) | 0.00 (0.00) 10.23 (.33) | 10.38 (.17) | 0.02 (0.00) 10.60 (.17) | 0.01 (0.00) 10.37 (.32) | 0.00 (0.00) 10.37 (.32) | 10.59 (.18) | 0.02 (0.00) 10.64 (.21) | 0.01 (0.00) 10.29 (.13) | 0.00 (0.00) 10.74 (.30) |
| 0.41 (0.20) 10.01 (.00) | 0.18 (0.13) 10.28 (.17) | 0.49 (0.31) 10.28 (.17) | 10.04 (.02) | 0.64 (0.21) 10.01 (.00) | 0.29 (0.13) 10.43 (.17) | 0.74 (0.30) 10.43 (.17) | 10.08 (.02) | 0.92 (0.19) 10.08 (.08) | 0.93 (0.19) 10.15 (.13) | 0.90 (0.18) 10.15 (.13) |
| 0.60 (0.19) 10.05 (.09) | 0.61 (0.19) 10.10 (.13) | 0.58 (0.18) 10.10 (.13) | 10.05 (.09) | 0.92 (0.19) 10.08 (.08) | 0.93 (0.19) 10.15 (.13) | 0.90 (0.18) 10.15 (.13) | 10.08 (.08) | | | |

Sen4: DI=0.353

Sen5: DI=0.545

شکل ۶: سناریوهای خرابی در مدل شماره ۱ بر اساس مقادیر شاخص خسارت کلی پارک و انگ.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 0.00 (0.00) 10.00 (.00) | 0.00 (0.01) 10.00 (.25) | 0.00 (0.00) 10.00 (.73) | 10.00 (.01) | 0.00 (0.00) 10.00 (.01) | 0.00 (0.00) 10.00 (.29) | 0.00 (0.00) 10.00 (.69) | 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.01) | 0.00 (0.00) 10.00 (.34) | 0.00 (0.00) 10.00 (.65) | 0.00 (0.00) 10.00 (.36) | 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.63) | 10.00 (.00) | |
| 0.01 (0.03) 10.04 (.16) | 0.00 (0.00) 10.03 (.31) | 0.00 (0.00) 10.03 (.31) | 10.04 (.19) | 0.01 (0.01) 10.15 (.19) | 0.00 (0.00) 10.10 (.31) | 0.00 (0.00) 10.10 (.30) | 10.15 (.19) | 0.01 (0.01) 10.26 (.19) | 0.00 (0.00) 10.17 (.31) | 0.00 (0.00) 10.18 (.30) | 0.27 (0.19) 10.38 (.19) | 10.25 (.30) | 0.01 (0.00) 10.38 (.19) | 0.00 (0.00) 10.24 (.31) | 0.00 (0.00) 10.25 (.30) | 10.38 (.19) |
| 0.08 (0.14) 10.00 (.00) | 0.01 (0.05) 10.06 (.26) | 0.06 (0.22) 10.06 (.25) | 10.03 (.08) | 0.25 (0.13) 10.01 (.00) | 0.01 (0.02) 10.18 (.27) | 0.24 (0.28) 10.17 (.27) | 10.04 (.09) | 0.40 (0.13) 10.01 (.00) | 0.01 (0.01) 10.29 (.27) | 0.37 (0.29) 10.29 (.27) | 0.04 (0.02) 10.04 (.02) | 10.01 (.00) | 0.56 (0.13) 10.01 (.00) | 0.02 (0.01) 10.41 (.27) | 0.53 (0.30) 10.40 (.27) | 10.04 (.02) |
| 0.11 (0.32) 10.00 (.00) | 0.11 (0.32) 10.01 (.02) | 0.11 (0.32) 10.01 (.02) | 10.01 (.01) | 0.28 (0.33) 10.00 (.00) | 0.28 (0.33) 10.01 (.01) | 0.27 (0.32) 10.01 (.01) | 10.01 (.01) | 0.44 (0.33) 10.01 (.00) | 0.45 (0.33) 10.01 (.00) | 0.43 (0.32) 10.01 (.00) | 0.02 (0.01) 10.02 (.01) | 10.02 (.00) | 0.61 (0.33) 10.02 (.00) | 0.62 (0.33) 10.01 (.00) | 0.59 (0.32) 10.01 (.00) | 10.03 (.01) |
| 0.13 (0.17) 10.02 (.10) | 0.13 (0.17) 10.03 (.14) | 0.13 (0.17) 10.03 (.14) | 10.02 (.11) | 0.30 (0.17) 10.04 (.10) | 0.29 (0.17) 10.06 (.14) | 0.30 (0.17) 10.06 (.14) | 10.04 (.10) | 0.46 (0.17) 10.10 (.14) | 0.46 (0.17) 10.10 (.14) | 0.46 (0.17) 10.10 (.14) | 0.06 (0.10) 10.06 (.10) | 10.06 (.10) | 0.63 (0.17) 10.08 (.10) | 0.63 (0.17) 10.13 (.14) | 0.63 (0.17) 10.13 (.14) | 10.08 (.10) |

Sen1: DI=0.08

Sen2: DI=0.19

Sen3: DI=0.315

Sen4: DI=0.437

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 0.00 (0.00) 10.00 (.01) | 0.00 (0.00) 10.00 (.40) | 0.00 (0.00) 10.00 (.59) | 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.00) | 0.00 (0.00) 10.00 (.30) | 0.00 (0.00) 10.00 (.30) | 10.56 (.21) | 0.90 (0.14) 10.01 (.00) | 0.02 (0.01) 10.64 (.27) | 0.75 (0.27) 10.63 (.27) | 10.14 (.04) |
| 0.95 (0.33) 10.04 (.01) | 0.96 (0.33) 10.01 (.00) | 0.93 (0.32) 10.01 (.00) | 10.05 (.01) | 0.98 (0.17) 10.12 (.10) | 0.98 (0.17) 10.21 (.14) | 0.98 (0.17) 10.21 (.14) | 10.12 (.10) | | | | |

Sen5: DI=0.678

شکل ۷: سناریوهای خرابی در مدل شماره ۲ بر اساس مقادیر شاخص خسارت کلی پارک و انگ.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| 0.00 (0.07) (.26) | 0.00 (0.10) (.43) | 10.00 (.14) | 0.00 (0.15) (.20) | 0.00 (0.03) (.38) | 10.00 (.24) | 0.00 (0.19) (.40) | 0.00 (0.01) (.28) | 10.00 (.12) | 0.00 (0.16) (.23) | 0.00 (0.07) (.39) | 10.00 (.16) | 0.00 (0.08) (.23) | 0.00 (0.10) (.44) | 10.00 (.14) |
| 0.00 (0.25) (.02) | 0.00 (0.07) (.56) | 10.00 (.09) | 0.00 (0.20) (.09) | 0.00 (0.05) (.52) | 10.00 (.15) | 0.01 (0.04) (.26) | 0.01 (0.07) (.45) | 10.00 (.19) | 0.01 (0.03) (.25) | 0.01 (0.07) (.45) | 10.01 (.21) | 0.01 (0.04) (.23) | 0.01 (0.06) (.45) | 10.01 (.22) |
| 0.01 (0.28) (.02) | 0.01 (0.33) (.24) | 10.00 (.13) | 0.01 (0.26) (.01) | 0.01 (0.32) (.24) | 10.01 (.18) | 0.01 (0.20) (.06) | 0.03 (0.14) (.34) | 10.04 (.25) | 0.03 (0.07) (.22) | 0.01 (0.05) (.38) | 10.14 (.28) | 0.03 (0.04) (.26) | 0.02 (0.03) (.39) | 10.28 (.28) |
| 0.02 (0.32) (.04) | 0.02 (0.27) (.20) | 10.02 (.16) | 0.03 (0.11) (.21) | 0.03 (0.10) (.34) | 10.10 (.24) | 0.06 (0.08) (.24) | 0.06 (0.08) (.36) | 10.35 (.24) | 0.17 (0.15) (.20) | 0.18 (0.15) (.30) | 10.44 (.20) | 0.32 (0.21) (.17) | 0.34 (0.20) (.25) | 10.52 (.17) |
| 0.05 (0.47) (.00) | 0.05 (0.48) (.03) | 10.00 (.02) | 0.16 (0.49) (.00) | 0.17 (0.49) (.01) | 10.01 (.01) | 0.47 (0.49) (.00) | 0.52 (0.50) (.01) | 10.01 (.00) | 0.69 (0.49) (.00) | 0.76 (0.50) (.00) | 10.01 (.00) | 0.94 (0.49) (.00) | 1.03 (0.50) (.00) | 10.01 (.00) |
| 0.05 (0.24) (.16) | 0.06 (0.24) (.20) | 10.01 (.16) | 0.17 (0.22) (.17) | 0.18 (0.22) (.23) | 10.02 (.16) | 0.48 (0.22) (.17) | 0.53 (0.22) (.24) | 10.06 (.16) | 0.70 (0.22) (.17) | 0.77 (0.22) (.24) | 10.18 (.16) | 0.95 (0.22) (.17) | 1.04 (0.22) (.24) | 10.11 (.16) |

Sen1:DI=0.032

Sen2:DI=0.105

Sen3:DI=0.3

Sen4:DI=0.446

Sen5:DI=0.602

شکل ۸: سناریوهای خرابی در مدل شماره ۳ بر اساس مقادیر شاخص خسارت کلی پارک و انگ.

