

## بررسی سختی و مقاومت تسلیم جداساز بر پاسخ لرزه ای پلها\*

هاشم شریعتمدار<sup>(۱)</sup>پژمان دلاوری<sup>(۲)</sup>

**چکیده** به منظور بررسی اثر سیستم جداساز بر پاسخ پلها، دو نوع پایه‌ی متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. پلها در حالت جدا نشده طبق ضوابط آیین نامه‌ی AASHTO96 طراحی شده و سپس مدل تحلیلی آن‌ها با استفاده از برنامه‌ی DRAIN-2DX ساخته شده و در حالت‌های مختلف جدا نشده و جدا شده با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مختلف، تحت تحلیل تاریخی‌های زمانی غیر خطی قرار گرفته اند. جهت مطالعه‌ی اثر سختی و مقاومت تسلیم سیستم جداساز بر پاسخ پل با پایه‌ی جدا شده، طی تحلیل‌های مکرر، سختی سیستم جداساز به صورت گام به گام از ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ سختی الاستیک پایه و در هر گام، مقاومت تسلیم سیستم جداساز از ۵٪ تا ۲۰٪ جرم سهمیه‌ی پایه تغییر داده شده است. در هر مورد، مقادیر حداکثر تغییر مکان عرشه، شکل پذیری مورد نیاز جداساز، ضریب حفاظت پایه و تغییر مکان پسماند عرشه محاسبه گردید و نتایج در قالب نمودارهایی ارائه شده است. در پایان با استناد به نتایج به دست آمده از این تحقیق، پیشنهاداتی در زمینه‌ی نحوه‌ی تحلیل و طراحی پل‌های جداسازی شده ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی** جداساز، سختی، مقاومت تسلیم، تحلیل تاریخی‌های زمانی غیر خطی، حداکثر تغییر مکان عرشه، شکل پذیری مورد نیاز جداساز، ضریب حفاظت پایه، تغییر مکان پسماند عرشه

### Investigation of Isolator Stiffness and Yield Strength on Seismic Response of Bridges

H. Shariatmadar

P. Delavari

**Abstract** To investigate the effect of isolation system on bridge response, two types of pier are studied. The bridge without isolator is designed based on AASHTO96 and then the system with and without isolator are modeled in DRAIN-2DX program. The nonlinear time history analyses are performed on bridges subjected to different earthquake records. To study the effect of stiffness and yield strength of isolator on response of bridge with isolated pier, during the repetitive analyses, the isolator stiffness is varied from 20% to 100% of elastic pier stiffness in each step. The ratio of yield strength to pier tributary mass is varied from 5% to 20%. In each case, the maximum deck displacement, the isolator ductility demand the Pier Protection Index (PPI) and the deck residual displacement are computed and the results are presented in form of diagrams. Finally, based on results obtained from this research, the conclusion are made and the recommendations to design the isolated bridges are presented.

**Key Words** Isolator, Stiffness, Yield Strength, Nonlinear Time History Analysis, Maximum Deck Displacement, Isolator Ductility Demand, Pier Protection Index, Residual Deck Displacement.

\* تاریخ تصویب مقاله ۸۸/۲/۵ و تاریخ دریافت نسخه‌ی نهایی اصلاح شده ۸۸/۲/۱۲

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان

### مقدمه

اکثر روش‌های طرح سازه‌های مقاوم بر اساس این فرض استوار است که نیروهای ناشی از زلزله از طریق پی به سازه منتقل شده و سپس این نیرو میان عناصر مقاوم خاصی که برای این منظور در سازه تعبیه شده است، توزیع و توسط آن‌ها تحمل می‌گردد [1].

روش دیگری که در دهه‌های اخیر به علت در دسترس قرار گرفتن امکانات مختلف؛ چه از نظر تکنولوژی ساخت و چه از نظر دانش فنی در خصوص تحلیل و طراحی به عرصه‌ی عمل وارد شده است، جداسازی لرزه‌ای است.

