

## تحلیل مود شکست و شاخص خرابی سازه‌های بتنی در زلزله

محمد رضا تابش پور<sup>۱\*</sup>، علی بخشی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

[tabesh\\_mreza@yahoo.com](mailto:tabesh_mreza@yahoo.com)

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: مهر ۱۳۸۷)

### چکیده

برای بررسی عملکرد واقعی ساختمان‌ها در هنگام زلزله باید تحلیل غیر خطی صورت گیرد و بیشینه تغییر مکان‌ها و محل تشکیل مفاصل پلاستیک و نحوه توزیع آن‌ها بررسی شود. یک روش بررسی وضعیت سازه موجود، استفاده از شاخص خرابی می باشد. در این مقاله در مورد نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیر خطی به منظور بررسی آسیب پذیری لرزه ای سازه های موجود بحث می شود. به منظور انجام تحلیل ها از نرم افزار تحلیل دینامیکی غیر خطی *IDARC* استفاده شده است.

**واژگان کلیدی:** مود شکست، شاخص خرابی، تحلیل دینامیکی.

## مقدمه

خرابی‌های سازه‌های هنگامی اتفاق می‌افتد که تغییر شکل‌های دائمی و بزرگ بر اثر بارهای وارده به سازه، در آن ایجاد شود. میزان و شدت خرابی لرزه‌ای به مصالح و شکل سازه بستگی دارد. خرابی سازه‌ای در سیستم‌های شکل‌پذیر، نظیر قاب‌های فولادی، به تغییر شکل‌های غیرالاستیک تجمعی، بستگی داشته، اما در سیستم‌های نسبتاً ترد، نظیر ساختمان‌های با مصالح بنایی، معمولاً رفتار برشی غالب بوده و خرابی را می‌توان برحسب تغییر شکل بیشینه بیان نمود. خرابی در سازه‌های بتن مسلح بستگی به هر دو عامل تغییر شکل غیرالاستیک و تغییر شکل تجمعی تحت بارگذاری رفت و برگشتی بستگی دارد. در نتیجه به منظور تعیین مقادیر واقعی‌تر برای خرابی باید علاوه بر بیشینه پاسخ غیرالاستیک، تغییر شکل‌های غیرالاستیک تجمع یافته در حرکات رفت و برگشتی در نظر گرفته شود. شاخص‌های خرابی که فقط براساس تغییر مکان هستند، خرابی تجمعی ناشی از حرکات رفت و برگشتی را در نظر نمی‌گیرند. یک مدل خرابی، در صورتی واقعی می‌باشد که مقادیر آن همبستگی مناسبی با وضعیت خرابی مشاهده شده بعد از زلزله داشته باشد. خرابی سازه‌ای به دو صورت محلی و کلی قابل بررسی می‌باشد. شاخص‌های محلی، مبین میزان خرابی در اعضای گوناگون بوده و شاخص‌های کلی، وضعیت کل سازه یا بخش زیادی از آن را بیان می‌کنند. همچنین یک سری شاخص‌های خرابی در مقیاس طبقه تعریف شده است. شاخص‌های خرابی طبقه برای تعریف شاخص‌های کلی خرابی (برای کل سازه) قابل استفاده می‌باشند. همچنین با توجه به شاخص‌های محلی می‌توان شاخص‌هایی در مقیاس طبقات و نیز برای کل سازه تعریف نمود. یکی از مناسب‌ترین شاخص‌های خرابی را پارک و انگ معرفی نموده‌اند [۱-۳]. انواع متنوعی از شاخص‌های خرابی توسط محققین مختلف ارائه شده است [۴]. از شاخص خرابی می‌توان در موارد متنوعی استفاده نمود. به عنوان مثال به منظور تعیین مقطع بحرانی در سازه‌های طره‌ای بلند [۵ و ۶] و بررسی تحلیلی پدیده ستون کوتاه در سازه‌های بتنی می‌توان با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی نسبت به تعیین و بررسی نحوه توزیع خرابی در نقاط بحرانی سازه اقدام نمود [۷]. به منظور لحاظ نمودن اثر اهمیت ستون نسبت به تیرها و نیز انتقال

مود شکست از طبقات پایین به طبقات بالاتر می‌توان اصلاحاتی بر روی شاخص خرابی پارک و انگ انجام داد [۸]. نگرش استفاده از شاخص خرابی را می‌توان در بررسی تاثیر روش‌های مختلف مقاوم سازی تحلیل سازه مقاوم شده مورد استفاده قرار داد [۹].

## شاخص خرابی پارک - انگ

پارک و انگ یک ترکیب خطی از تغییر شکل و انرژی اتلاف شده به صورت زیر را تعریف کردند [۱-۳]:

