

## ارزیابی تأثیر جداساز لرزه‌ای اصطکاکی-لاستیکی در خرابی پیش‌رونده پل‌ها

غلامرضا هوایی<sup>۱\*</sup>، سید امیرحسین مؤیدی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### چکیده

پل‌ها از جمله سازه‌هایی هستند که عملکرد آنها در هنگام اعمال نیروهای نامتعارف همواره با اهمیت بوده است. در این مطالعه به عملکرد دو نمونه‌ی پل، با و بدون جداساز لرزه‌ای، تحت دو سناریوی آسیب ناشی از حذف ستون کناری در حالت اول و حذف ستون میانی از پایه‌ی پل، در حالت دوم تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی پرداخته شده و تاریخچه زمانی و بیشینه پاسخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا با طراحی جداساز اصطکاکی-لاستیکی با روش ارائه شده در راهنمای *AASHTO* به مدل‌سازی پل‌ها در نرم‌افزار *OpenSees* پرداخته شده و ضریب اصطکاک جداساز به صورت پارامتری متغیر نسبت به سرعت لغزشی و نیروی قائم در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که جداسازها در خرابی پیش‌رونده در هر دو حالت اول و دوم تسلیم نمی‌شوند و در نتیجه لغزش عرشه بر روی آن‌ها اتفاق نمی‌افتد اما در حالت اول جابجایی ماندگار به علت نامتعادل شدن عرشه رخ خواهد داد. با این حال نشان داده می‌شود که استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث افزایش بیشینه پاسخ‌ها در اکثر موارد شده است.

کلمات کلیدی: جداساز لرزه‌ای، خرابی پیش‌رونده، تحلیل دینامیکی غیرخطی، پل بزرگراهی.

\*نویسنده مسئول: غلامرضا هوایی

پست الکترونیکی: [havaei@aut.ac.ir](mailto:havaei@aut.ac.ir)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

## ۱- مقدمه

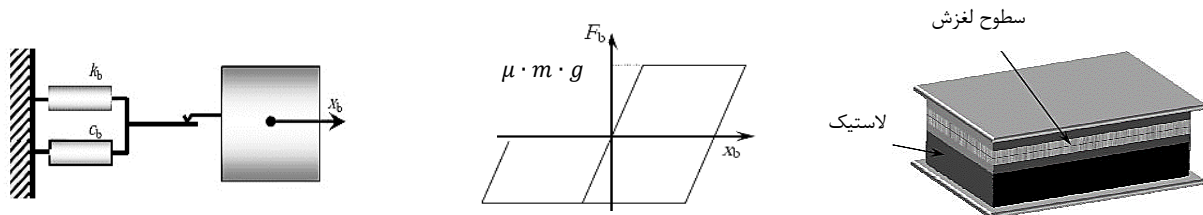
با ایجاد و توسعه شبکه‌های حمل و نقلی، اهمیت پل‌ها در این شبکه‌ها با رشد جمعیت افزایش چشمگیری داشته است. پل‌ها بدلیل انتقال بار ترافیکی، به عنوان یکی از مهم‌ترین ارکان شبکه‌های حمل و نقلی شناخته می‌شوند و همواره مورد تهدید و تأثیر بارهای نامتعارف از جمله زلزله، ضربه و غیره می‌باشند، بنابراین حفظ ایمنی و عملکرد آن‌ها پس از خرابی‌های موضعی حائز اهمیت می‌باشد. یکی از خرابی‌های مهم، خرابی پیش‌رونده می‌باشد که در آن یک خسارت جزئی یا شکست موضعی باعث خرابی کل سازه یا قسمت زیادی از آن می‌شود به گونه‌ای که خرابی نهایی تناسبی با خرابی اولیه ندارد. پل‌ها در مقایسه با سازه‌های ساختمانی، سیستم ساده‌تر و درجه نامعینی کمتری دارند و بیشتر مستعد فروپاشی پیش‌رونده می‌باشند. همچنین به علت همبستگی میان اجزاء ممکن است پل‌ها تمام عملکرد خود را با وقوع فروپاشی پیش‌رونده از دست بدهند. از سوی دیگر جداسازهای لرزه‌ای باعث عدم پیوستگی میان عرشه و پایه‌های پل می‌شوند و استفاده از آن‌ها طی دهه‌های اخیر به سرعت گسترش یافته است. روی آوردن طراحان به سیستم جداسازی به‌ویژه در پل‌ها به علت عملکرد صحیح آن‌ها در راستای محدود ساختن میزان آسیب در یک قسمت و جلوگیری از آسیب به سایر قسمت‌ها می‌باشد و این موضوع می‌تواند در خرابی پیش‌رونده تأثیرگذار باشد. گرچه مطالعات زیادی معطوف به فروپاشی پیش‌رونده در سازه‌های ساختمانی انجام گرفته است اما در مقایسه با پل‌ها توجه کمی به این موضوع شده است. تاکنون مطالعات و تحقیقات مناسبی در این خصوص انجام پذیرفته است. استاروسک [۱] با بیان این‌که روش‌های طراحی برای جلوگیری از فروپاشی پیش‌رونده ناکافی هستند روشی را برای طراحی در برابر فروپاشی پیش‌رونده پیشنهاد و مجموعه‌ای از معیارهای طراحی ارائه کرده است. آستانه [۲] نیز خلاصه‌ای از ساختار پل، وضعیت پل قبل از سقوط و یک سناریوی محتمل برای فروپاشی پیش‌رونده آن ارائه و توصیه‌هایی برای طراحی پل خرابی فولادی بیان کرد. ویووو و همکاران [۳] به مدل‌سازی و تحلیل رفتار فروپاشی تدریجی یک پل بتنی با استفاده از روش المان کاربردی پرداخته‌اند. نتایج، تأثیر قابل توجه پدیده فروپاشی پیش‌رونده در عملکرد پل در طول زمین‌لرزه‌های بزرگ را نشان می‌دهد. دو نوع فروپاشی پیش‌رونده برای سازه‌های پل‌ها توسط لیاو و همکاران [۴] پیشنهاد و سپس استراتژی‌های طراحی بهینه برای فروپاشی پیش‌رونده آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. در تحقیقی دیگر کای و همکاران [۵] یک پل کابلی دوعدی را تحت ۴ روش تحلیل مختلف، مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تحلیل استاتیکی در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی بسیار محافظه‌کارانه است و تحلیل دینامیکی غیرخطی به عنوان بهترین روش برای خرابی پیش‌رونده توصیه می‌شود. میاچی و همکاران [۶] تأثیرات توزیع بار زنده و نسبت طول دهانه بر پل فلزی خرابی را بررسی کرده و با مقایسه پاسخ‌ها برای دو نمونه پل، مقاومت اعضا را تحت بارگذاری مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین المانی و گیولیانی [۷] به بررسی استحکام یک پل معلق با دهانه‌های طولانی با توجه به محل آسیب پرداختند و در ادامه موارد مهم طراحی جهت اقدام متقابل برای جلوگیری از افزایش پاسخ‌ها پیشنهاد کرده‌اند. زو و همکاران [۸] به شبیه‌سازی خرابی پیش‌رونده جهت شناسایی مکان‌های بحرانی از یک پل قوسی سنگی پرداختند و آسیب‌پذیرترین مناطق پل را به کمک مفهوم سختی سازه‌ای مشخص کردند. از پژوهش‌های دیگر در زمینه مدل‌سازی خرابی پیش‌رونده به روش دینامیکی غیرخطی، می‌توان به مطالعه‌ی داس و همکاران [۹] اشاره کرد. آن‌ها به چندین حالت بحرانی ناشی از آسیب کابل‌های پل اشاره کردند و تأثیر کابل‌های نزدیک به برج در میزان احتمال رخداد خرابی پیش‌رونده را سنجیدند.

## ۲- تعریف مسئله

جداساز استفاده شده در این مطالعه از نوع ترکیبی می‌باشد. در قسمت زیرین آن لاستیک و در قسمت بالایی، دو صفحه از جنس فولاد ضدزنگ و PTFE<sup>1</sup> قرار دارند که به صورت سری عمل می‌کنند. نمودار رفتاری این جداساز، دوخطی با شیب ثانویه صفر می‌باشد (شکل

1 Polytetrafluoroethylen

۱). این جداساز پس از لغزش، فاقد نیروی بازگرداننده کامل بوده که می‌تواند باعث تغییر مکان دائمی در این سیستم شود. همچنین تغییرات نیروی محوری و سرعت لغزشی باعث تغییر ضریب اصطکاک و نیروی برشی در جداساز شده و عملکرد پیش‌بینی نشده آن می‌تواند بر پاسخها تأثیرگذار باشد.

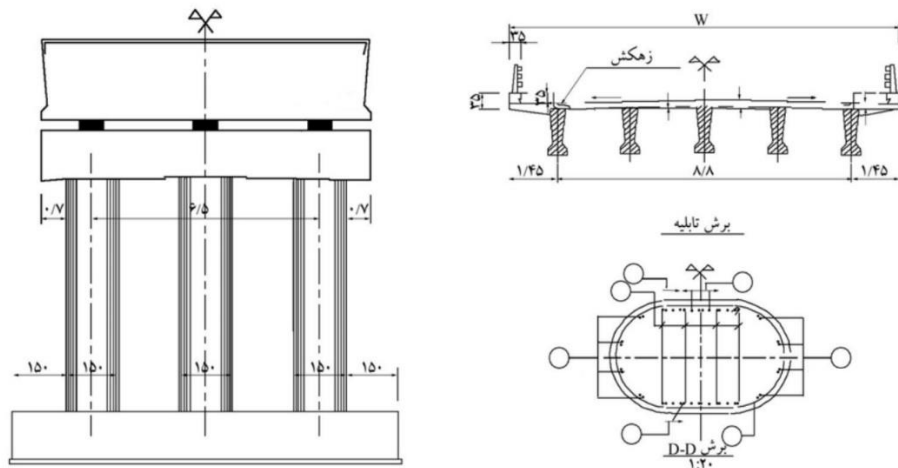


شکل ۱: شکل واقعی، نمودار رفتاری ایده آل و مدل ریاضی جداساز ترکیبی [۱۰].