به عنوان مثال، با توجه به شکل ۶، سقف‌های اول و دوم در مدل اول، از دو سقف دیگر این مدل آسیب بیشتری دیده‌اند. همچنین در این مدل سقف اول نسبت به سقف دوم، خسارت بیشتری را نشان داده است.

۴-۳- دریافت اطلاعات متناظر با هر سناریوی خرابی و بررسی آسیب

با توجه به تفاوت میزان آسیب فرض شده در سناریوهای خرابی مختلف، اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه شاخص‌های خسارت مودال و غیرمودال در هر سناریوی خرابی تغییر می‌کنند. پس از دسته‌بندی سناریوهای خرابی، از یک سو به کمک نتایج حاصل از تحلیل بارافزون، داده‌های مورد نیاز برای محاسبه شاخص رافایل و میر و شاخص دریافت TDR و IDR که در بخش‌های قبلی تعریف شدند، در هر سناریو جمع‌آوری شده و میزان خسارت به صورت عددی توسط این شاخص‌ها محاسبه شد. از سوی دیگر اطلاعات مودال سازه، شامل بردارهای شکل مود و فرکانس سه مود اول سازه در هر سناریوی خرابی جمع‌آوری شده و با مقادیر متناظر سازه آسیب‌ن دیده مقایسه می‌شود.

همچنین با محاسبه شاخص‌های تعیین خسارت کلی سازه، ارتباط بین شاخص‌های کلی رافایل و میر و شاخص کلی پارک و انگ و نیز دریافت کلی TDR به عنوان شاخص‌های خسارت کلی بررسی شد. در بخش دیگر مطالعه، بررسی خسارت در مقیاس طبقه انجام شد. بر این اساس شاخص پارک و انگ در مورد طبقات بر اساس شاخص خسارت تیرها و ستون‌های هر طبقه و نیز دریافت میان طبقه IDR از یک سو و شاخص نرمی و طبقه مودال از سوی دیگر مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی بیشتر در خصوص میزان همبستگی بین نتایج دریافتی از شاخص‌های طبقه، از ضریب همبستگی پیرسون نیز استفاده شد. [۲۶] ضریب پیرسون بین دو دسته از متغیرهای x و y به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_{pearson} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

در این رابطه، \bar{x} و \bar{y} میانگین داده‌های x_i و y_i و n تعداد زوج مرتب‌های (x_i, y_i) را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ضریب پیرسون بیشتر از ۰/۷ نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی بین دو مجموعه از داده‌ها می‌باشد. [۲۶]

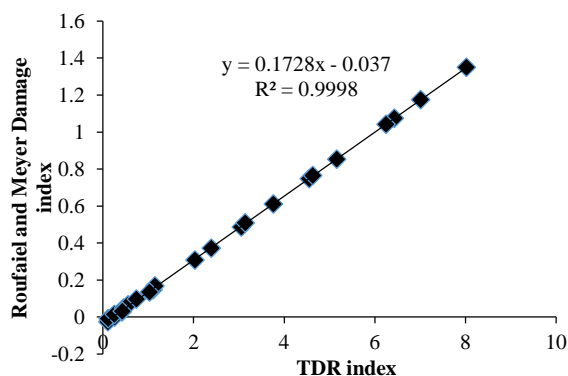
۴- نتایج و بررسی

۴-۱- شاخص خسارت کلی

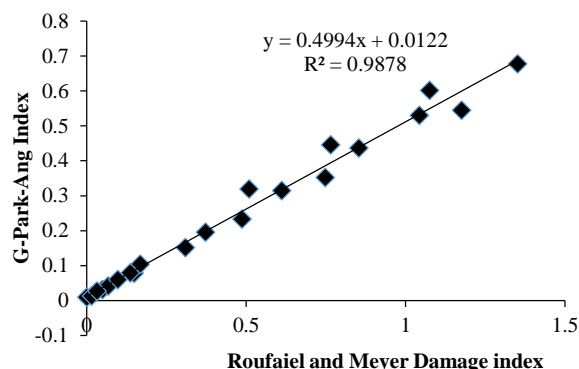
از شاخص خسارت کلی پارک و انگ، شاخص دریافت TDR و نیز شاخص رافایل و میر به عنوان شاخص خسارت کل سازه جهت اعلام وضعیت آسیب در مدل‌های مورد مطالعه استفاده شد. بر اساس شکل‌های ۹ تا ۱۱، نتایج نشان می‌دهد زمانی که شاخص رافایل مقدار ۱ یا همان خسارت ۱۰۰ درصد را اعلام می‌کند، مقدار شاخص پارک متوسط ۵۰ درصد را اعلام کرده است. بر اساس نتایج که در جدول شماره ۵ و شکل ۱۲ ارائه شده، سطوح عملکرد FEMA، در محدوده خسارت تا ۰/۴ بر اساس شاخص پارک و انگ قرار دارند. با توجه به نتایج، می‌توان عنوان کرد که سطوح عملکرد پیشنهادی دستورالعمل FEMA از منظر معیار خسارت با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان ارائه شده که مقدار این حاشیه اطمینان با تغییر سطح عملکرد سازه به سمت سطوح با آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای بیشتر، افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که در سطوح خسارت کم و ناچیز بر اساس شاخص پارک، مقدار شاخص رافایل نیز تقریباً مشابه است که با توجه به فرمول ساده این شاخص که پیچیدگی محاسباتی زیادی ندارد، یک مزیت به حساب می‌آید.

جدول ۵: نتایج شاخص‌های خسارت در سطوح عملکرد FEMA

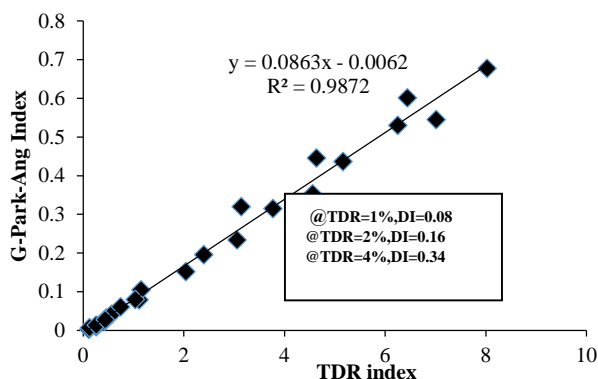
| مقدار شاخص TDR | مقدار شاخص رافایل و میر | مقدار شاخص پارک و انگ | سطوح عملکرد متناظر بر اساس دستور FEMA |
|----------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| ۰/۰۱ | ۰/۱۴ | ۰/۰۸ | IO |
| ۰/۰۲ | ۰/۳۱ | ۰/۱۶ | LS |
| ۰/۰۴ | ۰/۶۵ | ۰/۳۴ | CP |



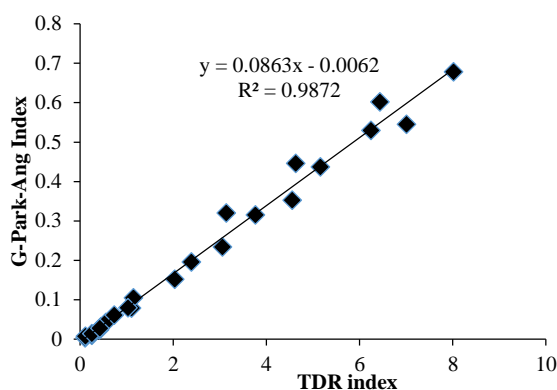
شکل ۱۰: مقایسه بین نتایج شاخص رافایل و میر و شاخص TDR.