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

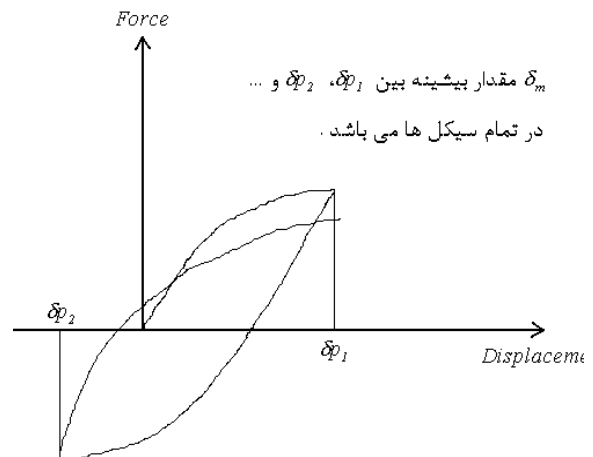
که در آن  $\delta_m$  ماکزیمم تغییر شکل سازه (حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی) مطابق شکل (۱)،  $\delta_u$  تغییر شکل نهایی سازه (حاصل از تحلیل بار جانبی افزاینده)،  $P_y$  مقاومت تسلیم عضو مورد نظر،  $\int dE_h$  انرژی جذب شده توسط عضو در خلال حرکات رفت و برگشتی زلزله،  $\beta$  (حدود ۰/۱۵ - ۰/۱) ضریب ثابت مدل می‌باشد [۱]. این ضریب بر اساس نتایج آزمایشگاهی و با توجه به مشاهده رفتار سازه‌های بتنی در زلزله‌های مختلف کالیبره شده است. رابطه پارک - انگ بر مبنای رفتار سازه‌های بتنی استخراج شده است و در نتیجه برای ارزیابی این نوع سازه‌ها مناسب‌تر است. این شاخص خرابی بین صفر (بدون خرابی) و یک (فرو ریختن) تغییر می‌کند. ظرفیت تغییر شکل نهایی عضو، تحت بارگذاری یک جهته  $\delta_u$  نشان دهنده ظرفیت شکل‌پذیری عضو می‌باشد. در اعضای بتن مسلح، افزایش محصوریت می‌تواند باعث افزایش تغییر شکل نهایی گردد. در سال‌های اخیر برای سازه‌های بتن‌آرمه، از شاخص پارک - انگ استفاده زیادی شده است. علت این امر، سادگی مدل و کالیبره بودن با استفاده از داده‌های مربوط به خرابی‌های زلزله‌های گذشته می‌باشد. برترو و برترو شاخص خرابی پارک - انگ را به صورت زیر تعریف کرده‌اند [۱۰]:

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

که در آن  $\theta_m$  بیشینه چرخش در طول بارگذاری،  $\theta_u$  ظرفیت نهایی چرخش مقطع،  $M_y$  ممان تسلیم مقطع و  $\int dE$  انرژی جذب شده چرخه‌ای می‌باشد. شاخص خرابی برای عضو به صورت میانگین شاخص‌های طرفین عضو، محاسبه می‌شود.

جدول ۱- رابطه بین شاخص کلی خرابی سازه با وضعیت آن

| درجه خرابی | مشاهده فیزیکی                               | شاخص خرابی | وضعیت سازه     |
|------------|---|------------|----------------|
| انهدام     | فروریزش تمام یا قسمتی از سازه               | $> 1$      | نابودی کامل    |
| شدید       | تخریب و له شدن بتن، کمانش آشکار فولاد تسلیح | $0.4-1$    | غیر قابل تعمیر |
| متوسط      | ترک‌های بزرگ، ریختن بتن در بعضی المان‌ها    | $< 0.4$    | قابل تعمیر     |
| کم         | ترک‌های کوچک، خرد شدگی بتن در ستون‌ها       | -          | -              |
| سبک        | وقوع ترک‌های مختصر                          | -          | -              |

شکل ۱- پارامتر  $\delta_m$  در شاخص خرابی پارک-انگ

### رفتار چرخه ای بتن

مدل سازی رفتار چرخه ای اعضای سازه ای، یک موضوع مهم در تحلیل دینامیکی غیر خطی می باشد. در این مطالعه از مدل سه پارامتری پارک استفاده شده است. این مدل چرخه ای، اثرات کاهش دگرگونی سختی، زوال مقاومت، پاسخ غیر متقارن و لغزش یا لقی را در نظر گرفته و دارای یک پوش سه خطی می باشد. در شکل ۲ مدل رفتار سازه مشاهده می شود. به منظور مدل سازی منحنی نیرو- تغییر مکان اعضای سازه با استفاده از نرم افزار مربوطه می توان آن را به صورت منحنی سه خطی، ایده آل سازی نمود. در شکل ۳ اثر پارامترهای مختلف بر شکل منحنی هیستریزس ملاحظه می شود.

### مطالعه موردی

به منظور ارزیابی لرزه ای سازه با استفاده از شاخص خرابی یک ساختمان چهار طبقه سه دهانه مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. سقف ساختمان به صورت تیرچه بلوک بوده و سیستم باربر جانبی به صورت قاب خمشی توسط قاب‌های با شکل پذیری معمولی می باشد. نوع سازه به صورت مسکونی بوده و بار زنده متناظر در نظر گرفته می شود. به علت تقارن در پلان سازه، فقط یکی از قاب‌های خمشی مورد تحلیل قرار گرفته است. تحلیل‌های انجام شده به صورت تحلیل بار افزاینده و تحلیل دینامیکی غیر خطی می باشد.

### تحلیل بار افزاینده

با کمک این تحلیل، شکل شکست تعیین می شود. هم‌چنین ظرفیت شکل پذیری و حداکثر مقاومت جانبی را به دست می دهد. در این مطالعه براساس کنترل نیرو، محاسبات

این شاخص قابل تعمیم به مقیاس طبقه و کل ساختمان می باشد.

شاخص خرابی طبقه، با جمع نمودن شاخص های اعضای آن طبقه، به نسبت انرژی چرخه ای اعضا، بدست می آید:

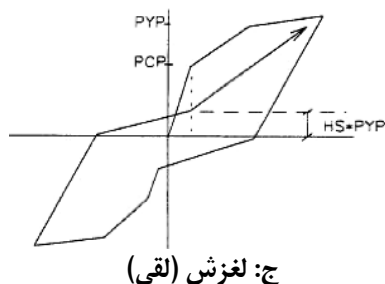
$$DI_j^s = \sum_{k=1}^{m_j} \lambda_{kj} \cdot DI_{kj} \quad , \quad \lambda_{kj} = \frac{E_{kj}}{E_j} \quad (3)$$

که در آن  $DI_j^s$  شاخص خرابی طبقه  $j$  ام،  $DI_{kj}$  شاخص خرابی عضو  $k$  از طبقه  $j$ ،  $E_{kj}$  انرژی چرخه ای عضو  $k$  از طبقه  $j$ ،  $E_j = \sum_{i=1}^{m_j} E_{ij}$  انرژی چرخه ای طبقه  $j$ ،  $m_j$  تعداد اعضا طبقه  $j$  می باشد. هم‌چنین شاخص خرابی کل سازه، به صورت زیر قابل تعریف می باشد:

$$DI_G = \sum_{i=1}^N \lambda_i (DI_i^s) \quad , \quad \lambda_i = \frac{E_i}{E_T} \quad (4)$$

که در آن  $DI_G$  شاخص خرابی کل سازه،  $E_s$   $E_T = \sum_{s=1}^N E_s$  کل انرژی چرخه ای سازه و  $N$  تعداد طبقات سازه می باشد.