ابتدا یک جداساز اصطکاکی-لاستیکی با روش ارائه شده در راهنمای (2010) AASHTO [۱۱] طراحی گردیده و سپس مدل‌سازی سه‌بعدی برای دو نمونه پل با و بدون جداساز تحت دو سناریوی آسیب مختلف در حالت ناشی از حذف ستون کناری و حالت ناشی از حذف ستون میانی از پایه پل در نرم‌افزار OpenSees [۱۲] انجام شده است و به بررسی خرابی پیش‌رونده در اثر آسیب به پایه‌های پل‌های جداسازی شده که عملکرد مناسبی در هنگام زلزله دارند، پرداخته شده است همچنین تاریخچه زمانی و بیشینه پاسخها حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی به عنوان دقیق‌ترین تحلیل خرابی پیش‌رونده مورد ارزیابی واقع شده است.

### ۳- مدل‌سازی

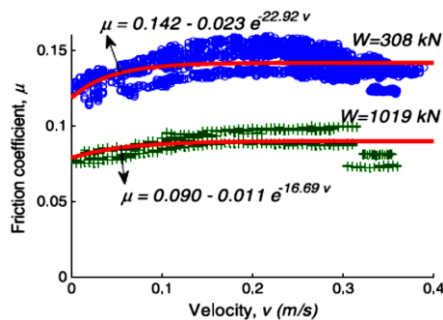
پل مورد مطالعه یکپارچه بوده و دارای دو دهانه ۲۵ متری می‌باشد. ارتفاع آن ۱۰/۱۵ متر و عرشه آن شامل ۵ شاه‌تیر و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد همچنین تک‌پایه آن متشکل از سه ستون لویایی شکل متصل به سرستون می‌باشد. شاه‌تیرها بر روی تکیه‌گاه وسط بوده و همچنین در پایه‌ها به وسیله دیوار بتنی به هم دوخته شده‌اند تا عملکرد یکپارچه‌ای داشته باشند. در پل جداسازی شده که مشخصات آن مانند پل یکپارچه می‌باشد، سه جداساز اشاره شده در هریک از پایه‌ها، زیر دیوار بتنی و روی سرستون‌ها قرار گرفته‌اند. همچنین از اثر اندرکنش خاک و سازه در فونداسیون و کوله‌ها صرف‌نظر شده است. شکل ۲ مهم‌ترین اجزای پل و نمای پل جداسازی شده را نشان می‌دهد. در این مطالعه عرشه پل به صورت الاستیک با مقطع ترک نخورده در نظر گرفته شده است. خصوصیات کامل مقطع به صورت شاخه‌ای مدل‌سازی شده و از المان‌هایی با پلاستیسیته توزیع شده در طول عضو در OpenSees استفاده شده است. مازونی مدل مصالح Uniaxial material concrete01 برای بتن پوششی و با در نظر گرفتن اثر محصورشدگی می‌باشد [۱۳]. این دستور برای مصالح بتن تک‌محوری از مدل ارائه شده توسط کنت و پارک با سختی باربرداری و بارگذاری که به صورت خطی کاهش یافته است، بهره می‌برد [۱۴]. همچنین برای مدل‌سازی جداسازها از دستور element flatSliderBearing استفاده شده است [۱۵]. در مدل‌سازی برای بتن محصور نشده، حداکثر تنش در کرنش ۰/۰۰۲ و حد نهایی در کرنش ۰/۰۰۶ در نظر گرفته شده است. مصالح بتن محصور شده دارای حداکثر تنش ۲۶۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در کرنش ۰/۰۰۵ و تنش ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در کرنش ۰/۰۰۵ می‌باشد. آرماتورهای طولی با مصالح Steel01 با رابطه تنش کرنش دوخطی و با منظور کردن سختی کرنشی مدل شدند. در آرماتور فولادی تنش جاری شدن ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و شیب ناحیه سختی کرنشی ۰/۰۱ شیب اولیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: مهم‌ترین مؤلفه‌های پل تحت مطالعه [۱۶].

با توجه به در نظرگیری تغییرات نیروی محوری و سرعت لغزشی در عملکرد جداساز مورد نظر، برای مدل‌سازی ضریب اصطکاک از مدل رفتاری پژوهش دائو استفاده شده که تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به سرعت لغزشی و بار قائم لحظه‌ای، مد نظر قرار می‌گیرد [۱۷]. در این مطالعه تغییرات ضریب اصطکاک با توجه به پژوهش موخا و همکاران با رابطه ۱ به صورت تابعی از حداقل و حداکثر مقدار ضریب اصطکاک و سرعت لغزشی بیان شده است [۱۸]. تغییرات نیرو برای ۸ حالت بار قائم آزمایش شده و نمودارها بر روی این مقادیر برازش شده‌اند.

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-a|v|) \quad (1)$$



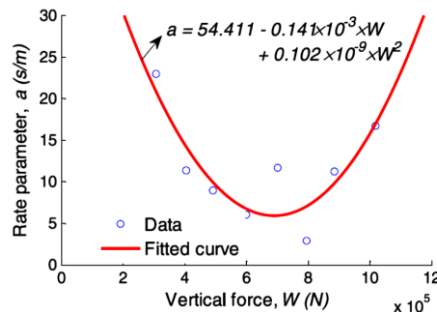
شکل ۳: تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به سرعت لغزشی [۱۷].

در این رابطه  $\mu_{\max}$  و  $\mu_{\min}$  ضریب اصطکاک در بیشترین سرعت و کمترین سرعت لغزشی می‌باشند. باودن و تابور تغییرات این دو پارامتر در رابطه زیر ارائه شده است [۱۹].

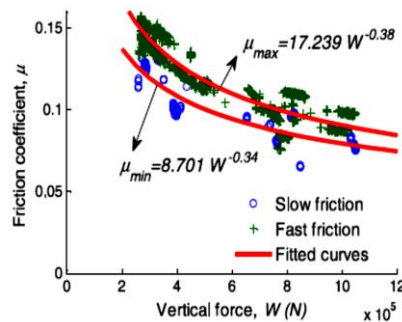
$$\mu_{\max} = A_{\max} W^{n_{\max} - 1} \quad (2)$$

$$\mu_{\min} = A_{\min} W^{n_{\min} - 1} \quad (3)$$

پارامتر  $a$  به فشار وارده و شرایط سطوح لغزشی وابسته است و از نتایج آزمایشگاهی حاصل می‌شود. تغییرات  $a$ ،  $\mu_{\min}$  و  $\mu_{\max}$  نسبت به نیروی قائم لحظه‌ای در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. مطابق نمودار رفتاری جداساز در شکل ۱ تغییرات نیروی قائم به صورت مستقیم در نیروی برشی تأثیر می‌گذارد و با توجه به مدل رفتاری دائی تغییرات سرعت لغزشی و نیروی قائم بر ضریب اصطکاک اثرگذار می‌باشد. تغییرات در این نیرو می‌تواند بر روی پاسخ‌ها اثرگذار باشد که در این پژوهش به این موضوع نیز پرداخته شده است.



شکل ۴: تغییرات  $a$  نسبت به بار قائم [۱۷].

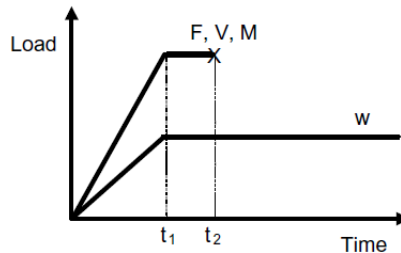


شکل ۵: تغییرات بیشینه و کمینه ضریب اصطکاک به بار قائم [۱۷].

#### ۴- بارگذاری

پدیده فروپاشی پیش‌رونده، پدیده‌ای دینامیکی است که در اثر آزاد شدن انرژی به دلیل حذف ناگهانی یک عضو سازه‌ای به وجود می‌آید؛ بنابراین تحلیل فروپاشی پیش‌رونده، به صورت حذف ناگهانی اعضای باربر و ارزیابی توانایی سازه‌ی باقیمانده برای مقاومت در برابر آسیب ایجاد شده، مدل‌سازی می‌شود [۲۰]. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از میان ۴ روش ارائه شده در فروپاشی پیش‌رونده کامل‌ترین روش می‌باشد که در آن اجزای سازه‌ای باربر اصلی، به صورت دینامیکی حذف می‌شوند و مصالح مجاز به تحمل رفتار غیرخطی می‌باشند [۲۱]. مدل‌سازی دقیق خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف ستون‌ها با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در دو گام انجام می‌یابد. در گام نخست پس از اعمال بارگذاری ثقلی  $W$  و به تعادل رسیدن سازه، نیروهای داخلی ستون موردنظر با استفاده از تحلیل استاتیکی محاسبه می‌شود. در گام دوم همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ستون موردنظر با بارهای نقطه‌ای حاصل از گام اول جایگزین شده و برای شبیه‌سازی حذف ناگهانی ستون‌ها، نیروهای ستون موردنظر پس از گذشت زمان معینی برداشته می‌شوند. در شکل ۶ تنها متغیرهای

$M, V, F$  که نشان‌دهنده نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی برای حالت دوبعدی هستند، نشان داده شده است اما از آنجاکه مدل‌سازی سه‌بعدی می‌باشد، باید ۶ مؤلفه‌ی نیروهای داخلی اعمال شوند.



شکل ۶: تاریخچه زمانی بارگذاری [۲۲].

## ۵- نتایج تحلیل های عددی

### ۱-۵- تحلیل مودال

به منظور تعیین دوره تناوب طبیعی از تحلیل مودال استفاده شده و مقادیر دوره تناوب اصلی سه مد اول سازه در جدول ۱ ارائه شده است. مد اول تا سوم به ترتیب طولی، عرضی و پیچشی می باشند.