هدف اصلی در این روش، جلوگیری از انتقال نیروهای ناشی از زلزله به سازه و ملحقات آن می‌باشد و این هدف با نصب سازه بر روی لایه‌های جداساز که دارای انعطاف پذیری افقی زیاد می‌باشند، تأمین می‌شود. استفاده از سیستم‌های جداساز روشی برای محافظت از سازه‌ها در برابر خسارات ناشی از زلزله بوده و این عمل از طریق ایجاد کاهش در میزان تقاضای سازه انجام می‌گیرد.

مفهوم پایه‌ای جداسازی لرزه‌ای الزاماً یک روش کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها طی یک فرایند تسلیم بر خطی ایزولاتور (معمولاً دو خطی) می‌باشد [1,2]. تأثیر تسلیم روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها اولین مرتبه توسط [3,4] Veletsos، [3,4] Newmark و [4] Chelepati در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که اثرات کلی تسلیم در سازه طی یک رفتار الاستیک-پلاستیک منجر به کاهش بارهای لرزه‌ای طراحی در سازه‌ها می‌گردد. برای این منظور، طیف طرح با شکل پذیری ثابت به عنوان یک ابزار جهت انتخاب سطح تسلیم سازه، جهت کنترل تغییر مکان لرزه‌ای پیشنهاد گردید [3-5]. چندین مطالعه‌ی ارزشمند توسط [6-8] Makris و [6-8] Black جهت اهمیت پارامترهای سازه‌ای و مشخصات لرزه‌ای با توجه به

رابطه‌ی دو خطی تغییر مکان- نیرو در رفتار الاستیک-پلاستیک صورت گرفته است. پژوهشگران متعددی مانند: [9-11]Wam و [9-11]Park، [9-11]Makris رفتار لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده با توجه به میرایی سیستم سطح تسلیم بهینه‌ی ایزولاتور کارائی جداساز پرداخته‌اند. به هر حال پرداختن به مسائل طراحی عملی در موارد فوق، تقریباً کمیاب می‌باشد. در ژاپن جهت به کارگیری ایزولاتورها در پل‌ها جهت بهبود رفتار لرزه‌ای، کار آزمایشگاهی روی پل‌های جداسازی شده با سیستم جداسازی پاندول اصطکاکی (FPS) انجام گرفته است. [12] Tsopelas و [12] Constantinou با انجام آزمایش یک مدل پل با پایه‌های انعطاف پذیر روی میز لرزان و اعمال شتاب نگاشت‌های واقعی و شبیه سازی شده با ماکزیمم شتاب‌های بین 0.1g تا 1.1g رفتار آزمایشگاهی این سیستم جداسازی شده را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پل‌های جداسازی شده‌ی فوق به خوبی قادر به تحمل تمامی سطوح لرزه‌ای در حوزه‌ی رفتار الاستیک خود می‌باشند.

[13] Dicleli و [13] Buddaram اثر جداسازها، مشخصات سازه‌ی اصلی، مشخصات فرکانسی و شدت زلزله را روی عملکرد پل‌های جداسازی شده لرزه‌ای، و هم چنین بعضی از نکات بحرانی طراحی در راهنمایی طراحی پل‌های جداسازی شده در [2] AASHTO را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با مطالعات پارامتریک توصیه‌ای طراحی را که منجر به طرح اقتصادی و بهتر پل‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ای می‌گردد، ارائه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ پل‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ای، وابسته به نسبت حداکثر شتاب زمین به حداکثر سرعت زمین می‌باشد. به همین دلیل در طراحی پل‌های جداسازی شده، مشخصات محل اجرای پروژه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. هم چنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مشخصات مقاومت جداساز باید با توجه به محتوای فرکانس و شدت زلزله انتخاب گردد. مطالعات آن‌ها نشان

۴- جدا کردن عرشه از زیرسازه با استفاده از تکیه‌گاه‌های الاستومری به دلیل کاهش نیروهای انتقال یافته به زیرسازه در اثر تغییر شکل‌های حرارتی عرشه از قدیم مرسوم بوده است؛ لذا با ایجاد تغییرات اندک در سیستم‌های تکیه گاهی و درزهای انبساط می‌توان با صرف هزینه‌ی بسیار اندک، سیستم جداسازی لرزه ای را در مورد پل‌ها به کار گرفت.