شکل ۹: مقایسه بین نتایج شاخص رافایل و میر و شاخص پارک و انگ.



شکل ۱۲: مقادیر شاخص خسارت پارک و انگ در سطوح عملکرد FEMA.



شکل ۱۱: مقایسه بین شاخص خسارت پارک و انگ و شاخص TDR.

بر اساس همبستگی مناسب بین داده‌های حاصل از مقایسه شاخص‌های خسارت کلی سازه می‌توان گفت که روابط (۱۸) تا (۲۰) بین آنها قابل بیان است. به کمک روابط مذکور می‌توان با داشتن تنها اطلاعات تغییر مکانی سازه مقدار شاخص خسارت را محاسبه کرد.

$$DI_{\text{park\&ang}} = 0.4994DI_{\text{Roufaiel\&meyer}} + 0.0122 \quad (18)$$

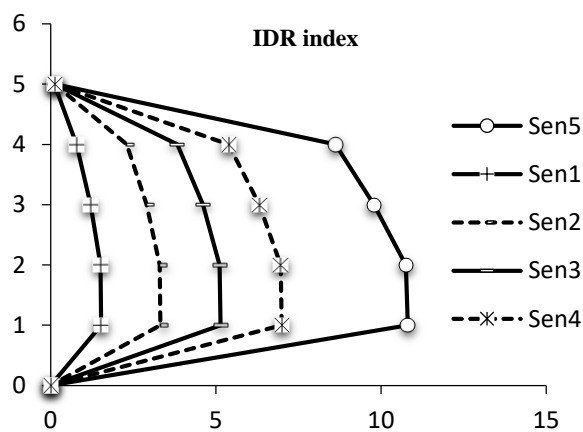
$$DI_{\text{park\&ang}} = 0.0863TDR - 0.0062 \quad (19)$$

$$DI_{\text{Roufaiel\&meyer}} = 0.1728TDR - 0.037 \quad (20)$$

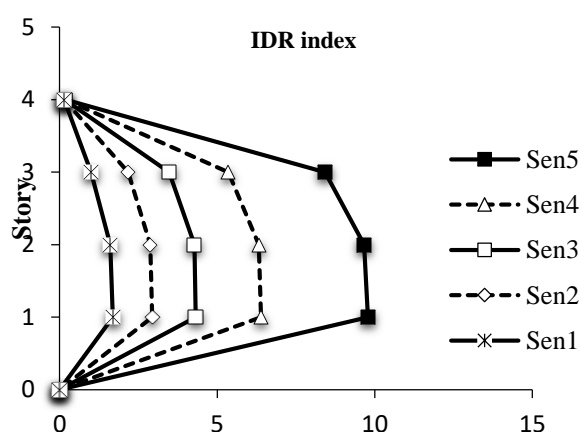
۴-۲- شاخص خسارت در مقیاس طبقه

۴-۲-۱ بررسی ارتباط بین شاخص‌های IDR و پارک

جهت شناسایی طبقه آسیب‌دیده و تخمین میزان آسیب آن از دو دسته شاخص خسارت مودال و غیرمودال استفاده شد. به کمک داده‌های موجود در هر سناریوی خرابی، شاخص‌های خسارت طبقه محاسبه شد و نمودار تغییرات شاخص در طبقات رسم گردید تا به کمک آن بتوان در خصوص مشخص کردن طبقه یا طبقات با آسیب بیشتر اظهار نظر کرد. بر اساس شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، تغییرات مقدار شاخص خسارت IDR در برابر شماره طبقه مورد نظر در قاب‌های مورد مطالعه و در سناریوهای خرابی مختلف ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج شاخص‌های خسارت مشخص شد که در تمام قاب‌ها، در تمام سناریوهای آسیب، تیرهای دو سقف اول بیشترین آسیب را تجربه کردند. این نتیجه در تمام سناریوهای خرابی صادق است و نقاط اوج منحنی تغییرات شاخص IDR در نمودارهای شکل ۱۳ تا ۱۵ این نتیجه را نشان می‌دهد.

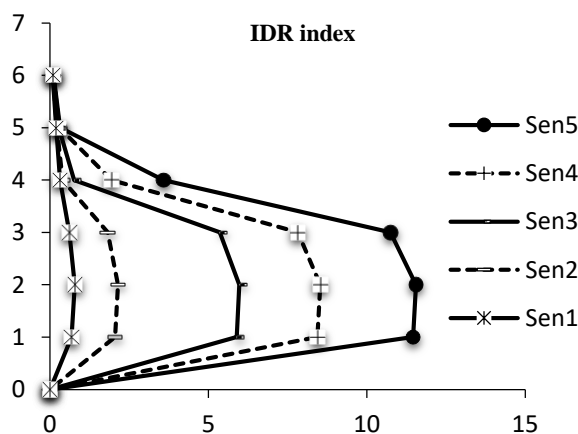


شکل ۱۴: خسارت در طبقات مدل شماره ۲ بر اساس شاخص IDR.



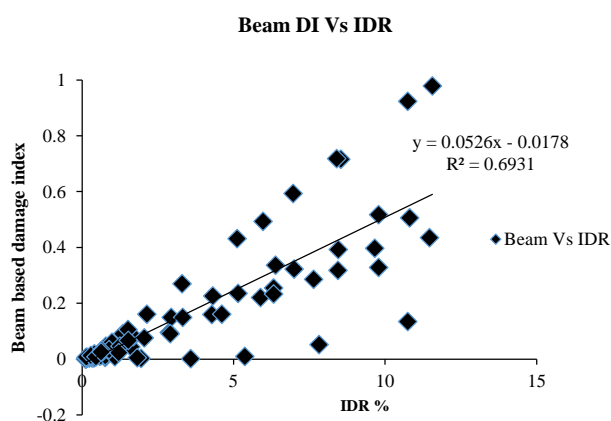
شکل ۱۳: خسارت در طبقات مدل شماره ۱ بر اساس شاخص IDR.

بر اساس شکل ۱۳، در قاب ۴ طبقه، به عنوان مدل اول، سقف اول نسبت به سقف دوم، با اختلاف بسیار کمی مقدار آسیب بیشتری را تجربه کرده است. با توجه به شکل ۶، بر اساس مقادیر شاخص پارک و انگ در تیرهای طبقات، در تمام سناریوهای خرابی، سقف اول و دوم ساختمان مقدار آسیب بیشتری را تجربه کرده‌اند که سهم سقف اول بیشتر از سقف دوم است. با توجه به شکل ۱۴، در قاب ۵ طبقه، به عنوان مدل دوم، سقف اول و سقف دوم، تقریباً به مقدار یکسانی آسیب را تجربه کرده‌اند که سهم سقف اول اندکی بیشتر است. بر اساس مقادیر شاخص پارک و انگ تیرهای طبقات (شکل شماره ۷) نیز این نتیجه را تایید می‌کند. نتایج حاصله در خصوص مدل‌های اول و دوم در مورد مدل سوم نیز صادق است و بر اساس شکل ۱۵ در مدل شماره ۳ نیز بر اساس شاخص IDR در مقایسه با نتایج شاخص تیرهای طبقه پارک، موقعیت طبقه آسیب‌دیده به درستی نمایش داده می‌شود. باید به این نکته توجه شود که شاخص پارک در مقیاس طبقه‌ای بر اساس میانگین خسارت تیرها و ستون‌های هر طبقه قابل بیان است. در بررسی‌های ابتدایی صورت گرفته روی مدل‌ها، این نتیجه حاصل می‌شود که شاخص خسارت IDR هماهنگی مشخصی با شاخص ستون‌های طبقه پارک و انگ در خصوص شناسایی طبقه آسیب‌دیده ندارد.