جدول ۱: دوره تناوب در مد اول تا سوم با و بدون جداساز.

شماره مد	پل با جداساز	پل بدون جداساز
اول	۱/۰۳	۰/۳۸
دوم	۰/۹۹	۰/۲۰
سوم	۰/۸۴	۰/۱۵

### ۲-۵- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی

در این پژوهش با در نظرگیری دو سناریوی مختلف برای آسیب پل‌ها (حذف ستون میانی یا ستون کناری در پایه پل) اثر جداساز لرزه‌ای در بهبود پاسخ پل‌ها سنجیده شده است. پاسخ‌ها در حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای با حذف ستون کناری از پایه پل در حالت اول و همچنین با حذف ستون میانی از پایه پل در حالت دوم، مقایسه می‌شوند. با توجه به اهمیت بیشینه پاسخ‌ها در مهندسی، هر مرحله حداکثر پاسخ‌ها در دو حالت موردنظر محاسبه شده و اثرگذاری جداساز لرزه‌ای بر مقادیر پاسخ‌ها به وسیله پارامتر  $\alpha_R$  بیان می‌شود. در رابطه ۴ این پارامتر تعریف شده است:

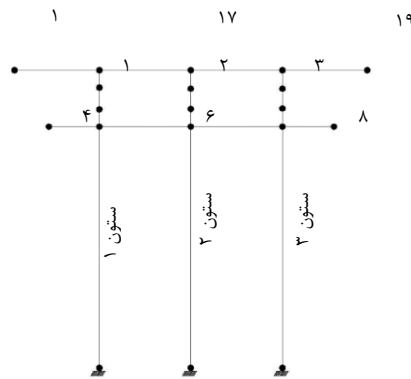
$$\alpha_R = \frac{R_{with Iso} - R_{without Iso}}{R_{without Iso}} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه ارائه شده  $R_{with Iso}$  حداکثر پاسخ موردنظر در حالت جداسازی شده حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی و  $R_{without Iso}$  حداکثر همان پاسخ در حالتی است که پل موردنظر فاقد جداساز لرزه‌ای می‌باشد. درصد افزایش پاسخ‌ها به کمک پارامتر  $\alpha_R$  برای هر یک از پاسخ‌ها در جدول ۲ تعریف می‌شود.

جدول ۲: تعریف  $\alpha_R$  در پاسخ‌های مختلف

پارامتر	تعریف
$\alpha_{F-C}$	نیروی محوری ستونها
$\alpha_M$	لنگر وسط دهانه
$\alpha_{B-S-T}$	برش پایه‌ی میانی در راستای عرضی پل
$\alpha_D$	جابجایی عرشه
$\alpha_{D-Capbeam}$	جابجایی سرستون
$\alpha_{M-Capbeam}$	لنگر وسط سرستون

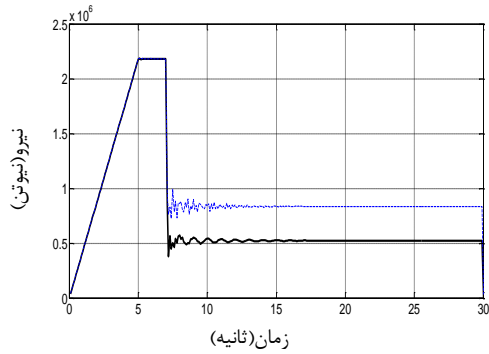
پس از محاسبه ضریب مورد نظر برای هر یک از موارد اشاره شده در جدول ۲، بلندشدگی و تغییر مکان ماندگار عرشه در راستای عرضی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۷ نمایی از پایه پل قرار داده شده و در قسمت پاسخ‌ها موقعیت گره‌های مختلف با این شماره‌گذاری بیان شده است. شماره‌های ۱ و ۲ و ۳ جداسازهای لرزه‌ای پایه میانی، گره‌های ۱۵ و ۱۷ و ۱۹ گره‌های عرشه و همچنین گره‌های ۴ و ۶ و ۸ گره‌های سرستون می‌باشند. شماره‌گذاری گره‌های پایه میانی در پل جداسازی نشده نیز به همین صورت می‌باشد و تنها جداسازهای لرزه‌ای وجود ندارند.



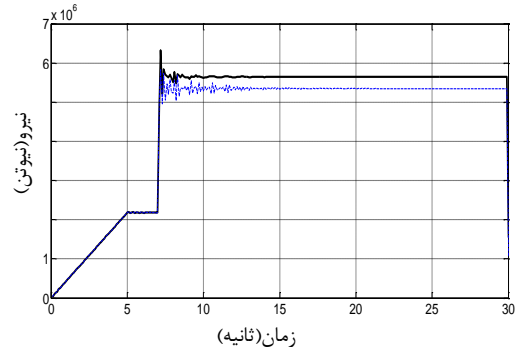
شکل ۷: نمای پایه پل و شماره‌گذاری گره‌ها به صورت اجزا محدود.

### ۵-۲-۱- حالت اول: مقایسه پاسخ‌ها در حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای ناشی از حذف ستون کناری

با توجه به اینکه ستون‌ها در حالت قائم قرار دارند، حذف آن‌ها می‌تواند نقش کلیدی در آسیب به سازه‌ها داشته باشد. در این حالت ستون کناری پایه وسط که با شماره ۱ شناخته می‌شود، حذف شده و بار تحمل شده توسط این ستون بین ستون‌های دیگر تقسیم می‌شود. در هر قسمت اثر حذف این ستون بر پاسخ‌های پل یکپارچه و غیریکپارچه مورد ارزیابی قرار گرفته است. تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌های ۲ و ۳ در شکل ۸ و مقادیر بیشینه پاسخ‌ها و ضریب  $\alpha_R$  در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.



ب: نیروی محوری ستون ۳



الف: نیروی محوری ستون ۲

شکل ۸: نیروی محوری ستون‌ها در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).

جدول ۴:  $\alpha_R$  برای نیروی محوری ستون ۳

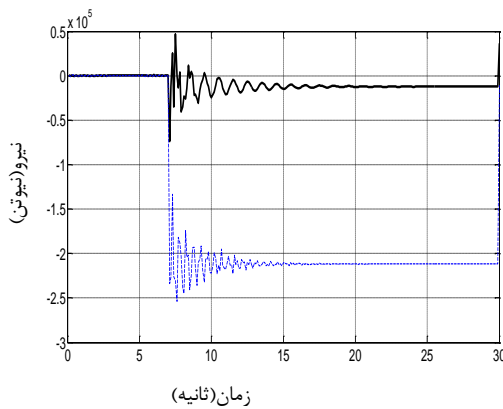
$\alpha_{F-C}$	بیشینه پاسخ	
	با جداساز	بدون جداساز
-۱۳	۸۶۴۰۳۷	۹۹۴۵۵۶

جدول ۳:  $\alpha_R$  برای نیروی محوری ستون ۲

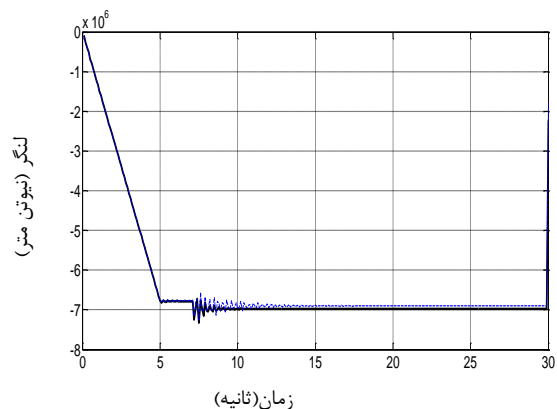
$\alpha_{F-C}$	بیشینه پاسخ	
	با جداساز	بدون جداساز
۸/۴	۶۳۲۲۶۵۰	۵۸۲۸۴۸۰

تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون ۲ در هر دو حالت تقریباً شبیه به هم می‌باشند. در هر دو حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای نیروی محوری بعد از حذف ستون به ترتیب بیش از سه و دو برابر نسبت به قبل از آن افزایش یافته است. همچنین بار ثقلی ستون ۱ توسط این ستون تحمل می‌شود، به همین دلیل نیروی محوری آن در هر دو حالت افزایش یافته است. با حذف ستون ۱ و عدم تعادل عرشه، نیروی محوری ستون ۳ کاهش می‌یابد. سیستم جداسازی در ستون ۲ باعث افزایش بارگذاری و در ستون ۳ باعث افزایش باربرداری نسبت به حالت پل یکپارچه می‌شود بنابراین بیشینه نیروی محوری ستون کناری به میزان ۱۳ درصد کاهش یافته است.

لنگر وسط دهانه و برش پایه جزء پاسخ‌های مهم برای ارزیابی پل‌ها به شمار می‌آید. لنگر وسط دهانه و نیروی برشی در راستای عرضی ناشی از جمع جبری نیروی برشی ستون‌ها در شکل ۹ و همچنین مقادیر بیشینه پاسخ‌ها و ضریب  $\alpha_R$  در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.



ب: نیروی برشی در راستای عرضی



الف: لنگر وسط دهانه

شکل ۹: لنگر وسط دهانه و نیروی برشی در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).