باتوجه به مشاهدات آزمایشگاهی مطابق جدول ۱ می توان با توجه به شاخص محاسبه شده، نوع خرابی را تخمین زد. این شاخص خرابی در نرم افزار IDARC نیز محاسبه می گردد [۱۱].



شکل ۳- پارامترهای مدل پارک [۱۱]

### تحلیل خرابی و دینامیکی

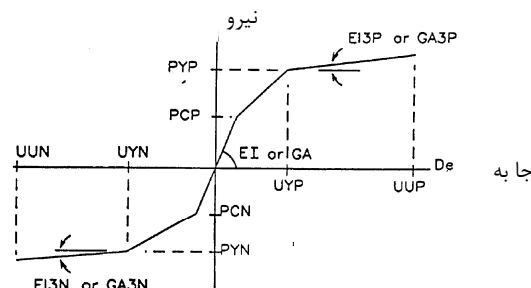
در اشکال ۸ تا ۱۱ جا به جایی نسبی طبقه، برش طبقه و شتاب آن به همراه تاریخچه شاخص خرابی تیرها و ستون‌های هر طبقه برای  $PGA=0.25g$  در زلزله طیس رسم شده است. با مقایسه منحنی ظرفیت طبقات در شکل ۷ و پاسخ طبقات مختلف که در اشکال ۸ تا ۱۱ تسیم شده است می‌توان در مورد ضعف احتمالی در ظرفیت طبقات گوناگون پی برده و نسبت به مقاوم سازی المان‌های آن طبقه اقدام کرد.

با مقایسه مقادیر شاخص خرابی در تیرها و ستون‌ها می‌توان به مکانیزم شکست تیر ضعیف- ستون قوی اطمینان حاصل کرد. در سازه مورد بررسی این مکانیزم در مورد تمام طبقات برقرار می‌باشد. هم‌چنین با مقایسه شاخص خرابی در طبقات گوناگون می‌توان طبقه ضعیف را تعیین نمود. در مورد این سازه ضعیف ترین طبقه همان طبقه دوم بوده ولی با توجه به مقایسه مقادیر شاخص خرابی می‌توان گفت که توزیع نسبی مقاوت بین طبقات، قابل قبول می‌باشد.

در شکل ۱۲ رابطه بین جا به جایی بیشینه و شاخص خرابی کلی سازه تحت زلزله طیس مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود شاخص خرابی  $0.35$  معادل جا به جایی حدود  $0.3$  در سازه می‌باشد. با استفاده از این منحنی می‌توان بین مقادیر کالیبره شده شاخص خرابی و جا به جایی نسبی سازه مورد مطالعه ارتباط برقرار کرد.

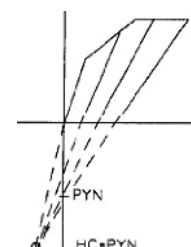
شکل ۱۳ بیانگر ارتباط بین شتاب بیشینه،  $PGA$  و شاخص خرابی کل سازه،  $OSDI$ ، می‌باشد. مشاهده می‌شود با افزایش  $PGA$ ، مقدار  $OSDI$  نیز افزایش می‌یابد، ولی این رابطه به نوع زلزله نیز ارتباط دارد. به عنوان مثال در یک شتاب مشخص مقدار شاخص خرابی تحت زلزله طیس بیشتر از مقدار مربوطه تحت زلزله ناغان شده است. از این نتایج می‌توان برای تعیین تابع خسارت استفاده کرد.

انجام شده و توزیع نیروی جانبی به صورت مثلث وارونه در نظر گرفته شده است. وضعیت سازه در انتهای تحلیل بار افزایشده در شکل ۵ دیده می‌شود.

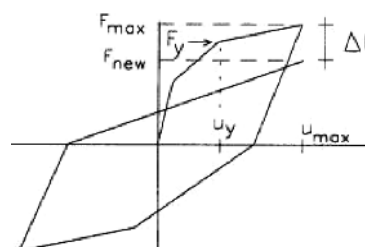


شکل ۲- مشخصات رفتار دینامیکی بتن [۱۱]

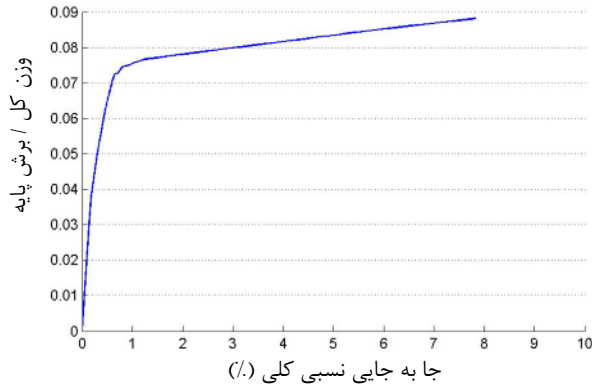
منحنی ظرفیت کل سازه و طبقات مختلف در اشکال ۶ و ۷ نشان داده شده است. از آن جا که بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی جا به جایی نسبی بام تحت شتاب بیشینه معادل  $0.25g$  برابر  $1/9\%$  و در شتاب بیشینه  $0.35g$  برابر  $2/7\%$  می‌باشد در نتیجه می‌توان گفت که ظرفیت برش پایه سازه مورد نظر برابر  $8\%$  وزن سازه می‌باشد.