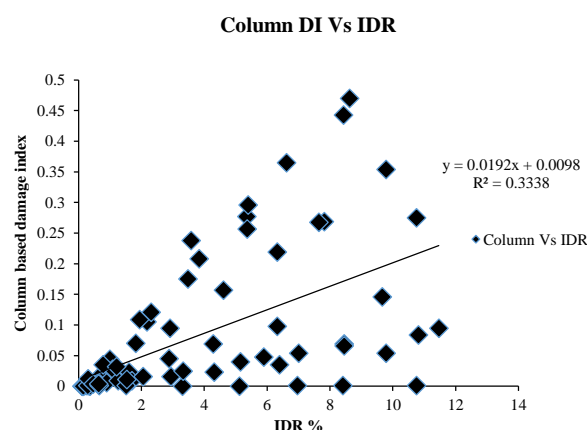


شکل ۱۵: خسارت در طبقات مدل شماره ۳ بر اساس شاخص IDR.

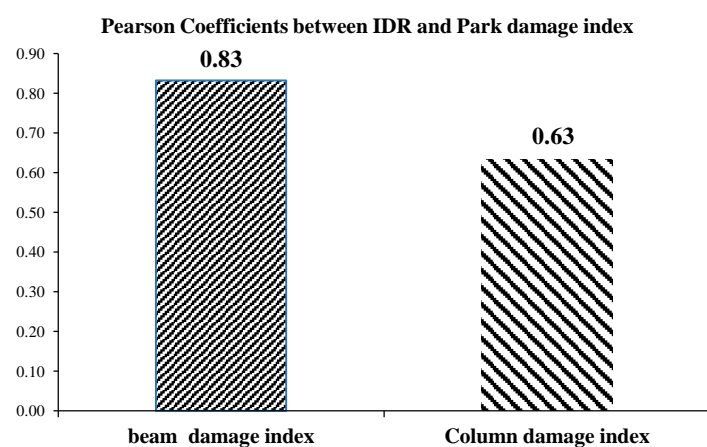
ازین حیث لازم است تا ارتباط بین مقادیر به صورت کمی و به کمک ابزارهای آماری نیز بررسی شود. لذا در ادامه با نمایش همبستگی بین داده‌های حاصل از سه مدل، رابطه بین تغییرات مقدار شاخص IDR و شاخص‌های طبقه پارک تعیین شد.



شکل ۱۷: ارتباط بین شاخص تیرهای طبقه پارک و انگ و شاخص IDR.



شکل ۱۶: ارتباط بین شاخص ستون‌های طبقه پارک و انگ و شاخص IDR.



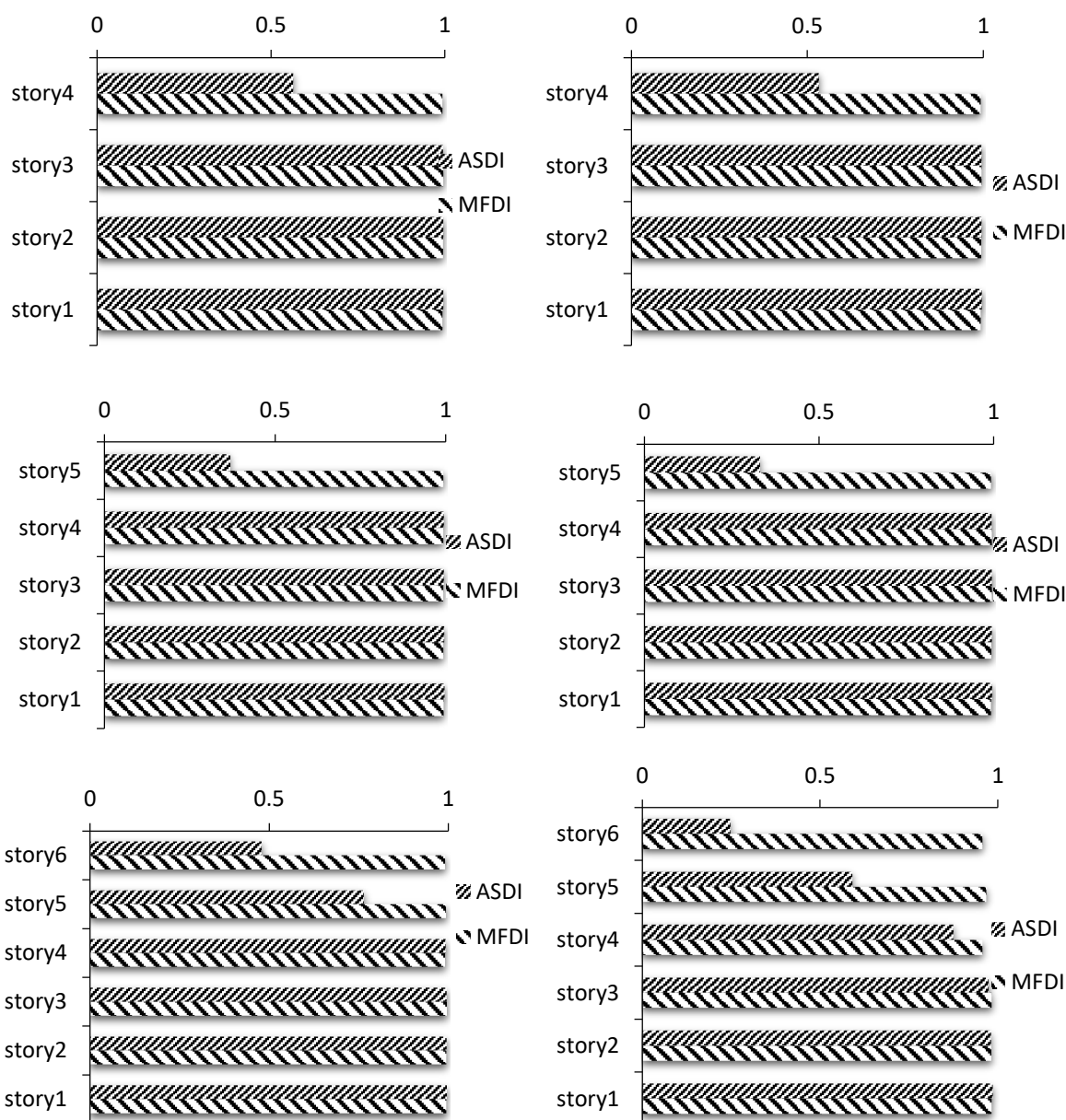
شکل ۱۸: مقایسه ضریب پیرسون بین شاخص IDR و شاخص‌های تیر و ستون طبقه پارک.

بر اساس شکل های ۱۶ الی ۱۸، مشخص شده که پراکندگی داده‌های مربوط به خرابی ستون‌ها در برابر تغییرات شاخص IDR نسبت به تیرهای طبقه بیشتر است. دلیل این موضوع را می‌توان در فلسفه طراحی آیین‌های ساختمانی جست‌وجو کرد و آن هم تقدم آسیب‌دیدگی تیرهای طبقه نسبت به ستون‌هاست. به عبارت دیگر، در سازه‌هایی که بر اساس اصول آیین‌نامه‌ای طراحی شده‌اند، همزمان با افزایش دررفت طبقات در اثر بار جانبی، تمایل وقوع آسیب در تیرهای طبقات بیشتر از ستون‌های طبقه است. همچنین با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون مقایسه بین همبستگی داده‌های خرابی تیرها و ستون‌های طبقه و نیز شاخص دررفت IDR انجام شد و نتایج نشان داد که مقدار این ضریب در تیرهای طبقه بالای ۰/۷۰ (وجود همبستگی قوی بین داده‌ها) و بیشتر از مقدار آن در ستون‌هاست.