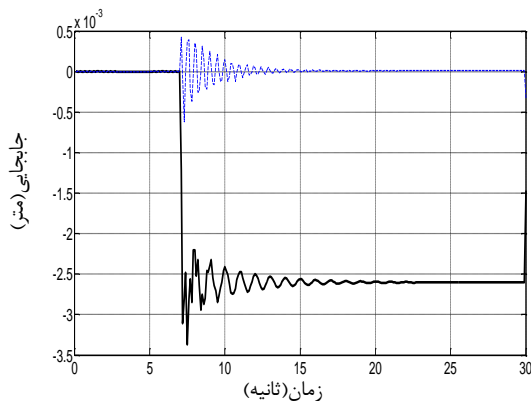
جدول ۶:  $\alpha_R$  برای نیروی برشی

بیشینه پاسخ		$\alpha_{B-S-T}$
بدون جداساز	با جداساز	
۲۵۳۶۶۳	۷۳۴۸۱/۱	-۷۱

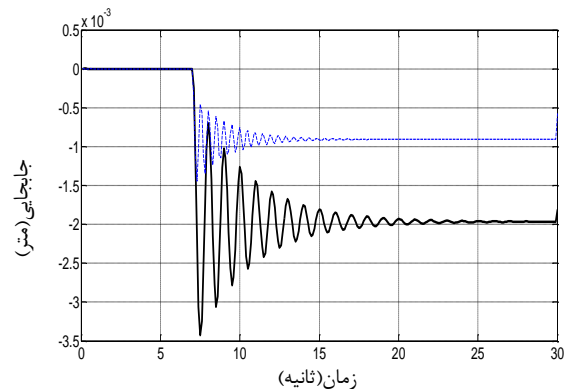
جدول ۵:  $\alpha_R$  برای لنگر وسط دهانه

بیشینه پاسخ		$\alpha_M$
بدون جداساز	با جداساز	
۷۳۶۵۴۰۰	۷۳۲۶۵۲۰	۰/۸

همان‌طور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، تنها تغییرات نوسانی کمی بعد از حذف ستون ۱ در لنگر وسط دهانه رخ داده است همچنین با توجه به جدول ۵، افزایش ۰/۸ درصدی بیشینه لنگر وسط دهانه تغییرات کم آن را نشان می‌دهد. در شکل ۹-ب برش پایه در حالت جداسازی شده و بعد از حذف ستون تغییر کرده اما این تغییرات با نوسان حول مقدار صفر در زمان کمی به تعادل رسیده است، این پاسخ در حالت بدون جداساز لرزه‌ای و پس از حذف ستون افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت با جداساز لرزه‌ای داشته است و بیشینه برش پایه در این حالت نسبت به حالت با جداساز با توجه به جدول ۶ تفاوت ۷۱ درصدی دارد. جابجایی عرضی عرشه و سرستون در موقعیت لبه‌ی سمت چپ در گره‌های ۱۵ و ۴ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. ضریب  $\alpha_R$  برای این پاسخ‌ها نیز در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است.



ب: جابجایی عرضی سرستون در گره ۴



الف: جابجایی عرضی عرشه در گره ۱۵

شکل ۱۰: جابجایی عرضی عرشه و سرستون در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).

جدول ۸:  $\alpha_R$  برای جابجایی عرضی سرستون

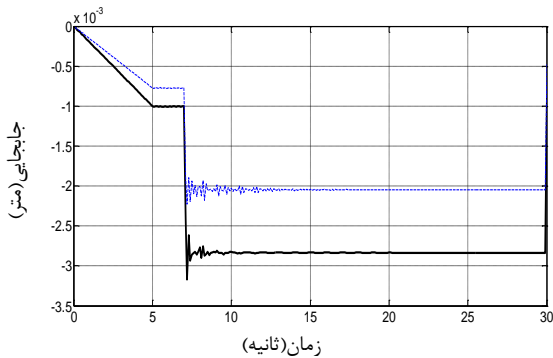
بیشینه پاسخ		$\alpha_{D-Capbeam}$
بدون جداساز	با جداساز	
۰/۰۰۰۶۲۲	۰/۰۰۳۳۷۲۷۱	۴۴۳

جدول ۷:  $\alpha_R$  برای جابجایی عرضی عرشه

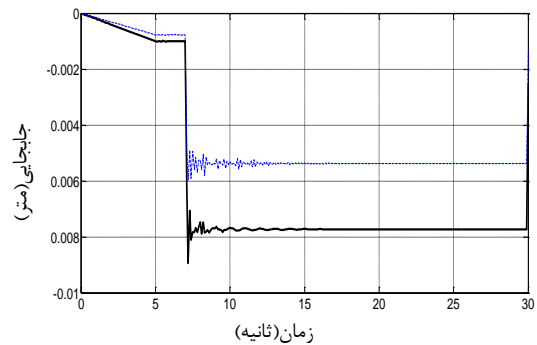
بیشینه پاسخ		$\alpha_D$
بدون جداساز	با جداساز	
۰/۰۰۱۴۴۸۰۷	۰/۰۰۳۴۲۳۳۸	۱۳۶

جابجایی عرضی عرشه در حالت با جداساز به علت وجود جداساز لرزه‌ای، کاهش سختی برشی و آزادی حرکت در راستای عرضی، مقدار بیشتری تغییر کرده است. با توجه به جدول ۷ بیشینه جابجایی در حالت جداسازی شده، بیش از ۳ میلی‌متر و در حالت جداسازی نشده کمتر از ۱,۵ میلی‌متر می‌باشد و بیش از دو برابر افزایش یافته است. جابجایی عرضی گره‌های ۱۷ و ۱۹ نیز به علت الاستیک بودن عرشه مانند گره ۱۵ می‌باشند. جابجایی عرشه در راستای عرضی در کوله‌های پل جداسازی شده همان جابجایی عرشه در پایه وسط

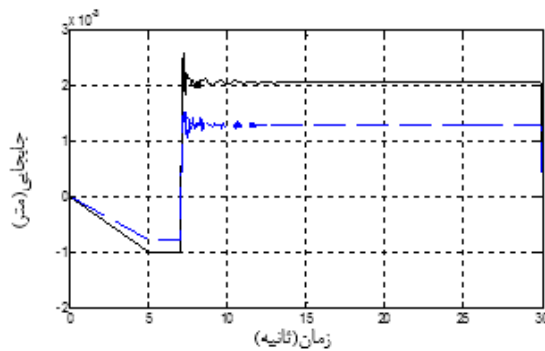
می باشد اما جابجایی عرضی پل جداسازی نشده برابر صفر می باشد. جابجایی قائم عرشه در سه موقعیت گره های ۱۵ و ۱۷ و ۱۹ در شکل ۱۱ گردآوری و با یکدیگر مقایسه شده اند.



ب: جابجایی قائم عرشه در گره ۱۷



الف: جابجایی قائم عرشه در گره ۱۵



ج: جابجایی قائم عرشه در گره ۱۹

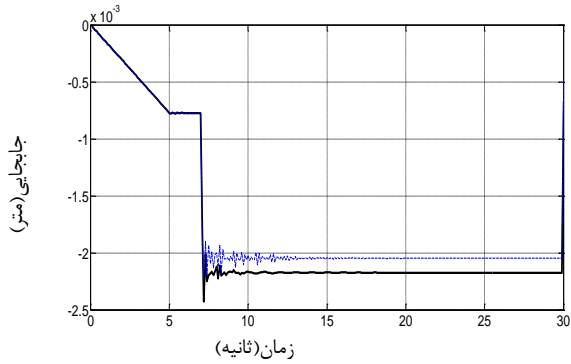
شکل ۱۱: جابجایی قائم عرشه در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).

جدول ۹:  $\alpha_R$  برای جابجایی قائم عرشه

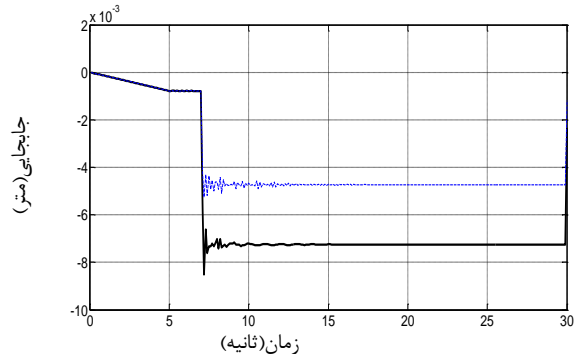
شماره گره	بیشینه پاسخ		$\alpha_D$
	با جداساز	بدون جداساز	
۱۵	۰/۰۰۸۹۴۶۳	۰/۰۰۵۹۷۸۷۸	۵۰
۱۷	۰/۰۰۳۱۷۱۶۶	۰/۰۰۲۲۳۰۰۱	۴۲
۱۹	۰/۰۰۲۶۰۲۹۸	۰/۰۰۱۵۲۷	۷۰

مشاهده می شود که جابجایی عرشه قبل و بعد از حذف ستون ۱ در حالت جداسازی شده بیش از ۸ برابر و در حالت جداسازی نشده بیش از ۵ برابر افزایش یافته است همچنین میزان جابجایی در گره ۱۷ نیز در حالت جداسازی شده بیش از ۳ برابر و در حالت جداسازی نشده بیش از ۲ برابر افزایش یافته است. در گره ۱۹، قبل از حذف ستون مقدار جابجایی منفی بوده و پس از حذف ستون و عدم تعادل عرشه و بالا آمدن گره ۱۹ به علت افت گره ۱۵، مقدار جابجایی تغییر جهت داده و افزایش یافته است. این افزایش در حالت جداسازی

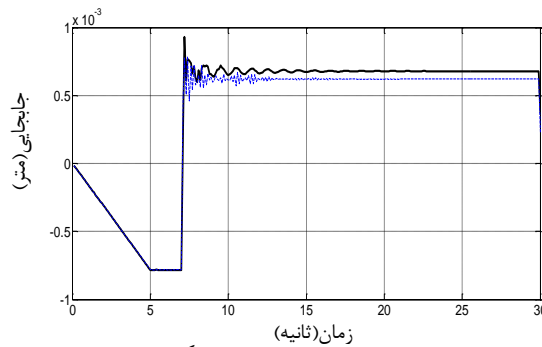
شده ۳ برابر و در حالت جداسازی نشده بیش از ۲ برابر می‌باشد. در شکل ۱۲، جابجایی قائم سه موقعیت مختلف سرستون در گره‌های ۴ و ۶ و ۸ نمایش داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین بیشینه پاسخها و ضریب  $\alpha_R$  برای این پاسخها در جدول ۱۲ قرار داده شده است.