الف: کاهندگی سختی



ب: زوال مقاومت

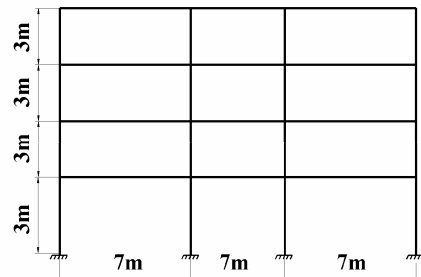


شکل ۶- دیاگرام مقاومت جانبی کل سازه

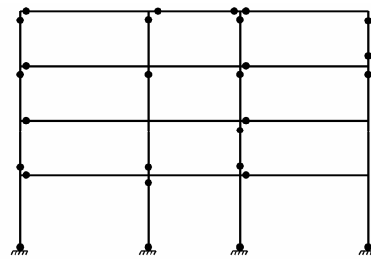
### جمع بندی

عوامل مهمی که بر رفتار لرزه ای سازه در تحلیل دینامیکی غیر خطی تاثیر دارند، مورد توجه قرار گرفته و در قالب یک مثال در مورد نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی با تکیه بر شاخص خرابی بحث شد. از آنجا که تحلیل استاتیکی غیر خطی نیز یک ابزار قدرتمند در بررسی رفتار لرزه ای سازه می باشد، به وجود ارتباط بین مود شکست حاصل از تحلیل استاتیکی غیر خطی و نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی اشاره شد. روش تعیین طبقه ضعیف با ملاحظه توأم نتایج حاصل از این دو نوع تحلیل بیان گردید. هم چنان که ملاحظه شد نوع زلزله اثر مهمی بر رفتار سازه و میزان خرابی آن دارد.

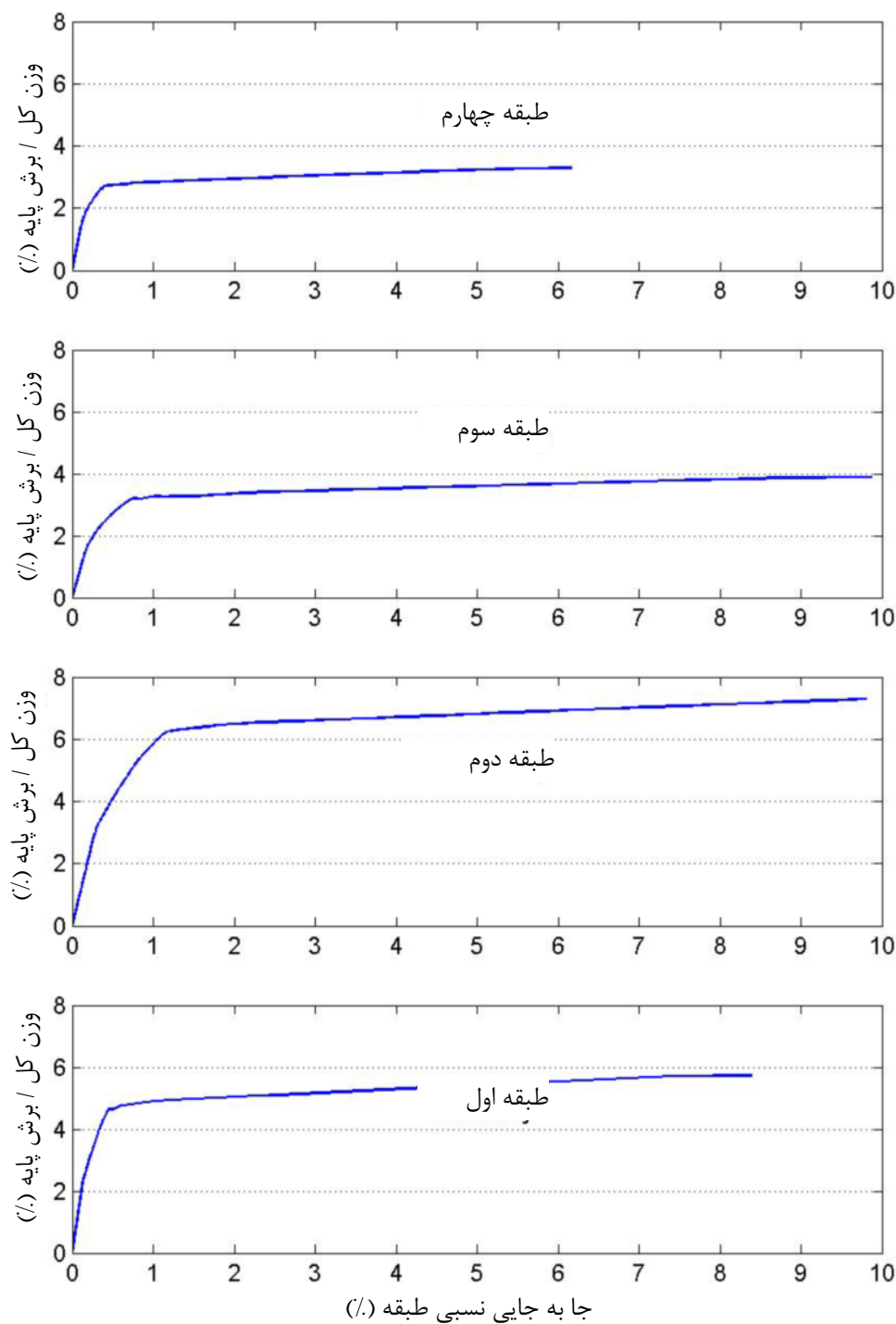
هم چنان که در شکل فوق ملاحظه می شود، اثر زلزله طبس نسبت به ناغان بر روی سازه شدیدتر بوده است به گونه ای که شاخص خرابی برای زلزله ناغان با  $PGA=1g$  از  $0/3$  فراتر نمی رود، در حالی که در زلزله طبس برای  $PGA=0.45g$  شاخص خرابی بیش از  $0/9$  (غیر قابل استفاده) می باشد. این مطلب اهمیت توجه به پارامترهای مؤثری نظیر محتوای فرکانسی رکوردها را یادآوری می نماید. در شکل های ۱۴ و ۱۵ ارتباط بیشترین تغییر مکان های هر طبقه تحت  $PGA$  های مختلف برای زلزله های ناغان و طبس دیده می شود. هم چنان که مشاهده می شود ماکزیمم تغییر مکان هر طبقه ارتباط زیادی با نوع زلزله و شدت آن دارد.