۲-۲-۴ بررسی ارتباط بین شاخص‌های مودال و پارک

در ابتدا جهت نمایش عملکرد شاخص‌های مودال MFDDI و ASDI که پیش از این معرفی شدند، با توجه به اطلاعات مودال استخراج شده از مدل‌های عددی، قبل از وقوع آسیب و نیز پس از آسیب بر اساس سناریوهای خرابی طبقه‌بندی شده، مقادیر این شاخص‌ها محاسبه شدند. جهت اختصار در نمایش نتایج، فقط نتایج مربوط به سناریوی اول و پنجم هر یک از مدل‌ها به کمک نمودار میله ای به نمایش درآمده است. آنچه که بر اساس شکل های ۱۹ و ۲۰ مشخص است، هر دو شاخص توانسته‌اند طبقات با آسیب بیشتر را شناسایی کنند، البته با ذکر این نکته که شاخص MFDDI طبقات آخر قاب‌ها که خسارت خاصی را تجربه نکرده را نیز آسیب‌دیده شناسایی کرده است. همچنین شاخص ASDI توانسته طبقات با آسیب ناچیز را با وضوح بهتری نسبت به طبقات آسیب‌دیده متمایز نماید. از طرف دیگر، با توجه به این موضوع که هر دو شاخص مودال در بازه‌ای بین صفر و یک قادرند تا خسارت را اعلام نمایند، از روی شکل‌ها مشخص است که در

مورد سناریوهای خرابی رخ داده بر اساس اطلاعات تحلیل بارافزون و دسته‌بندی شاخص پارک، هر دو شاخص نتایج را در محدوده بین ۰/۹ تا ۱ ارائه داده‌اند. به عبارت دیگر در تمام سناریوها، وضعیت آسیب‌دیدگی بسیار بالا است که در مقایسه با نتایج شاخص پارک تفاوت دارد. این موضوع حتی در سناریوی اول که شاخص پارک کمتر از ۰/۱ بوده نیز صادق است. به عبارت دیگر این شاخص‌ها در ارائه خسارات بر اساس آسیب‌های لرزه‌ای واقعی، در ارائه نتایج دارای بزرگنمایی هستند. در نتیجه می‌توان گفت که بین دو شاخص مودال معرفی شده، شاخص MFDI نتوانست توانایی کافی در تشخیص آسیب را نشان دهد، چرا که علاوه بر حساسیت کم خود نسبت به تغییرات آسیب، طبقه سالم را هم به عنوان طبقه آسیب‌دیده شناسایی می‌کند.



شکل ۱۹: مقایسه نتایج شاخص خسارت ASDI و MFDI در سناریوی اول.

شکل ۲۰: مقایسه نتایج شاخص خسارت ASDI و MFDI در سناریوی پنجم.

۴-۲-۳ ارائه شاخص خسارت جدید

اگر ϕ به عنوان بردار شکل مود نرمالیز شده نسبت به جرم مود دلخواهی از ارتعاش یک سازه بوده و ω فرکانس مود مورد نظر باشد، نرمی مودال در محل یا طبقه دلخواه i یک سازه را می‌توان به صورت مجموع رابطه (۱۱) نوشت. با توجه به این که اندازه‌گیری بردار شکل مود در عمل کار دشواری است، از سه مود اول استفاده می‌شود. از طرف دیگر، نیروی معادل استاتیکی مود دلخواه n یک سازه با جرم m به صورت رابطه (۲۱) نوشته می‌شود:

$$f_n = m\omega_n^2\phi_n \quad (21)$$

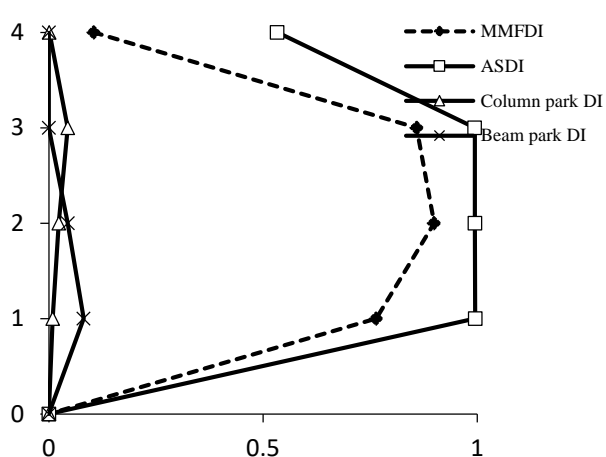
در بحث تشخیص طبقه آسیب‌دیده، از بحث تعبیر فیزیکی می‌توان گفت که $\omega_n^2\phi_n$ به عنوان شتاب در نظر گرفته شده است. اگر بر اساس روابط فیزیکی، عبارت شتاب با $\omega_n\phi_n$ تغییر یابد که در آن ϕ_n مشتق اول بردار شکل مود بوده، با ضرب نرمی در نیرو که تعبیر فیزیکی جابه‌جایی دارد، می‌توان شاخص خسارت MMFDI را به صورت رابطه (۲۲) برای طبقه دلخواه s تعریف کرد:

$$MMFDI_s = 1 - \frac{(\sum_{j=1}^{N_m} \frac{\phi_{sj}(\phi_{sj})^2}{\omega_j})_{undamaged}}{(\sum_{j=1}^{N_m} \frac{\phi_{sj}(\phi_{sj})^2}{\omega_j})_{damaged}} \quad (22)$$

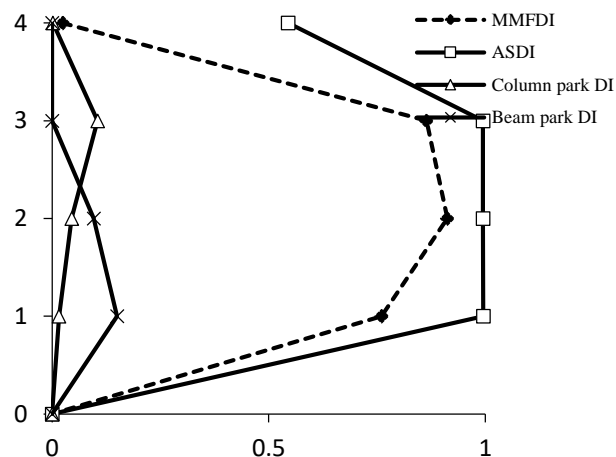
مقدار این شاخص بین صفر (بدون خسارت) تا یک (خرابی کامل) متغیر است. در این رابطه اندیس j به تعداد مود انتخابی بستگی داشته و ϕ_{sj} به عنوان مشتق اول بردار شکل مود نرمالیز شده نسبت به ماتریس جرم، در طبقه دلخواه s و در مود j خواهد بود. برای محاسبه مشتق اول بردار شکل مود، از روش عددی استفاده می‌شود. بر این اساس اگر i به عنوان نقطه مورد محاسبه مشتق بردار شکل مود و h فاصله بین نقاط اندازه‌گیری باشد، مشتق اول بردار ϕ_i که با ϕ_i نمایش داده می‌شود، به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود:

$$\phi_i = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{h} \quad (23)$$

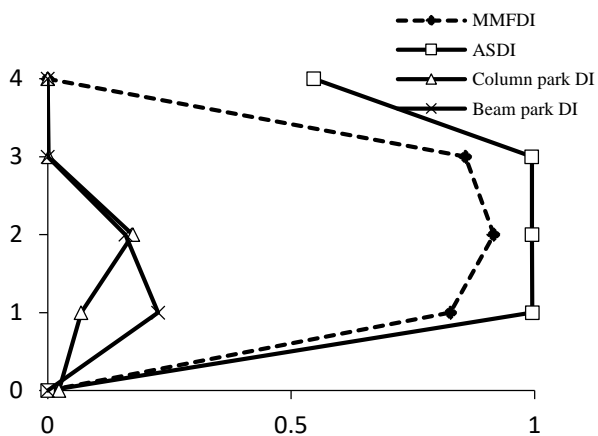
برای بررسی دقت شاخص تعریف شده MMFDI، در تمام سناریوهای خرابی، این شاخص در تراز طبقات محاسبه شده و در یک دستگاه مختصاتی در مقایسه با شاخص ASDI و شاخص‌های تیر و ستون طبقه پارک نشان داده شده است. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که شاخص MMFDI توانسته است تا طبقات سالم را با وضوح بسیار خوبی نسبت به طبقات آسیب‌دیده متمایز نماید. شاخص پارک و انگ بر اساس تیرهای طبقات هم این نتایج را تایید کرده است. این شاخص نسبت به شاخص ASDI، طبقات آسیب‌دیده را با بزرگنمایی بیشتری مشخص کرده است. همانگونه که مشخص است، هم در سناریوهای با میزان خرابی کم و هم در سناریوهای آسیب شدید، طبقات آسیب‌دیده به وضوح قابل تشخیص هستند. با توجه به این که برای محاسبه شاخص‌های خسارت طبقه پارک باید شدت خرابی در یکایک تیرها و ستون‌های طبقه مورد نظر مشخص باشد و از این رو دشواری محاسباتی زیادی دارد، لذا با استفاده از این شاخص و تنها با اطلاع از اطلاعات مودی قبل از آسیب و پس از آن می‌توان راجع به خسارت اظهار نظر کرد و طبقات سالم و غیرسالم را از هم متمایز کرد. شکل‌های صفحات بعد، نتایج را برای سه قاب مورد مطالعه نشان داده‌اند:



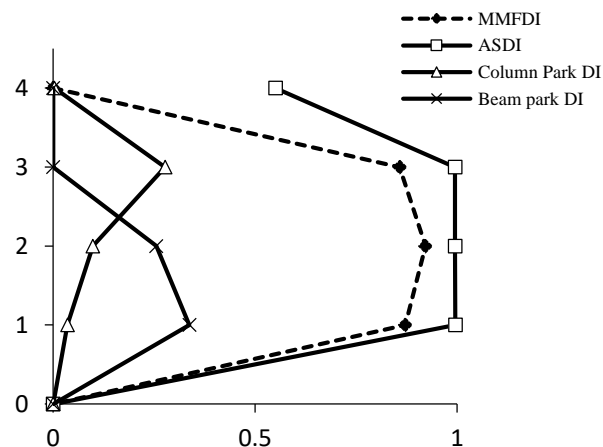
(a) Sen1 : DI=0.079



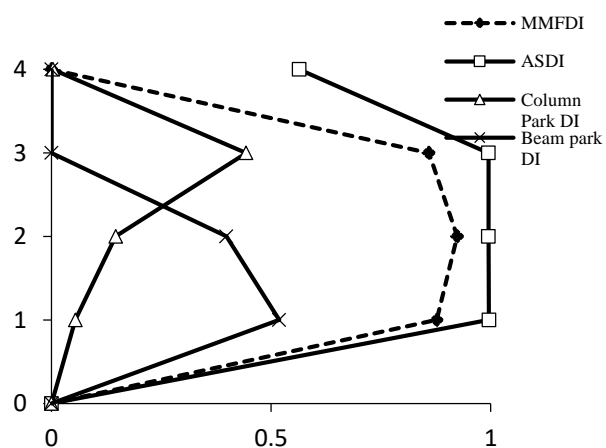
(b) Sen2 : DI=0.152



(c) Sen3 : DI=0.23

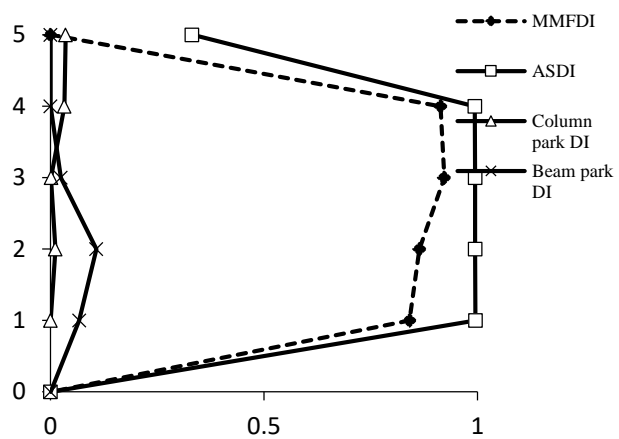


(d) Sen4 : DI=0.353

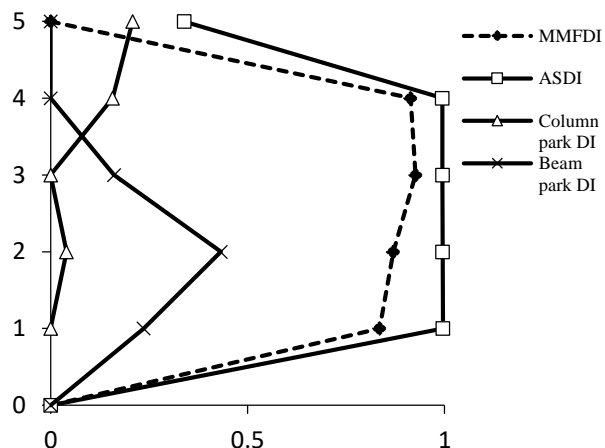


(e) Sen5 : DI=0.545

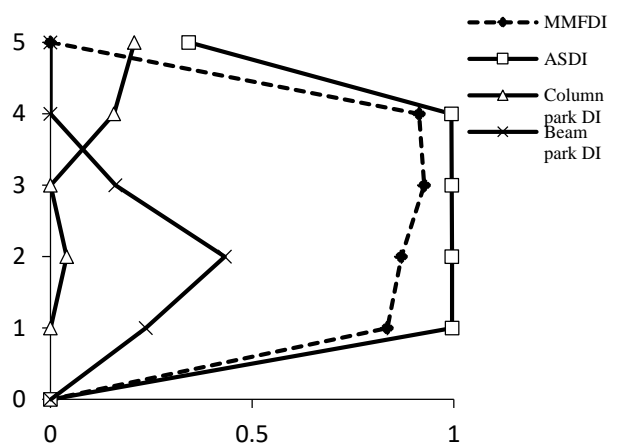
شکل ۲۱: مقایسه بین نتایج شاخص‌های خسارت ASDI و MMFDI و شاخص‌های خسارت پارک در مدل اول.