ب: جابجایی قائم سرستون در گره ۶



الف: جابجایی قائم سرستون در گره ۴



ج: جابجایی قائم سرستون در گره ۸

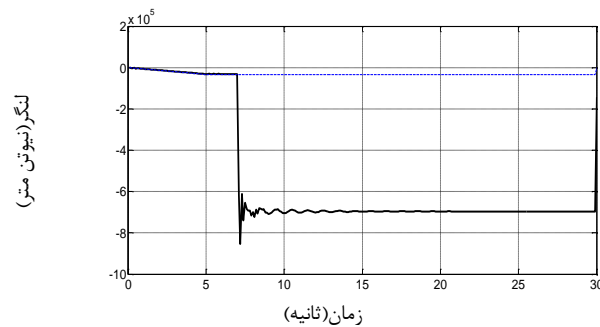
شکل ۱۲: جابجایی قائم سرستون در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).

جدول ۱۰:  $\alpha_R$  برای جابجایی قائم سرستون

شماره گره	بیشینه پاسخ		$\alpha_{D-Capbeam}$
	با جداساز	بدون جداساز	
۴	۰/۰۰۸۵۱۹۳۳	۰/۰۰۵۲۵۳	۶۲
۶	۰/۰۰۲۴۳۰۶۳	۰/۰۰۲۲۳	۹
۸	۰/۰۰۰۹۳۲۵۴۱	۰/۰۰۰۷۸۹	۱۸

با مقایسه جابجایی ماندگار افقی و قائم عرشه و سرستون این نتیجه حاصل شد که استفاده از جداساز لرزه‌ای در پل‌ها می‌تواند جابجایی‌ها را به مقدار کمتری نسبت به حالت بدون جداساز به عرشه انتقال بدهد. مقدار جابجایی عرشه نیز نسبت به سرستون کاهش بیشتری دارد زیرا عرشه بر روی جداسازها قرار دارد و سختی جداسازها در راستای قائم باعث جابجایی می‌شود اما سرستون‌ها بر روی ستون‌ها قرار دارند که ستون‌ها اجازه جابجایی قائم بیش از اندازه را به سرستون نمی‌دهند و عرشه افت بیشتری در جابجایی قائم نسبت به

سرستون‌ها دارد. جابجایی قائم گره ۶ قبل و بعد از حذف ستون، افزایش یافته است، این موضوع به علت افزایش بار ثقلی به صورت ناگهانی بر روی ستون ۲ می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲-ج جابجایی قائم قبل و بعد از حذف ستون حدود ۶ برابر در جهت مثبت افزایش یافته است، این موضوع به علت باربرداری از ستون ۳ در اثر حذف ستون ۱ می‌باشد. جابجایی قائم گره ۴ در حالت با و بدون جداساز به دلیل وجود جداساز و جابجایی عرشه و افزایش لنگر و در نتیجه نیروی بیشتر به سرستون، اختلاف بیشتری نسبت به ستون‌های دیگر دارد اما جابجایی قائم گره‌های ۶ و ۸ تقریباً شبیه به هم هستند و روند یکسانی دارند این موضوع به علت آن است که ستون‌های ۲ و ۳ حذف نمی‌شوند و مانع از جابجایی قائم می‌شوند. افزایش لنگر اشاره شده در وسط سرستون در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: لنگر وسط سرستون در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).

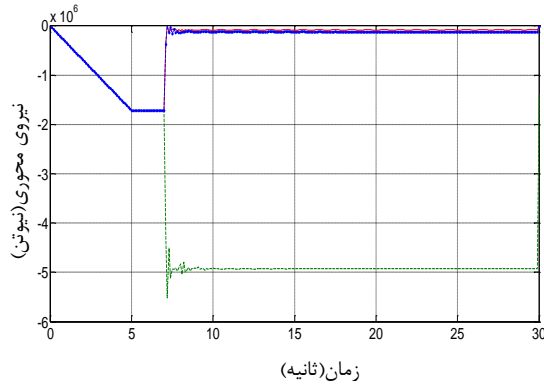
جدول ۱۱:  $\alpha_R$  برای لنگر وسط سرستون

پیشینه پاسخ		$\alpha_{M-Capbeam}$
بدون جداساز	با جداساز	
۳۳۶۶۲/۴	۸۵۳۳۳۵	۲۴۳۵

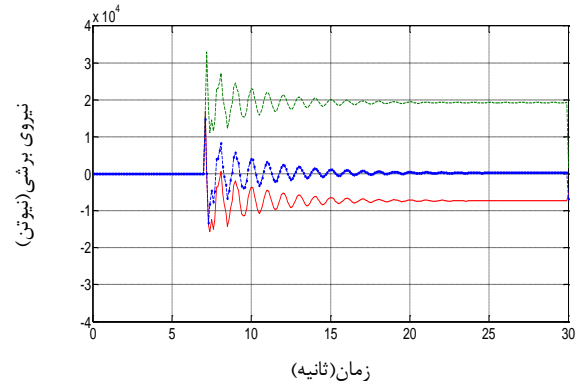
با توجه به شکل ۱۳ لنگر وسط سرستون در حالت جداسازی شده تقریباً ۷ برابر حالت جداسازی نشده می‌باشد. با توجه به جدول ۱۱ پیشینه لنگر سرستون در حالت جداسازی شده بیش از ۲۵ برابر پل یکپارچه می‌باشد. این موضوع خود دلیلی بر افزایش جابجایی قائم سرستون در حالت جداسازی شده نسبت به حالت بدون جداساز می‌باشد که در شکل ۱۲-الف نشان داده شد. در شکل ۱۴ نیروی برشی، نیروی محوری و جابجایی نسبی جداسازهای پایه میانی رسم شده و همچنین پیشینه پاسخ‌ها در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲:  $\alpha_R$  برای جابجایی قائم سرستون

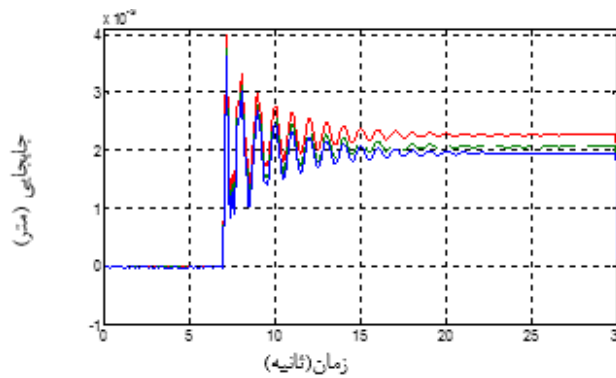
پاسخ	پیشینه پاسخ		
	۱	۲	۳
نیروی برشی	۱۶۹۵۷/۳	۳۲۹۵۲/۲	۱۴۷۵۴/۸
نیروی محوری	۳۲۹۱۳۶	۵۵۲۳۳۰۰	۳۷۲۵۸۳
جابجایی نسبی	۰/۰۰۳۹۹۸۶۷	۰/۰۰۳۷۴۷۴۳	۰/۰۰۳۶۱۳۶۸



ب: نمودار نیروی محوری



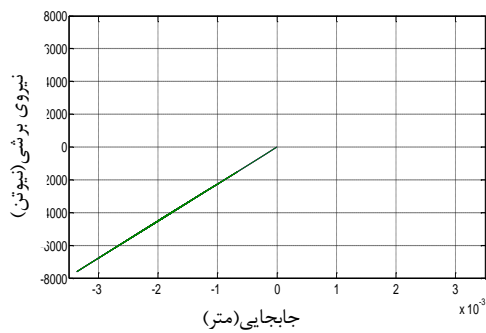
الف: نمودار نیروی برشی



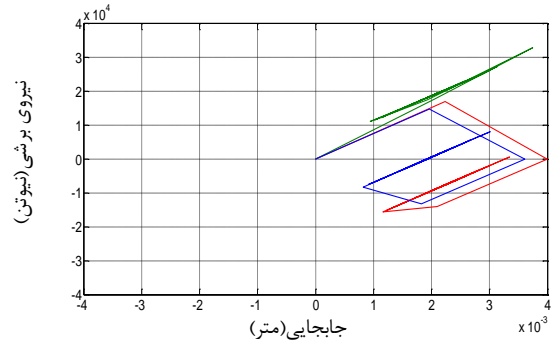
ج: نمودار جابجایی نسبی

شکل ۱۴: جداساز ۱ (قرمز) جداساز ۲ (سبز) جداساز ۳ (آبی).

با توجه به شکل ۱۴-الف نیروی برشی سه جداساز تا قبل از حذف ستون ۱ صفر می‌باشد. پس از حذف ستون ۱ نیروی برشی جداسازهای ۱ و ۳ کاهش می‌یابد و این کاهش به دلیل کاهش بار قائم، به ترتیب به علت حذف ستون ۱ و باربرداری از ستون ۳ می‌باشد اما نیروی برشی جداساز ۲ به علت تحمل بار بیشتر ناشی از حذف ستون ۱، افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه میان نیروی محوری و برشی جداسازها، به ارزیابی نیروی محوری جداسازهای پایه میانی نیز پرداخته شده است. پس از حذف ستون ۱ جداسازهای ۱ و ۳ دچار باربرداری و جداساز ستون ۲ با افزایش نیروی محوری همراه خواهد بود به همین علت نیروی برشی جداسازهای ۱ و ۳ کاهش و جداساز ۲ افزایش یافته است این نکته نیز قابل ذکر است که تغییرات نیروی قائم وارد بر جداسازها بر ضریب اصطکاک نیز اثر می‌گذارد که این موضوع در قسمت قبل به تفصیل بیان شده است. با توجه به شکل ۱۴-ج به علت وجود جداساز لرزه‌ای در هر سه ستون، جابجایی نسبی افزایش یافته است ولی میزان جابجایی نسبی جداساز ۱ بیشتر از جداساز ۲ و جداساز ۲ بیشتر از جداساز ۳ است، این موضوع به آن علت است که سمت چپ سرستون، به علت حذف ستون ۱ کمی پایین می‌آید و این خود باعث جابجایی نسبی بیشتر جداساز ۱ می‌شود. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودار نیرو-جابجایی جداسازها قرار داده شده است.