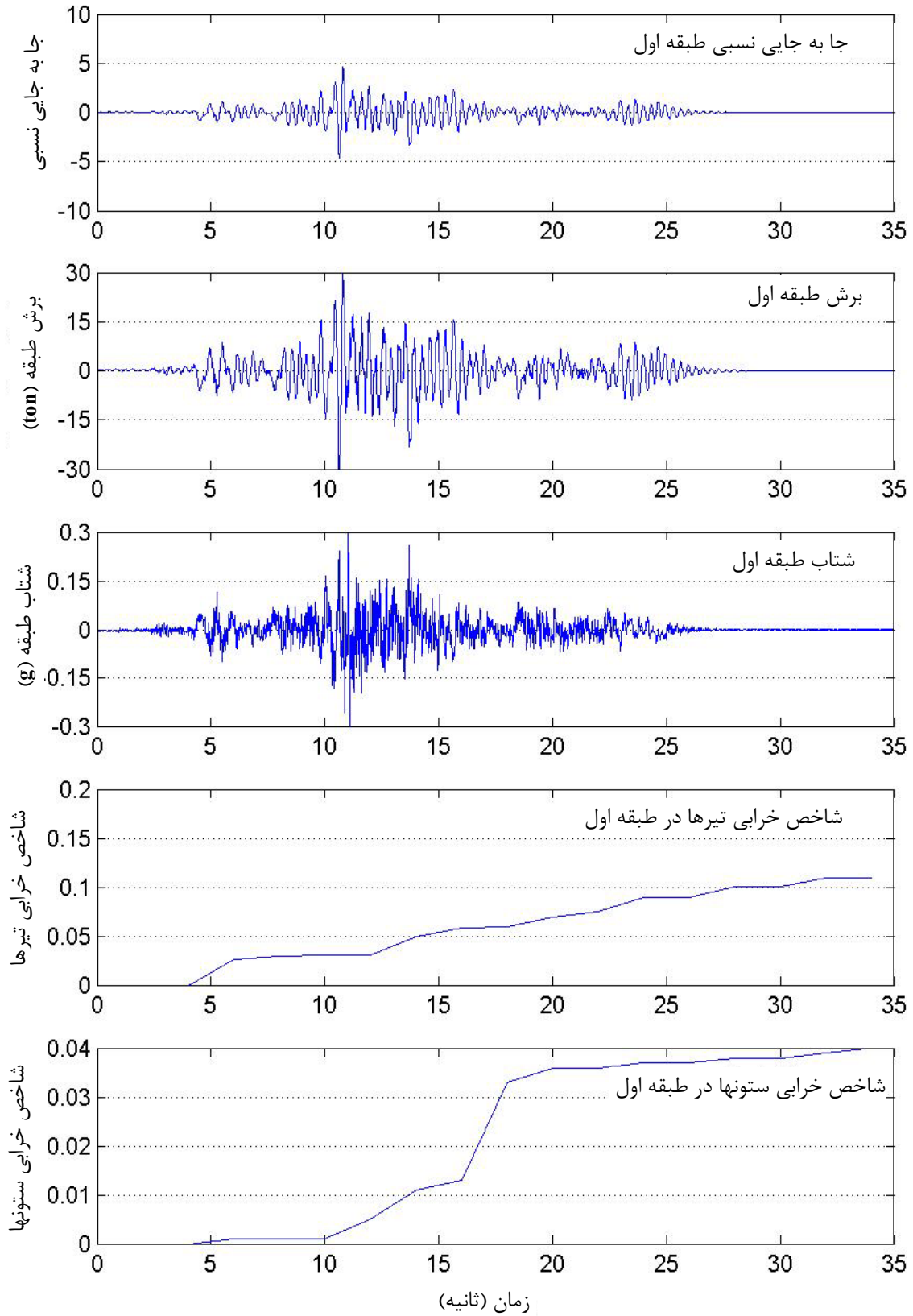
شکل ۴- ساختمان مورد بررسی



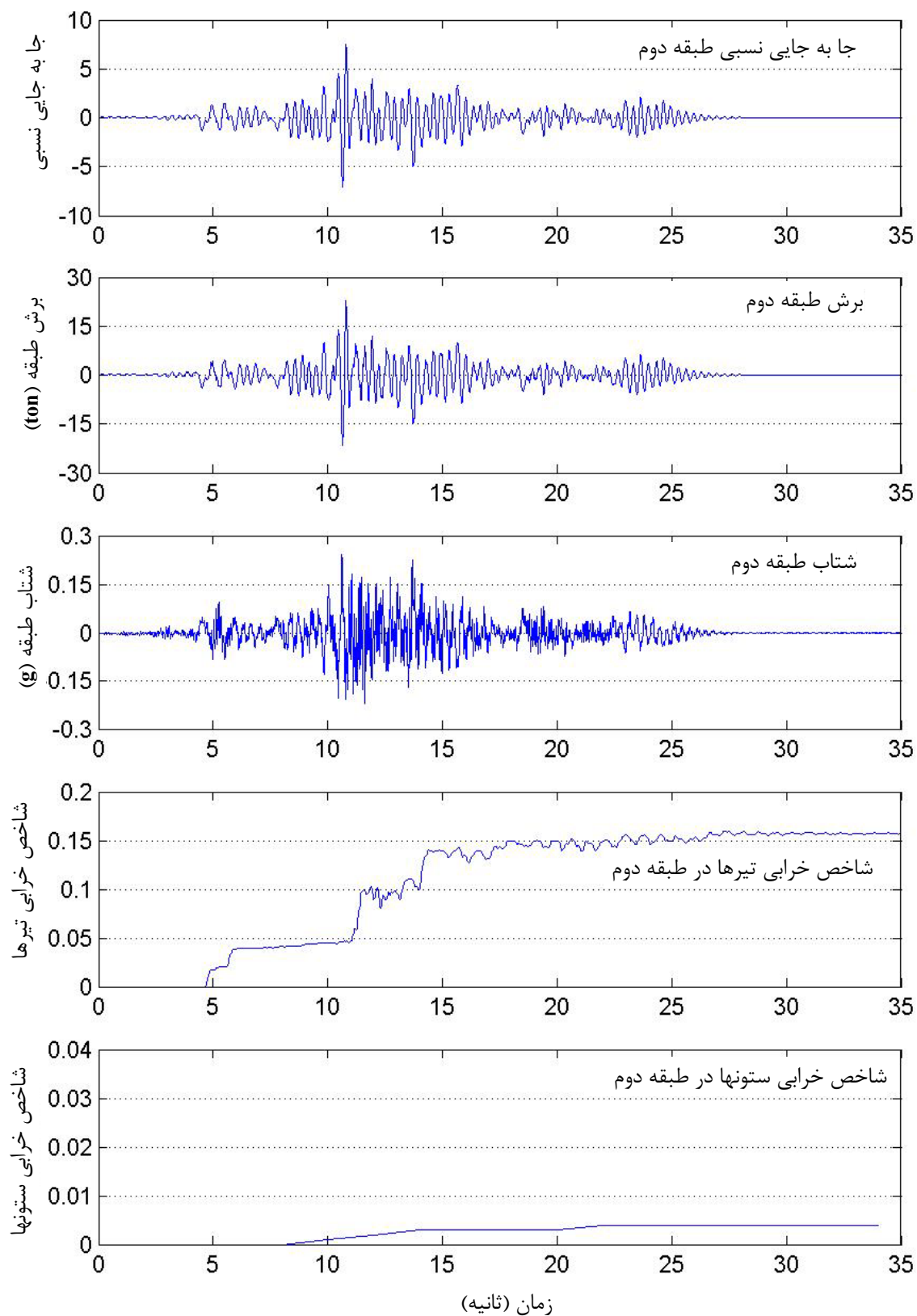
شکل ۵- وضعیت سازه در انتهای تحلیل بارافزاینده