### مشخصات سیستم‌های مورد مطالعه

**پایه شامل یک عدد شمع- ستون بتن مسلح درجاریز.** در صورتی که به علت سستی لایه‌های فوقانی خاک محل، استفاده از پی سطحی غیر ممکن باشد و سنگ بستر در عمق مناسبی از سطح زمین طبیعی (در حدود ۱۵ تا ۳۰ متر) قرار داشته باشد، استفاده از سیستم شمع- ستون بسیار اقتصادی خواهد بود. در چنین حالتی نوک شمع- ستون متکی بر سنگ بوده و ظرفیت باربری قائم بسیار بالایی خواهد داشت.

در صورت استفاده از سیستم شمع- ستون و حذف سرشمع، به مقدار زیادی در مصرف بتن و آرماتور صرفه جویی به عمل می‌آید؛ ضمن این‌که با انتخاب این سیستم در پل‌های رودخانه‌ای، مشکل آب‌شستگی اطراف پی‌ها حل می‌شود.

پایه‌ی انتخاب شده متعلق به پلی است که دارای پنج دهانه‌ی ۴۰ متری می‌باشد. هر یک از پایه‌های میانی این پل از یک عدد شمع- ستون بتن مسلح درجاریز به قطر ۱/۸۰ متر تشکیل شده است. عمق مدفون شمع- ستون‌ها برابر ۱۵ متر بوده و نوک شمع- ستون‌ها در این عمق متکی بر سنگ بستر می‌باشد.

ارتفاع آزاد شمع - ستون از روی سطح زمین طبیعی تا زیر عرشه‌ی پل برابر ۶ متر بوده و اتصال عرشه به شمع- ستون یکپارچه انجام شده است. خاک پیرامون شمع- ستون از نوع ماسه‌ی متراکم بوده و عدد SPT آن در اعماق مختلف بین ۲۰ تا ۳۰ تغییر می‌کند. در شکل (۱)

داد که مشخصات سختی پس از الاستیک ایزولاتور، تأثیر زیادی روی پاسخ پل‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ای دارد. با توجه به مطالب ارائه شده، تحقیقات جدید جهت ارزیابی اثر مشخصات ایزولاتور و پل و تحریکات لرزه‌ای، روی نحوه‌ی کنترل و کاهش خسارت بر پایه و عرشه‌ی پل الزامی می‌باشد. نتایج چنین پژوهشی می‌تواند توسط طراحان پل جهت نیل به یک طرح پل جداسازی شده‌ی لرزه‌ای با کارایی بهتر و اقتصادی‌تری مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به سابقه‌ی لرزه خیزی ایران، لزوم تحقیق و مطالعه بر روی سیستم‌های جداساز و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها به منظور محافظت لرزه‌ای از سازه‌ی پل‌ها تحت اثر شتاب نگاشت‌های ثبت شده در ایران ضروری می‌باشد.

### کاربرد جداسازی لرزه‌ای در پل‌ها

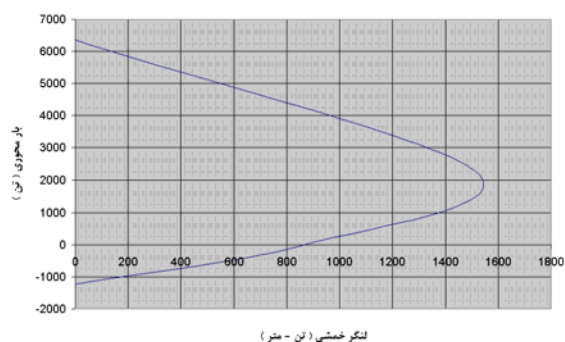
اصولاً پل‌ها بنا به دلایل زیر، بستر مناسبی برای استفاده از سیستم‌های جداساز و تلف‌کننده‌ی انرژی می‌باشند:

۱- نقش مهمی که پل‌ها در عملیات امداد و نجات پس از وقوع زلزله‌های بزرگ ایفا می‌نمایند، باعث شده است که پل‌ها عمدتاً در دسته‌ی سازه‌های با اهمیت طبقه بندی شوند؛ لذا لازم است که این سازه‌ها در مقابل حملات لرزه‌ای از سطح حفاظت بالاتری برخوردار باشند تا کارایی آن‌ها پس از وقوع زلزله‌های بزرگ مختل نشود.

۲- استفاده از سیستم‌های جداساز و تلف‌کننده‌ی انرژی در پل‌ها باعث تمرکز خسارات ناشی از زلزله در محل سیستم‌های تکیه گاهی می‌شود و پایه‌ها و کوله‌ها در مقابل خسارات سازه ای محافظت می‌شوند [1].

۳- عمده‌ی جرم سازه‌ی پل‌ها در تراز عرشه متمرکز شده است و معمولاً عرشه‌ی پل‌ها طوری طراحی می‌شود که تحت حملات لرزه ای الاستیک باقی بماند؛ لذا جدا کردن عرشه از زیرسازه با استفاده از سیستم‌های جداساز به منظور حفاظت از عرشه مفید می‌باشد [2].

دیاگرام اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی برای مقطع شمع- ستون فوق شکل (۲) در شکل (۳) ارائه شده است.

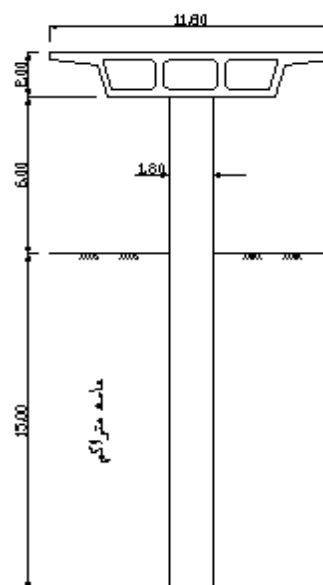


شکل ۳ دیاگرام اندرکنش بار محوری لنگر خمشی شمع - ستون

**پایه‌ی شامل یک قاب دو ستونی بتن مسلح.** استفاده از پایه‌های قابی چند ستونی بتن مسلح در پل‌ها بسیار متداول است. این پایه‌ها معمولاً شامل دو یا چند ستون دایره ای می‌باشند که به وسیله‌ی یک سرستون به یکدیگر متصل شده و تشکیل یک قاب می‌دهند. عملکرد این نوع پایه‌ها تحت بار زلزله‌ی عرضی مانند یک قاب پرتال یک طبقه‌ی چند دهانه و تحت بار زلزله‌ی طولی، مانند یک پایه‌ی تک ستونی می‌باشد.

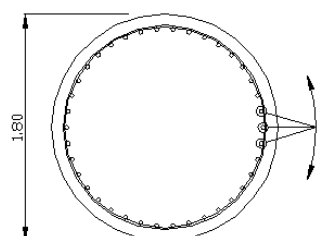
پایه‌ی انتخاب شده متعلق به پلی است که دارای سه دهانه‌ی ۲۰ متری می‌باشد. هر یک از پایه‌های میانی این پل، شامل دو عدد ستون دایره ای به قطر ۱/۲۰ متر و یک سرستون با مقطع مستطیلی و به ابعاد ۱/۵۰×۱/۰۰ متر می‌باشد که ارتفاع آزاد ستون‌ها از روی پی تا زیر سرستون برابر ۵/۵۰ متر بوده و فاصله‌ی محور تا محور ستون‌ها برابر ۷/۰۰ متر می‌باشد. طول سرستون مساوی عرض عرشه‌ی پل و برابر ۱۱/۸۰ متر می‌باشد. پی پایه از نوع سطحی و به ابعاد ۱۰/۲۰×۴/۵۰×۱/۵۰ متر می‌باشد. در شکل (۴) مشخصات پایه مورد نظر نمایش داده شده است. وزن واحد طول عرشه تقریباً برابر ۱۸ تن برآورد شده است؛ لذا بار مرده‌ی اعمالی از سوی عرشه بر روی

مشخصات پایه‌ی مورد نظر، نشان داده شده است.