شکل ۱۶: نمودار نیرو-جابجایی جداسازهای کوله



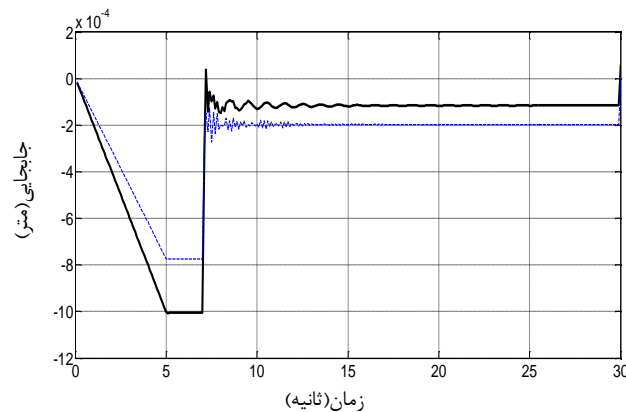
شکل ۱۵: نمودار نیرو-جابجایی جداساز ۱ (قرمز) جداساز ۲ (سبز) جداساز ۳ (آبی)

نمودار نیرو-جابجایی ستون‌های ۱ و ۳ به علت باربرداری و تسلیم نشدن جداساز به صورت حلقه ناقص تشکیل می‌شوند. در جداساز ۲ به علت افزایش نیروی قائم ناشی از حذف ستون ۱، نیروی برشی افزایش می‌یابد و پس از طی چند سیکل به صورت خطی حرکت کرده و در اثر میرایی متوقف می‌شود. در این جداساز روند نمودار نیرو-جابجایی به صورت خطی افزایش یافته است. با توجه به شکل ۱۶، نمودارهای هر سه جداساز کوله به یک شکل می‌باشد. نمودار نیرو-جابجایی این جداسازها نیز نشان می‌دهد که با حذف ستون، این نمودار به صورت خطی تغییر می‌کند و تسلیم نمی‌شوند. در حالت بدون جداساز لرزه‌ای، زمانی که ستون ۱ حذف می‌شود افت قائم جابجایی در عرشه و سرستون صورت می‌گیرد و بار ثقلی عرشه باعث جابجایی ماندگار شده و عرشه به محل اولیه باز نمی‌گردد. در حالت جداسازی به علت وجود جداساز لرزه‌ای و کاهش سختی برشی، این جابجایی به میزان بیشتری اتفاق می‌افتد در نتیجه جابجایی ماندگار عرشه‌ی پل جداسازی شده در اثر اختلاف تراز ناشی از حذف ستون و کاهش سختی افقی، به علت حضور جداساز خواهد بود و حذف ستون ۱ باعث تسلیم شدن و رخداد اصطکاک نمی‌شود. در جدول ۱۳ مقادیر جابجایی ماندگار برای پل با و بدون جداساز لرزه‌ای قرار داده شده است. مشاهده می‌شود که جابجایی ماندگار عرشه در راستای عرضی با جداساز لرزه‌ای بیش از ۲ برابر این پاسخ در هنگام پل یکپارچه می‌باشد.

جدول ۱۳: جابجایی ماندگار عرشه

جابجایی ماندگار عرشه	
با جداساز	بدون جداساز
-۰/۰۰۱۹۶۶۳۲	-۰/۰۰۰۹۰۷۱۵۵

در شکل ۱۷ تاریخچه جابجایی قائم عرشه محاسبه شده است. در حالت جداسازی نشده جابجایی قائم منفی خواهد بود و پس از حذف ستون به علت باربرداری در جهت مثبت کاهش می‌یابد اما مقدارش مثبت نمی‌شود. در پل جداسازی شده مقدار جابجایی قائم مثبت می‌شود که نشان‌دهنده‌ی بلندشدگی عرشه می‌باشد.



شکل ۱۷: جابجایی قائم عرشه در بالای جداساز.

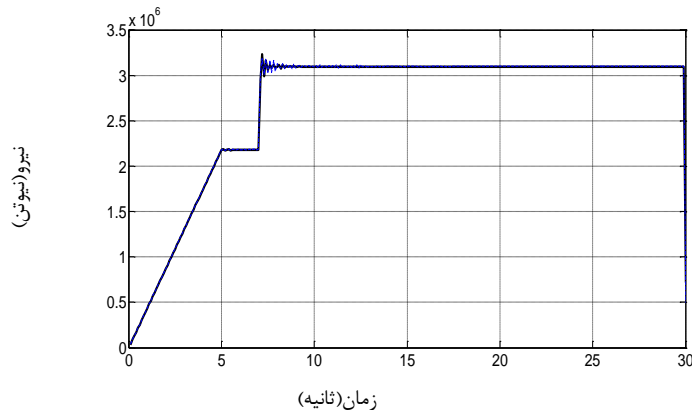
### ۵-۲-۲- حالت دوم: مقایسه پاسخها در حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای ناشی از حذف ستون میانی

در این حالت ستون میانی شماره ۲ در شکل ۷ حذف شده و اثر حذف این ستون بر پاسخ‌های پل با جداساز و بدون جداساز لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. این نکته نیز قابل ذکر است که با حذف ستون میانی، پل در راستای طولی خود متقارن باقی می‌ماند بنابراین جابجایی عرضی نقاط مختلف پایه‌ی وسط، سرستون، جابجایی نسبی جداسازها، جابجایی ماندگار عرشه و بلندشدگی آن و همچنین برش پایه بسیار کم و برابر صفر خواهد بود. با حذف ۲ مقدار بار تحمل شده توسط این ستون بین ستون‌های دیگر تقسیم می‌شود و ستون‌های ۱ و ۳ مانند هم عمل می‌کنند. در شکل ۱۸ نیروی محوری ستون ۱ ارائه شده و در جدول ۱۴ بیشینه نیروی محوری و ضریب  $\alpha_R$  قرار داده شده است. تاریخچه زمانی نیروی محوری در هر دو حالت شبیه به هم می‌باشند و نیروی محوری بعد از حذف ستون حدود ۱/۵ برابر نسبت به قبل از آن افزایش یافته است.

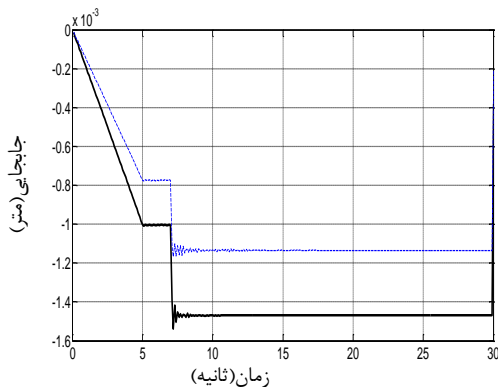
جدول ۱۴:  $\alpha_R$  برای نیروی محوری ستون

بیشینه پاسخ		$\alpha_{F-C}$
بدون جداساز	با جداساز	
۳۱۸۴۲۲۰	۳۲۳۵۱۳۰	۶/۱

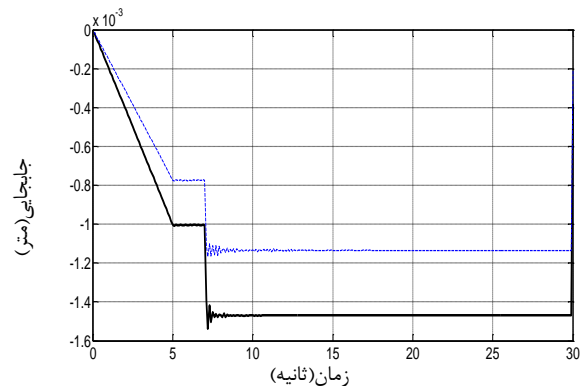
به علت تقارن نیروی محوری ستون ۳ مانند نیروی محوری ستون ۱ خواهد بود. در این حالت نیز تغییرات محسوسی در لنگر وسط دهانه قبل و بعد از حذف ستون ۲ رخ نداده است و تنها باعث تغییرات کمی بعد از حذف ستون شده است همچنین مانند حالت قبل تغییرات لنگر در حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای نیز تغییر چندانی نداشته اما مقدار لنگر نسبت به حالت قبل کاهش پیدا کرده است و این موضوع به علت متقارن ماندن پل پس از خرابی ستون میانی می‌باشد. در شکل ۱۹ جابجایی قائم عرشه در گره‌های ۱۵ و ۱۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که جابجایی عرشه قبل و بعد از حذف ستون در حالت با و بدون جداسازی حدود ۵۰ درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۸: نیروی محوری ستون ۱ در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).



ب: جابجایی قائم عرشه در گره ۱۷



الف: جابجایی قائم عرشه در گره ۱۵

شکل ۱۹: جابجایی قائم عرشه در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).