شکل ۷- نمودار مقاومت جانبی طبقات

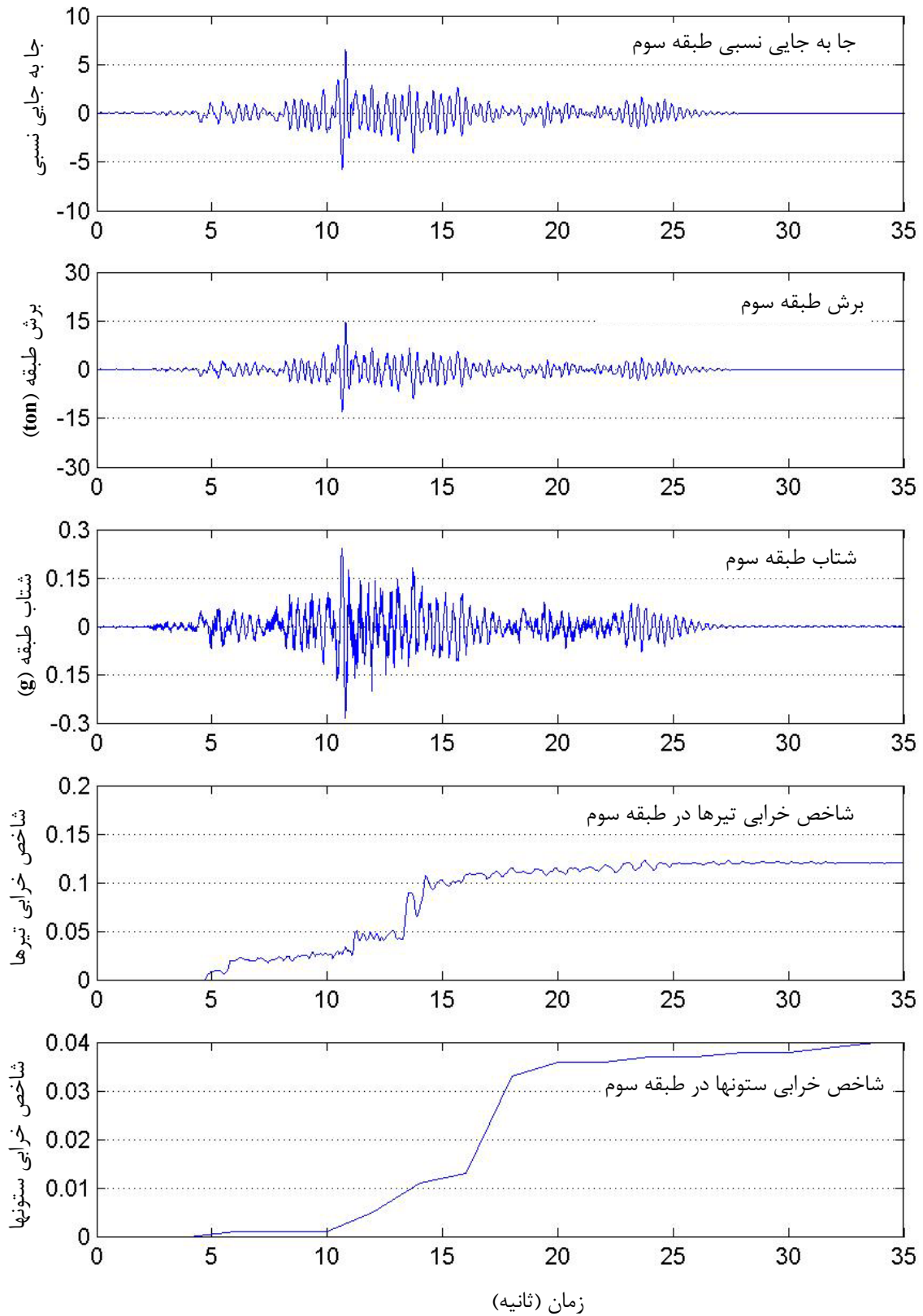


شکل ۸- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی برای طبقه اول

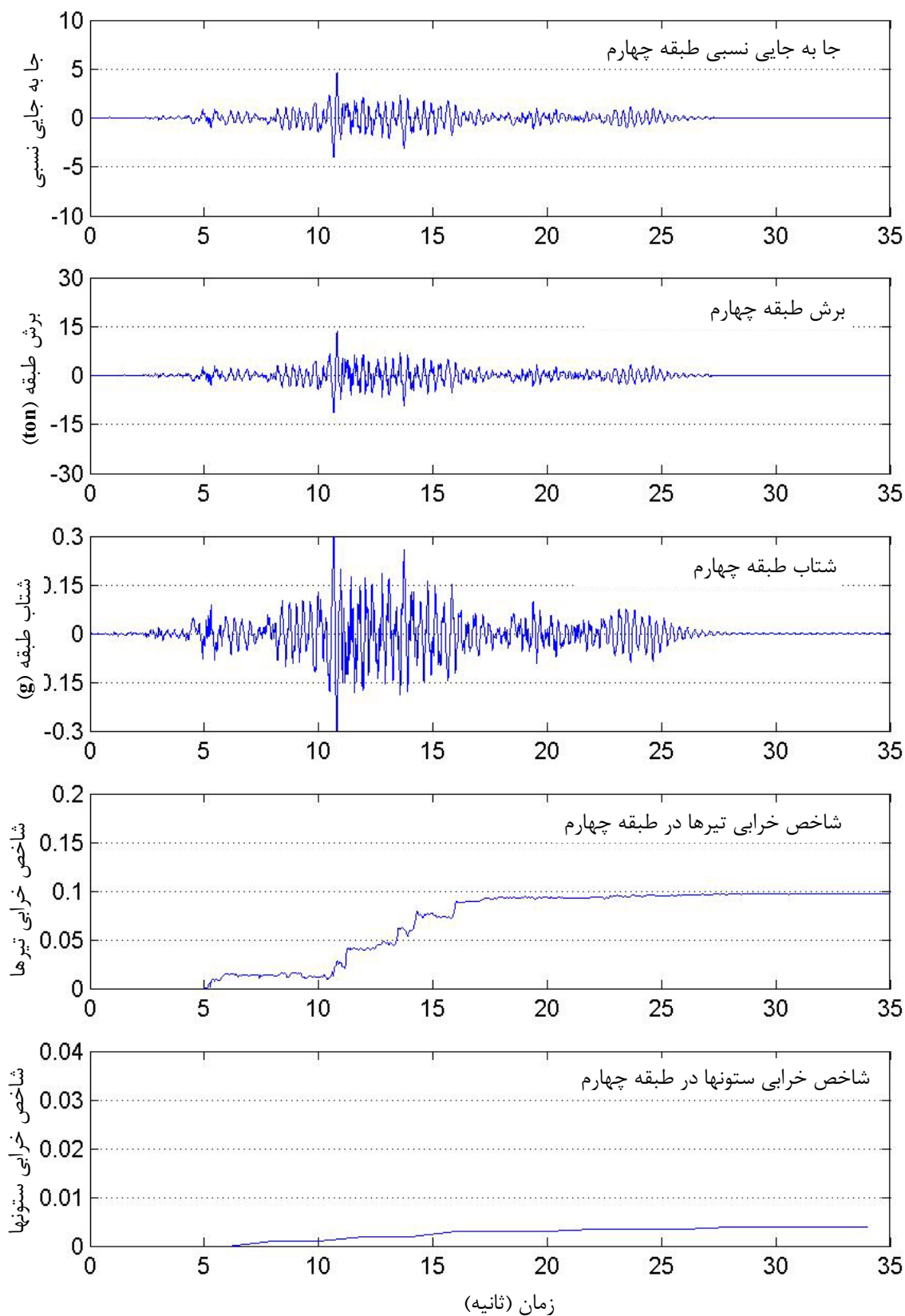


شکل ۹- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی برای طبقه دوم

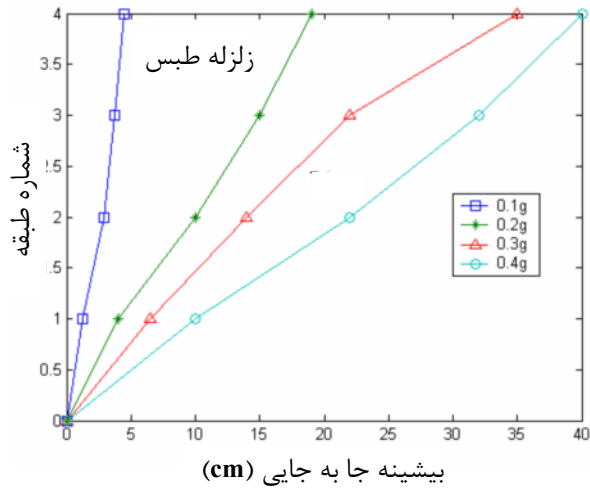




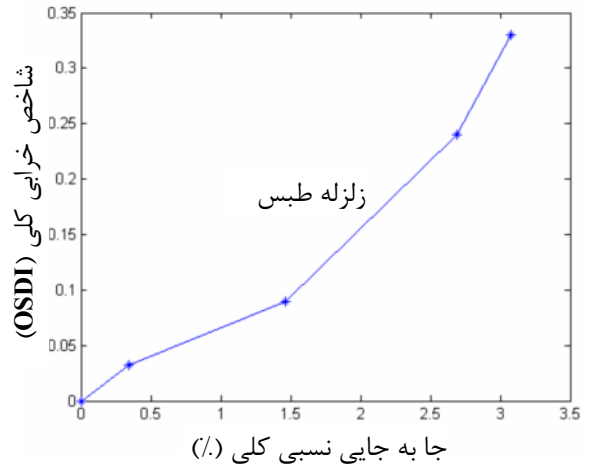
شکل ۱۰- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی برای طبقه سوم



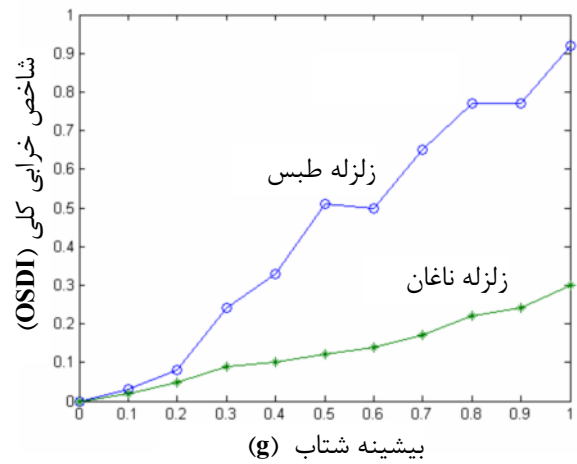
شکل ۱۱- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی برای طبقه چهارم



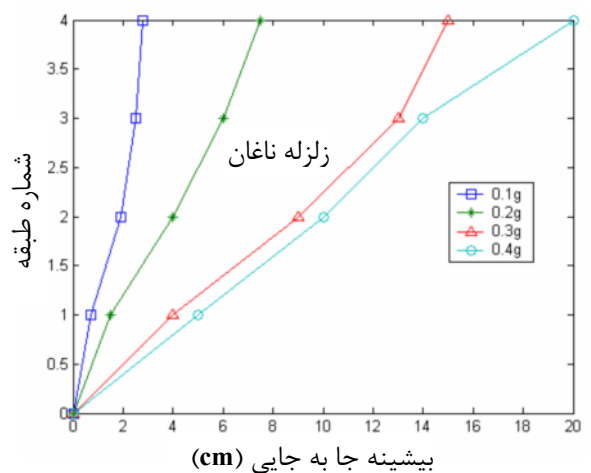
شکل ۱۵- بیشینه تغییر مکان ها در زلزله طبس



شکل ۱۲- ارتباط بین بیشینه تغییر مکان و شاخص خرابی



شکل ۱۳- ارتباط بین بیشینه شتاب (PGA) و شاخص خرابی



شکل ۱۴- بیشینه تغییر مکان ها در زلزله ناغان