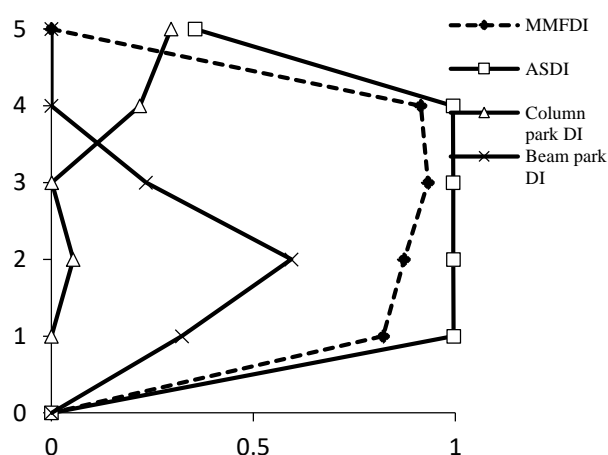
(f) Sen1 : DI=0.08



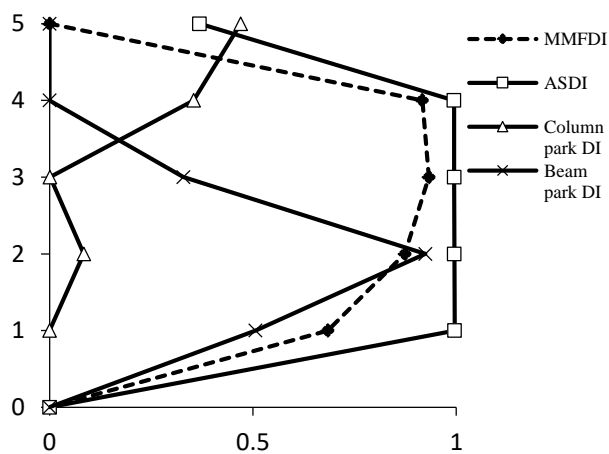
(g) Sen2 : DI=0.196



(i) Sen4 : DI=0.437

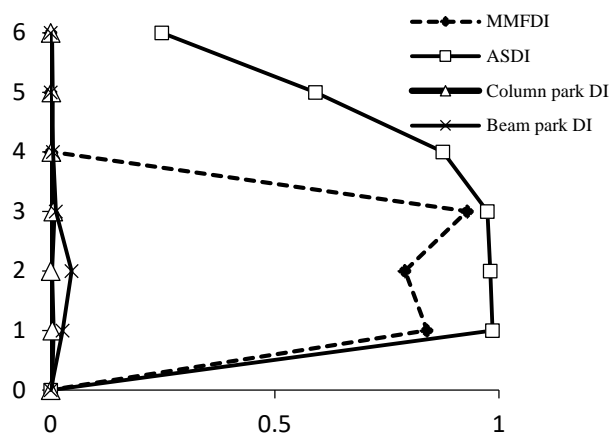


(h) Sen3 : DI=0.315

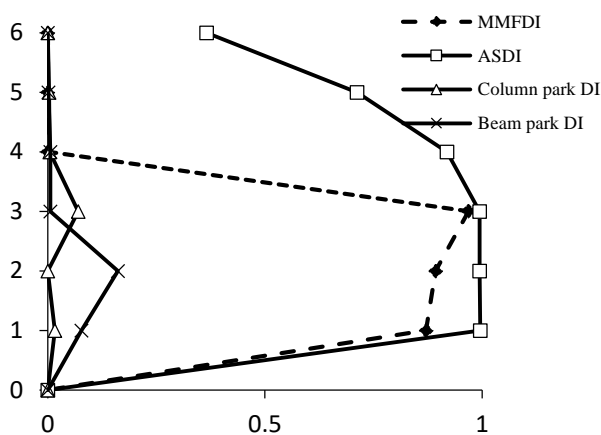


(j) Sen5 : DI=0.678

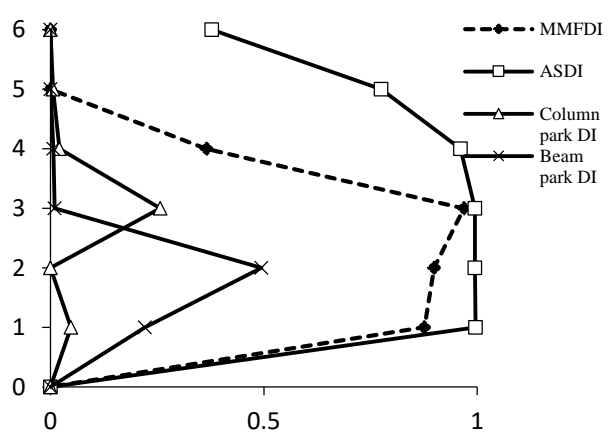
شکل ۲۲: مقایسه بین نتایج شاخص‌های خسارت MMFDI و ASDI و شاخص‌های خسارت پارک در مدل شماره ۲.



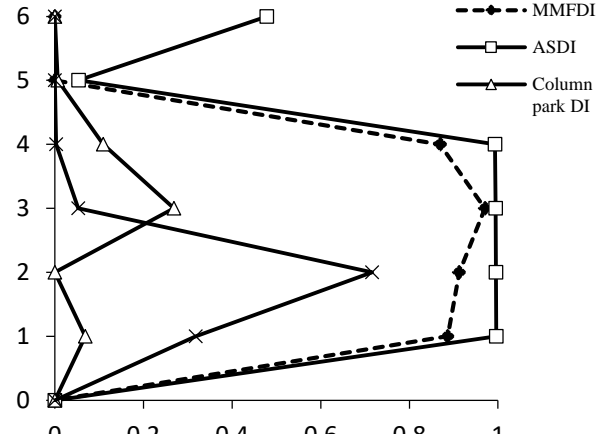
(k) Sen1 : DI=0.678



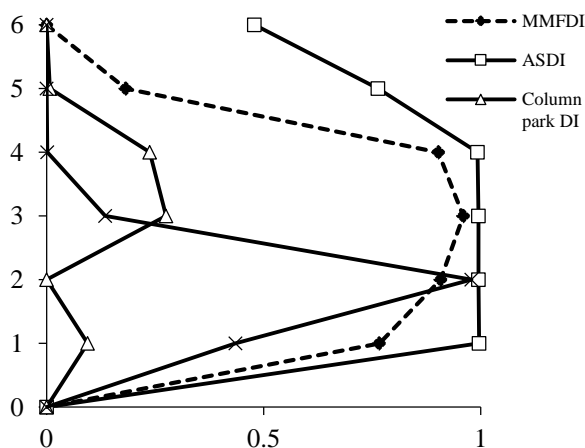
(l) Sen2 : DI=0.105



(m) Sen3 : DI=0.32



(n) Sen4 : DI=0.446



(o) Sen5 : DI=0.602

شکل ۲۳: مقایسه بین نتایج شاخص‌های خسارت ASDI و MMFDI و شاخص‌های خسارت پارک در مدل شماره ۳.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، در خصوص موضوع آسیب لرزه‌ای در قاب بتنی و کاربرد شاخص خسارت در تخمین کمی این نوع آسیب، مطالعه‌ای عددی صورت گرفت. با ساخت چند مدل عددی در برنامه IDARC و انجام تحلیل بارافزون روی آنها، ضمن صحت‌سنجی نتایج اولیه، جهت تعریف آسیب، بر اساس نتایج شاخص خسارت پارک و انگ، سناریوهای خرابی مشخص شد و در هر یک از این سناریوها، تغییرات آسیب در مدل‌ها در مقیاس کلی و طبقه‌ای به کمک شاخص‌های خسارت مبتنی بر پاسخ سازه و شاخص‌های مبتنی بر اطلاعات مودال بررسی شد. با استفاده از دسته‌بندی خروجی حاصل از بررسی‌های صورت‌گرفته، نتایج زیر حاصل شدند:

(۱) اعتبارسنجی نتایج نشان داد که فرایند ساخت مدل‌های عددی در برنامه IDARC و انجام تحلیل غیرخطی استاتیکی از میزان دقت بسیار مناسبی برخوردار بود.

(۲) در این مقاله از شاخص رافایل و میر به عنوان یکی از شاخص‌های تعیین خسارت کلی استفاده شد. این شاخص در کنار شاخص دریافت کلی TDR و شاخص پارک و انگ برای بررسی خسارت کلی سازه استفاده شد و نتایج نشان داد زمانی که مقدار شاخص رافایل به ۱ رسید، مقدار شاخص پارک حدوداً ۵۰ درصد را نشان داد. مقدار شاخص پارک بیشتر از ۰/۴ نشان‌دهنده خسارت شدید در سازه است. لذا می‌توان گفت که مقدار یک شاخص رافایل نشان‌دهنده خرابی شدید در سازه است. همچنین با توجه به نتایج می‌توان گفت که نتایج خسارت بر اساس شاخص رافایل تقریباً دو برابر مقادیر شاخص پارک است. علاوه بر این نتایج نشان داد که در سطوح خسارت کم و ناچیز بر اساس شاخص پارک، مقدار شاخص رافایل نیز تقریباً مشابه است که با توجه به فرمول‌بندی ساده این شاخص که پیچیدگی محاسباتی زیادی ندارد، در موارد عملی یک مزیت به حساب می‌آید.

(۳) نتایج نشان داد که سطوح عملکرد FEMA، در محدوده خسارت ۰ تا ۴۰ درصد بر اساس شاخص پارک و انگ قرار دارند. با توجه به نتایج، می‌توان عنوان کرد که سطوح عملکرد پیشنهادی دستور FEMA از منظر معیار خسارت با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان ارائه شده که مقدار این حاشیه با قرارگیری سازه در سطوح عملکرد توأم با خسارت سازه‌ای بیشتر، افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر، سطوح عملکرد FEMA به سازه اجازه ورود به آسیب‌های شدید را نمی‌دهند و این در حالی است که بر اساس مقادیر شاخص پارک، در میزان خسارت ۴۰ تا ۱۰۰ درصد، سطح آسیب‌دیدگی شدید است.

(۴) نتایج نشان داد که شاخص دریافت کلی TDR از همبستگی خوبی نسبت به شاخص پارک برخوردار است. این موضوع نشان می‌دهد که با داشتن اطلاعات تغییر مکانی سقف آخر یک سازه و محاسبه دریافت کلی می‌توان وضعیت آسیب در سازه را مشخص کرد.

(۵) در بررسی آسیب در طبقات، نتایج مشخص کرد که شاخص دریافت طبقه IDR بسیار خوب توانست طبقه (طبقات) آسیب‌دیده را شناسایی کند. با توجه به این که محاسبه شاخص IDR از پیچیدگی چندانی برخوردار نیست، می‌توان با رصد تغییرات سقف طبقات در زمان زلزله، طبقات آسیب‌پذیر را مشخص کرد. این موضوع به راحتی با مقایسه مقادیر شاخص پارک و انگ مربوط به تیرهای سقف و مقادیر شاخص IDR مشخص است. نتایج نشان داد که بین مقادیر خسارت بر اساس شاخص IDR و شاخص تیرهای طبقات پارک همبستگی قوی بر اساس مدل پیرسون وجود دارد.