جدول ۱۶:  $\alpha_R$  برای جابجایی قائم گره ۱۷ در عرشه

بیشینه پاسخ		$\alpha_D$
با جداساز	بدون جداساز	
۰/۰۰۱۵۳۸۵۹	۰/۰۰۱۱۶۷۰۵	۳۲

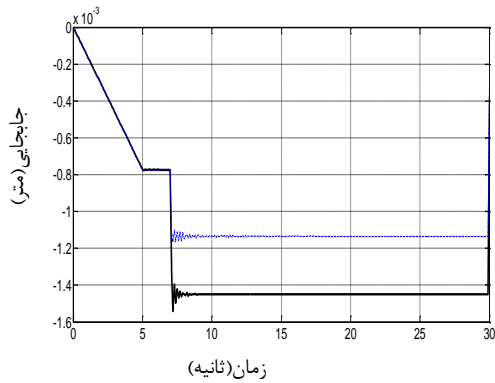
جدول ۱۵:  $\alpha_R$  برای جابجایی قائم گره ۱۵ در عرشه

بیشینه پاسخ		$\alpha_D$
با جداساز	بدون جداساز	
۰/۰۰۱۵۳۸۵۹	۰/۰۰۱۱۶۷۰۵	۲۳

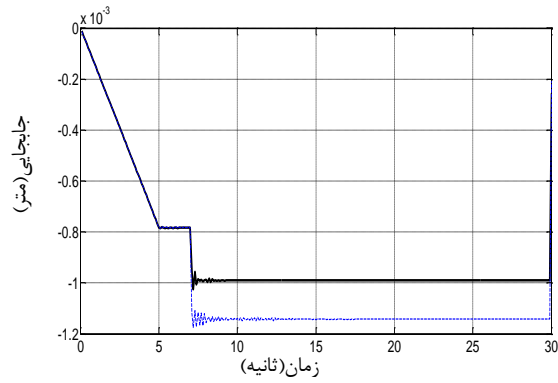
جابجایی قائم عرشه در حالت جداسازی شده به علت سختی کمتر جداسازها در راستای قائم، بیشتر از پل بدون جداساز لرزه‌ای است. تغییرات تاریخیچه زمانی این پاسخ نشان می‌دهد که افت ارتفاع یا جابجایی قائم عرشه در حالت جداسازی شده بیشتر است. با توجه به جدول ۱۵ جابجایی قائم در حالت جداسازی شده تا ۳۲ درصد افزایش یافته است. میزان افت ارتفاعی عرشه در این حالت نسبت به حالتی که ستون کناری دچار آسیب شده کمتر خواهد بود زیرا در این حالت پل متقارن است و میزان افت را هر دو ستون ۱ و ۳ تحمل می‌کنند اما در حالت قبل به علت نامتقارن بودن این افت بیشتر در گره ۱۵ اتفاق می‌افتاد. جابجایی قائم گره ۱۷ نیز مانند گره ۱۵ می‌باشد این موضوع نشان می‌دهد که حذف ستون ۲ باعث جابجایی بیشتر این گره نسبت به گره ۱۵ در اثر فقدان ستون میانی نمی‌شود و تمام گره‌های عرشه با هم و به یک مقدار افت پیدا می‌کنند. جابجایی قائم نیز برای گره ۱۷ نسبت به حالت اول کاهش کمتری به علت متقارن



بودن پل دارد. جابجایی قائم عرشه در کوله‌های پل جداسازی شده و نشده هر دو تقریباً برابر صفر هستند اما جابجایی پل جداسازی شده به علت استفاده از جداساز و سختی قائم کمتر نسبت به حالت جداسازی نشده مقدار بیشتری دارد. جابجایی قائم گره‌های ۴ و ۶ از سرستون در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. به دلیل تقارن پل جابجایی قائم گره ۸ همانند گره ۴ می‌باشد.



ب: جابجایی قائم سرستون در گره ۶



الف: جابجایی قائم سرستون در گره ۴

شکل ۲۰: جابجایی قائم سرستون در حالت با جداساز (خط توپر) و بدون جداساز (خط چین).

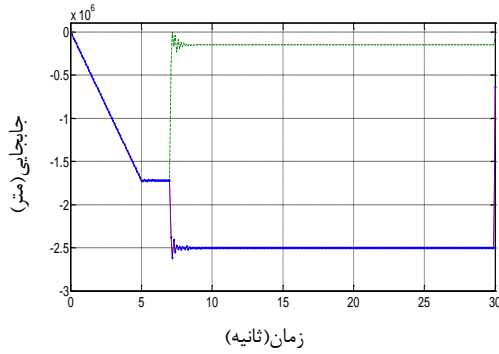
جدول ۱۸:  $\alpha_R$  برای جابجایی قائم گره ۶ در سرستون

بیشینه پاسخ		$\alpha_D$
بدون جداساز	با جداساز	
۰/۰۰۱۱۶۷۰۵	۰/۰۰۱۵۴۰۵۳	۳۲

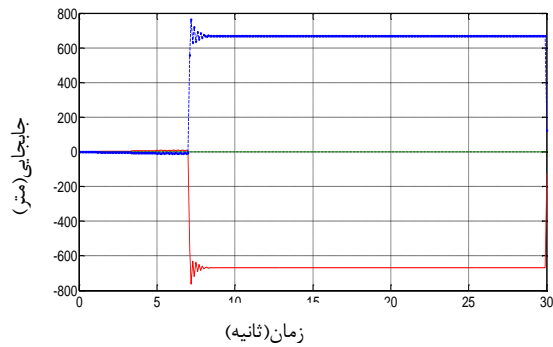
جدول ۱۷:  $\alpha_R$  برای جابجایی قائم گره ۴ در سرستون

بیشینه پاسخ		$\alpha_D$
بدون جداساز	با جداساز	
۰/۰۰۱۱۷۵۱۸	۰/۰۰۱۰۲۵۲۶	-۱۳

در حالت اول به علت حذف ستون ۱ و نامتوازن بودن سرستون و در نتیجه جابجایی نسبی جداسازها، عرشه جابجا شده و نیروی وزن ناشی از عرشه باعث ایجاد لنگر در سرستون و افت بیشتر سرستون به صورت قائم می‌شود و جابجایی قائم این گره در حالت اول و جداسازی شده بیشتر از بدون جداسازی می‌باشد، ولی در این حالت جابجایی قائم در گره ۴ در حالت جداسازی نشده بزرگ‌تر از حالت جداسازی شده می‌باشد و مقدار بیشینه آن ۱۳ درصد کاهش یافته است. مقدار جابجایی عرشه نیز نسبت به سرستون به علت سختی قائم جداسازها کاهش بیشتری دارد این اختلاف نسبت به حالت اول به دلیل متقارن بودن پل نسبت به راستای طولی، بیشتر می‌باشد. جابجایی گره ۶ بدون و با جداساز لرزه‌ای به ترتیب حدود ۱،۵ و ۲ افزایش یافته است. افت قائم آن در اثر حذف ستون ۲ و خالی شدن پایین گره ۶ می‌باشد. با توجه به جدول ۱۶ مقدار بیشینه این پاسخ ۳۲ درصد افزایش یافته است در نتیجه استفاده از جداساز لرزه‌ای جابجایی قائم گره ۴ را کاهش و جابجایی گره ۶ را افزایش داده است. نمودار جابجایی گره ۴ و ۶ در پل یکپارچه تغییری نکرده است این موضوع می‌تواند در اثر یکپارچه عمل کردن پایه میانی پل به علت استفاده نکردن از جداساز لرزه‌ای باشد. در شکل ۲۱ نمودار نیروی برشی و محوری جداسازهای پایه میانی قرار داده شده است. با توجه به شکل ۲۱-الف پس از حذف ستون ۲ نیروی برشی جداسازهای ۱ و ۳ افزایش می‌یابد و این افزایش به دلیل حذف ستون ۲ می‌باشد. نیروی برشی ستون ۲ مقدار بسیار کمی می‌باشد این موضوع به علت کاهش بار محوری است که در شکل ۲۱-ب نیز قابل مشاهده است.



ب: نمودار نیروی محوری



الف: نمودار نیروی برشی

شکل ۲۱: نمودار نیروی برشی و محوری جداساز ۱ (قرمز) جداساز ۲ (سبز) جداساز ۳ (آبی).

جدول ۲۰: نیروی محوری

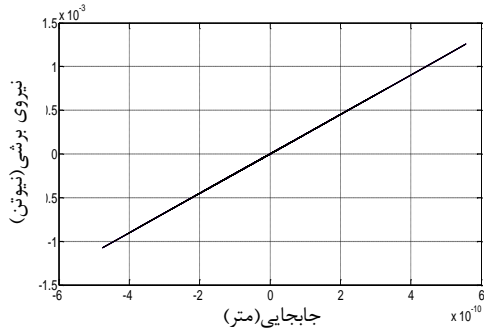
بیشینه نیروی محوری جداسازها		
جداساز ۱	جداساز ۲	جداساز ۳
۲۶۱۸۸۲۰	۰	۲۶۱۸۸۲۰

جدول ۱۹: نیروی برشی

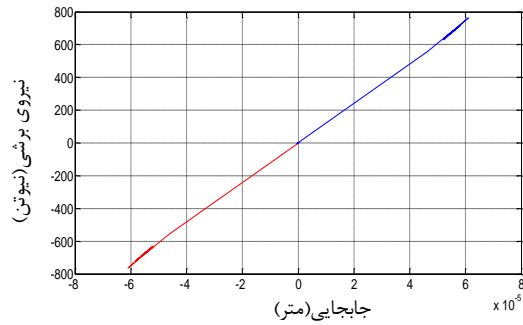
بیشینه نیروی برشی جداسازها		
جداساز ۱	جداساز ۲	جداساز ۳
۷۶۲/۰۶۴	۰/۰۱۲۹۵۱	۷۶۲/۰۶۴

همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت متقارن بودن پل نسبت به راستای طولی، نیروی برشی دو جداساز ۱ و ۳ با هم برابر و عملکرد یکسانی دارند. در مقایسه با حالت اول نیروهای برشی کاهش یافته‌اند زیرا در حالت اول (حذف ستون ۱) در جداساز ۱ نیروی بیشتر و در جداساز ۳ در اثر باربرداری، نیروی محوری کمتر توسعه می‌یابد اما در این حالت به علت متقارن بودن پل پس از حذف ستون ۲ در جداسازهای ۱ و ۳ به طور یکسان بار قائم توزیع شده و در نتیجه نیروی افقی، کمتر از حالت قبل و به صورت یکسان در جداسازها ایجاد می‌شود. با توجه به شکل ۲۱-ب و پس از حذف ستون ۲ جداساز ۲ دچار باربرداری و جداسازهای ۱ و ۳ با افزایش نیروی محوری همراه خواهند بود به همین علت نیروی برشی جداسازهای ۱ و ۳ افزایش و جداساز ۲ کاهش یافته است و در لحظه‌ای مقدار این نیرو صفر خواهد شد.