## مراجع

- [1] Park, Y-J., and Ang, A.H-S., and Wen, Y.K., (1984), "Seismic damage analysis and damage-limiting design of RC buildings", Structural Research Series, Report No. UILU-ENG-84-2007, University of Illinois at Urbana, Illinois, Oct.
- [2] Park, Y-J., and Ang, A.H-S., (1985), "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. ST4, pp. 722-739.
- [3] Park, Y-J., and Ang, A.H-S., (1985), " Seismic damage analysis of RC buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. ST4, pp. 740-757.
- [4] تابش پور، محمد رضا، بخشی، علی؛ "مروری بر انواع شاخص های خرابی"، مجله بنا، شماره ۳۴، شهریور ۱۳۸۳.
- [5] تابش پور، م. ر. بخشی، ع. و گل افشانی ع. ا.، "مدل سازی و تحلیل سازه های طره ای بتنی برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۳.
- [6] Tabeshpour, M. R., Bakhshi, A., and Golafshani, A. A., (2004), "Seismic vulnerability, performance and damage analysis of special structures", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Canada.
- [7] تابش پور، محمد رضا، بخشی، علی؛ "ارزیابی محاسباتی شکست ستون کوتاه در هنگام زلزله"، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال هشتم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۴.
- [8] Tabeshpour, M. R., Bakhshi, A., and Golafshani, A. A., (2004), " Vulnerability and damage analysis of existing buildings ", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Canada.
- [9] تابش پور، محمد رضا، بخشی، علی؛ "ارزیابی لرزه ای ساختمان ای بهسازی شده با استفاده از تحلیل خرابی"، پذیرش شده، مجله مهندسی دانشگاه مازندران.
- [10] Bertero, R. D., and Bertero, V. V., (1992), " Tall Reinforced concrete buildings: Conceptual earthquake-resistant design methodology", CB/EERC-92/16, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- [11] A. M. Reinhorn, S. K. Kunnath and R. Valles-Mattox, IDARC 2D Version 4.0: users manual. Department of civil Engineering, State University of New York at Bufallo, 1996.