(۶) شاخص خسارت IDR هماهنگی مشخصی با شاخص ستون‌های طبقه پارک و انگ در خصوص شناسایی طبقه آسیب‌دیده ندارد. دلیل این موضوع را می‌توان در فلسفه طراحی آیین‌نامه‌های ساختمانی جست‌وجو کرد که آن تقدم آسیب‌دیدگی تیرهای طبقه نسبت به ستون‌هاست.

(۷) بررسی نتایج خرابی بر اساس دو شاخص خسارت طبقه معتبر مودال ASDI و MFDI نشان داد که در سناریوهای تحت بررسی در این مقاله، هر دو شاخص توانسته‌اند طبقات با آسیب بیشتر را شناسایی کنند، البته با ذکر این نکته که شاخص MFDI طبقات آخر قاب‌ها که خسارت خاصی را تجربه نکرده را نیز آسیب‌دیده شناسایی کرده است. در رابطه با این موضوع، شاخص ASDI توانسته طبقات با آسیب ناچیز را با وضوح بهتری نسبت به طبقات آسیب‌دیده متمایز نماید.

(۸) در تمام سناریوهای خرابی، هر دو شاخص مودال ASDI و MFDI که در تعریف اولیه خود نتایج را بین صفر و یک اعلام می‌کنند، نتایج را در محدوده بین ۰/۹ تا ۱ ارائه داده‌اند. این موضوع حتی در سناریوهای خسارت با شدت آسیب کم هم اتفاق افتاد. به

عبارت دیگر طبق این شاخص‌ها در تمام سناریوها، وضعیت آسیب‌دیدگی بسیار بالا است که در مقایسه با نتایج شاخص پارک تفاوت دارد. به عبارت دیگر این شاخص‌ها در ارائه خسارات بر اساس آسیب‌های لرزه‌ای واقعی، در ارائه نتایج دارای بزرگنمایی هستند. در نتیجه می‌توان گفت که شاخص MFDI نتوانست دقت کافی در تشخیص آسیب را به همراه داشته باشد، چرا که علاوه بر حساسیت کم خود نسبت به تغییرات آسیب، طبقه سالم را هم به عنوان طبقه آسیب‌دیده معرفی می‌کند.

(۹) نتایج مطالعه نشان داد که شاخص MMFDI که در این مقاله ارائه شد، طبقات سالم را نسبت به طبقات آسیب‌دیده با بزرگنمایی مناسبی تمایز داده است. با توجه به این که در فرمول‌بندی این شاخص از مشتق جابه‌جایی مودال استفاده شده، نسبت به تغییر اطلاعات ورودی از حساسیت بیشتری برخوردار است. این شاخص از نظر روند شناسایی، مشابه شاخص تیرهای طبقات پارک و انگ است. همانگونه که نشان داده شد، شاخص MMFDI هم در سناریوهای با خرابی کم و هم در سناریوهای آسیب شدید، توانسته طبقات آسیب‌دیده را مشخص نماید.

(۱۰) شاخص MMFDI تنها با استفاده از اطلاعات مودی قبل و بعد از آسیب قابل محاسبه است و از این حیث نسبت به شاخص‌های خسارت طبقه پارک که بر اساس میانگین خسارت تیرها و ستون‌های طبقات محاسبه می‌گردد از دشواری محاسباتی بسیار کمتری برخوردار است.

مراجع

- [1] Structural Engineers Association of California (SEAOC), (1999). *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*. CA, USA.
- [2] Federal Emergency Management Agency (FEMA450), (2003). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions*. Washington, DC, USA.
- [3] Xue, Q. (2008). Developments and case studies of the draft code for performance-based seismic design of buildings in taiwan. In: *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- [4] Erduran, E. Ahmet, Y. (2004). Drift Based Damage Functions for Reinforced Concrete Columns. *Computers & Structures*, Volume 82, (Issues 2–3), Pages 121-130.
- [5] Ghobarah, A. (2004). On drift limits associated with different damage levels. In: *Proceedings of International Workshop on Performance-Based Seismic Design*, McMaster University, Bled.
- [6] Haselton, C, Deierlein, G. (2007). *Assessing Seismic Collapse Safety of Modern-Reinforced Concrete Moment-Frame Buildings*. Berkeley, Calif. : Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [7] Habibi, A-R. Izadpanah, M. (2012). New Method for the Design of Reinforced Concrete Moment Resisting Frames with Damage Control. *Scientia Iranica*, Volume 19, (Issues 2), Pages 234-241.
- [8] Yakut, A. Solmaz, T. (2012). Performance based Displacement Limits for Reinforced Columns under Flexure. In: *15 WCEE, LISBOA*.
- [9] Sharifi, A. Banan, M-R. and Banan, M-R. (2012). A Strain-Consistent Approach for Determination of Bounds of Ductility Damage Index for Different Performance Levels for Seismic Design of RC Frame Members. *Engineering Structures*, Volume 37, Pages 143-151.
- [10] Federal Emergency Management Agency (FEMA273). (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Retrofit of Buildings*. Washington, DC, USA.
- [11] Reinhorn, A. Hwasung, R. Sivaselvan, M. Kunnath, S. Valles, E. Madan, A. Li, C. Lobo, R. and Park, J. (2009). *IDARC 2D Version 7.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Structures*. University at Buffalo, the State University of New York:
- [12] Park YJ, Reinhorn AM, Kunnath SK (1987). *IDARC: inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall*. University at Buffalo, the State University of New York:
- [13] Cawley, P. Adams, R.D. (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies *Strain Analysis*, Volume 14, No.2, Pages 49-57.
- [14] West, W. M. (1984). Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen. In: *Proceedings of the Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*, Pages 1-6.
- [15] Leiven, N. A. J. Ewins, D. J (1988). Spatial correlation of mode shapes, the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC). In: *Proceedings of the Sixth International Modal Analysis Conference*, Vol. 1, Pages. 690–695.
- [16] Lu, Q. Ren, G. and Zhao, Y. (2002).. Multiple Damage Location with Flexibility Curvature and Relative Frequency Change for Beam Structures, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 253, (Issues 5), Pages 1101-1114.

- [17] Pandy, A. K. Biswas, M. (1994). Damage detection in structures using changes in flexibility , *Journal of Sound and Vibration*, Volume 169, (No. 1), Pages 3-17.
- [18] Ndambi, J, Vantomme, and K. Harri. (2002). Damage assessment in reinforced concrete beams using eigen frequencies and mode shape derivatives. *Engineering Structures*, Volume 24, Pages 501-515.
- [19] Wang, J-F. Lin, C-C. Yen, and S-M. (2007). A story damage index of seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape. *Engineering Structures*, Volume 29, Pages 2143-2157.
- [20] Horiuchi, k. (2014). *STRUCTURAL HEALTH MONITORING WITH THE MODAL STRAIN ENERGY METHOD DURING SEISMIC LOADING*. master of science in Civil Engineering. California State University, Sacramento.
- [21] Arfiadi, Y. Frans, R (2017). Comparative study of mode shapes curvature and damage locating vector methods for damage detection of structures , *Procedia engineering*, Volume 171, Pages 1263-1271.
- [22] Patil Jaya, Alandkar, P. M. (2016). DRIFT ANALYSIS IN MULTISTORIED BUILDING , *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY*, Volume 5, Pages 490-505.
- [23] Padgett, J. E. (2007). *Seismic Vulnerability Assessment of retrofitted bridges using probabilistic methodes*. doctorate in Civil Engineering. Georgia institute of technology.
- [24] Roufaiel, M.S.L. Meyer, C. (1987).. Analytical modeling of hysteretic behavior of Rc frames , *J. Struct. Eng*, Volume 113, Pages 429-444.
- [25] B.F. R.Pinho, M.Savoia, R, Francia, (2009). Verification of displacement-based adaptive pushover through multi-ground motion incremental dynamic analyses. *Engineering Structures*, Volume 31, (Issues 8), Pages 1789-1799.
- [26] Spiegel, M. (1992). *Theory and Problems of Statistics*. London: McGraw-Hill: Schaum Publishing.