در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نمودار نیرو-جابجایی جداسازها در پایه میانی و کوله‌ها قرار داده شده است. مشاهده می‌شود که نمودار جداسازهای ۱ و ۳ هر دو مانند هم و در دو جهت مختلف می‌باشند. به علت افزایش بار محوری هر دو جداساز ناشی از حذف ستون ۲ نمودارها به صورت خطی تغییر می‌کنند زیرا نیروی محوری و در نتیجه نیروی برشی افزایش می‌یابند.



شکل ۲۳: نمودار نیرو-جابجایی جداسازهای کوله



شکل ۲۲: نمودار نیرو-جابجایی جداساز ۱ (قرمز) جداساز ۲ (سبز) جداساز ۳ (آبی)

با توجه به شکل ۲۲ نمودار نیرو-جابجایی جداساز ۲ دارای مقادیر کوچک می‌باشد، همچنین جابجایی نسبی جداسازهای کوله به علت متقارن بودن نسبت به راستای طولی، دارای تقارن بوده و مقادیر خطی و کم می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۲۲ و ۲۳ هیچ یک از جداسازها تسلیم نمی‌شوند زیرا نیروی برشی و جابجایی آن‌ها به مقادیر تسلیم نمی‌رسند و لغزش در آن‌ها رخ نمی‌دهد. در جداساز ۲ به علت افت وسط سرستون نیروی محوری کاهش می‌یابد و این کاهش ناشی از باربرداری نمی‌باشد در نتیجه بلندشدگی در عرشه رخ نمی‌دهد.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت خرابی پیش‌رونده و استفاده از جداسازهای لرزه‌ای در پل‌ها، در این مقاله به مدل‌سازی دو نمونه پل دو دهانه به طول ۵۱ متر با جداساز و بدون جداساز لرزه‌ای در نرم‌افزار OpenSees پرداخته شد. همچنین از مدل رفتاری ارائه‌شده در تحقیق دئو برای پارامتر ضریب اصطکاک، استفاده شده است. عملکرد دو پل مورد نظر تحت دو سناریوی آسیب ناشی از حذف ستون کناری در حالت اول و حذف ستون میانی از پایه پل در حالت دوم ارزیابی شده و تاریخچه زمانی و بیشینه پاسخ‌ها تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی محاسبه شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر قابل بیان است:

- استفاده از جداساز لرزه‌ای در اکثر پاسخ‌ها به جز بیشینه نیروی محوری ستون کناری و برش پایه در حالت اول و جابجایی قائم گره سمت چپ سرستون در حالت دوم، باعث افزایش بیشینه پاسخ‌ها شده در نتیجه استفاده از جداساز لرزه‌ای بیشینه پاسخ‌ها را افزایش می‌دهد. البته در تعدادی از پاسخ‌ها این افزایش، مقدار کمی می‌باشد. این نتیجه را می‌توان برای دیگر پل‌ها نیز انتظار داشت زیرا پاسخ‌ها به جداسازی در پل‌ها وابسته است اما برای نتیجه‌گیری دقیق‌تر باید پل‌های دیگر را مورد بررسی قرار داد.
- در حالت اول و در پل جداسازی شده، به علت نامتعادل شدن پل و لنگر وسط سرستون، گره سمت چپ سرستون نسبت به گره‌های میانی و سمت راست آن افت بیشتری پیدا کرده و ضریب  $\alpha_R$  برای پاسخ بیشینه آن برابر ۶۲ درصد است.
- در حالت اول، جابجایی ماندگار در راستای عرضی به علت حذف ستون کناری و برهم خوردن تعادل پل‌ها رخ داده و مقدار آن در حالت جداسازی شده بیش از ۲ برابر حالت پل جداسازی نشده است؛ اما در حالت دوم به علت تقارن در راستای طولی، این جابجایی برابر صفر می‌باشد.
- با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی با حذف ستون کناری و میانی پایه، هیچ یک از جداسازها تسلیم نشده و در نتیجه جابجایی ماندگار ناشی از عملکرد اصطکاک جداسازها در عرشه رخ نمی‌دهد.

- در حالت دوم، جابجایی عرضی نقاط مختلف پایه‌ی وسط، جابجایی نسبی جداسازها، جابجایی ماندگار عرشه و بلندشدگی آن و همچنین برش پایه دارای مقادیر کم و تقریباً صفر خواهد بود، این موضوع به علت تقارن پل‌ها در راستای طولی آن‌ها می‌باشد اما در حالت اول، بلندشدگی عرشه در اثر نامتعادل شدن عرشه رخ می‌دهد و مقدار آن در پل جداسازی شده ۰/۶ میلی‌متر می‌باشد.
- در حالت اول، ستون میانی دچار بارگذاری و ستون کناری دچار باربرداری می‌شود اما در حالت دوم هر دو ستون کناری دچار بارگذاری می‌شوند و ضریب  $\alpha_R$  برای پاسخ بیشینه آن برابر ۱/۶ درصد است. همچنین به علت متقارن بودن پل نسبت به راستای طولی، بار تحمل شده توسط این ستون‌ها از بار ستون میانی در حالت اول کمتر می‌باشد.

## مراجع

- [1]Starossek U.; "Progressive collapse of bridges—Aspects of analysis and design"; International Symposium on Sea-Crossing Long-Span Bridges, Mokpo, Korea; February 15-17,(2006).
- [2] Astaneh-Asl, A.; " Progressive Collapse of Steel Truss Bridges, the Case of I-35W Collapse"; Proceedings of 7th International Conference on Steel Bridges, Guimarães, Portugal(2008).
- [3]Wibowo Hartanto, S.M.CSCE, Silvena S. Reshotkina and David T. Lau ; "Modelling Progressive Collapse of RC Bridges during Earthquakes"; CSCE 2009 Annual General Conference ,Congrès annuel générale annuelle SCGC (2009).
- [4]Y. Liu, Han B. and Ma Xiao.; "Advances in Progressive Collapse of Bridge Structures"; Pacific Science Review.13(3), 173-81, (2011).
- [5] Cai. J.G., Y.X. Xu, L.P. Zhuang, J. Feng, J. Zhang.; "Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges"; *Journal of Zhejiang University-Science A*. 13(5 323-334 ) (2012).
- [6]Miyachi Kazuhiro, Shunichi Nakamura ,Akihiro Manda ; "Progressive collapse analysis of steel truss bridges and evaluation of ductility"; *Journal of Constructional Steel Research* 78 -192-200, (2012).
- [7]Olmati Pierluigi Giuliani Luisa ; "Progressive collapse susceptibility of a long span suspension bridge"; Structures Congress 2013 © ASCE (2013).
- [8]Xu Zhen, Xinzheng Lu; Hong Guan; Xiao Lu; and Aizhu Ren.; "Progressive-Collapse Simulation and Critical Region Identification of a Stone Arch Bridge"; *Journal of performance constructed facilities- JANUARY/FEBRUARY* (2013).
- [9]Das R., A. D. Pandey, Soumya, M. J. Mahesh, P. Saini, and S. Anvesh.; "Progressive Collapse of a Cable Stayed Bridge";12th International Conference on Vibration Problems, (2016).
- [10]Jangid, R. S .; "Introduction to Earthquake Engineering "; *National Programme on Technology Enhanced Learning(NPTEL)*, Chapter 8 Feb, (2014) .
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Guide Specifications for Seismic Isolation Design, (2010).
- [12]PEER. Open System for Earthquake Engineering Simulations(OpenSees).Version 2.4.5, Berkeley:Pacific Earthquake Eng.Research Center,Univ.of California:[online]. 2014. <http://opensees.berkeley.edu>.
- [13]Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, and Fenves GL.; "OpenSees command language manual, open system for earthquake engineering simulation (OpenSees) "; 207-211, (2006).
- [14]Kent D C and Park R.; "Flexural members with confined concrete";*J. Struct. Div., ASCE*, 97(7), pp.1969-1990 (1971).
- [15]Simo JC and HughesT J R.; "Computational inelasticity"; New York, NY, *Springer*(1998).
- [۱۶] معاونت برنامه‌ریزی و راهبردی ریاست جمهوری.(۱۳۸۶).نقشه‌های همسان پل‌ها و عرشه پل‌های راه‌دهانه ۱۰ تا ۲۵ متر) نشریه شماره ۲۹۴.
- [17] Dao,Nhan D.,Keri L. Ryan,Eiji Sato and Tomohiro Sasaki.; "Predicting the displacement of triple pendulum™ bearings in a full-scale shaking experiment using a three-dimensional element"; *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, 42:1677-1695(2013).
- [18]Mokha, A., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M.; "Teflon bearings in aseismic base isolation : Experimental studies and Mathematical Modeling";*Technical Report NCEER-88-0038*, (1988).
- [19] Bowden,F.P .and Tabor,D .; "*The friction and lubrication of solids part II*"; Oxford,(1968).
- [20]Kaewunruen S, and Remennikov A.M.; "Progressive Failure of Prestressed Concrete Sleepers under Multiple High Intensity Impact Loads";*Journal of Engineering Structures*. p;31. 2460-2473 (2009).
- [21]Parikh R.D and Patel P.V.; "Various Procedure for Progressive Collapse Analysis of Steel Building";*The IUP Journal of Structural Engineering*, (2013).
- [22]Kim H J and Christopoulos C .; "Seismic design procedure and seismic response of post-tensioned self-centering steel frames";*Earthquake Engineering and Structural Dynamics* p.355-376, (2009).