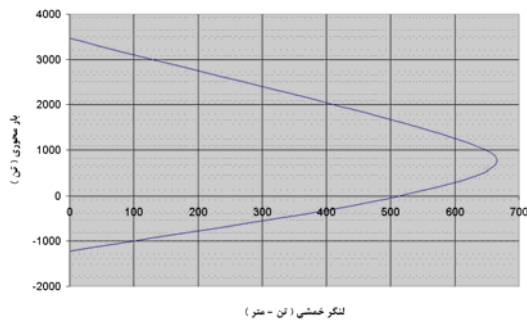


شکل ۱ مشخصات پایه‌ی مورد مطالعه

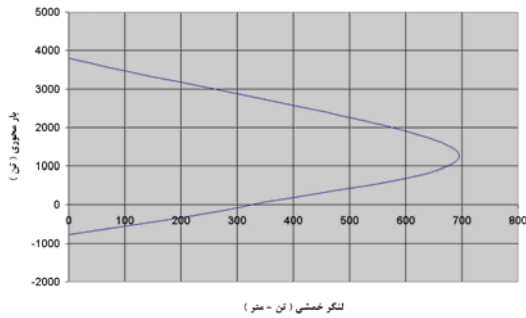
وزن واحد طول عرشه تقریباً برابر ۲۰ تن برآورد شده است؛ لذا بار مرده‌ی اعمالی از سوی عرشه بر روی هر یک از پایه‌های میانی برابر ۸۰۰ تن خواهد بود. با توجه به منظم بودن سازه‌ی پل، امکان کولپینگ عرشه وجود نداشته و با مشخص شدن جرم سهمیه‌ی هر پایه از جرم کل عرشه، تحلیل و طراحی هر پایه به طور مستقل قابل انجام می‌باشد. واضح است که جرم سهمیه‌ی هر یک از پایه‌های میانی از جرم عرشه برابر ۸۰۰ تن می‌باشد. شمع- ستون مورد نظر، طبق ضوابط آئین نامه‌ی AASHTO96 طراحی شده است و طبق شکل (۲) آرماتورگذاری شده است.



شکل ۲ آرماتورگذاری شمع- ستون طراحی شده

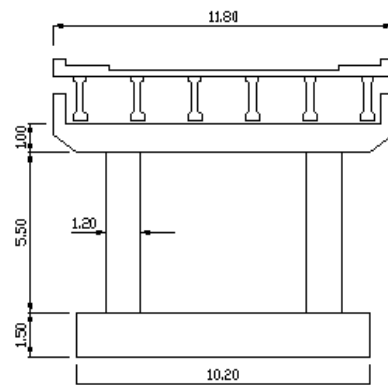


شکل ۶ دیاگرام اندرکنش لنگر خمشی - بار محوری ستون



شکل ۷ دیاگرام اندرکنش لنگر خمشی - بار محوری سرستون

هر یک از پایه‌های میانی برابر ۳۶۰ تن خواهد بود. با توجه به منظم بودن سازه‌ی پیل، امکان کوپلینگ عرشه وجود نداشته و با مشخص شدن جرم سهمیه‌ی هر پایه از جرم کل عرشه، تحلیل و طراحی هر پایه به طور مستقل قابل انجام می‌باشد. واضح است که جرم سهمیه‌ی هر یک از پایه‌های میانی از جرم عرشه برابر ۳۶۰ تن می‌باشد.

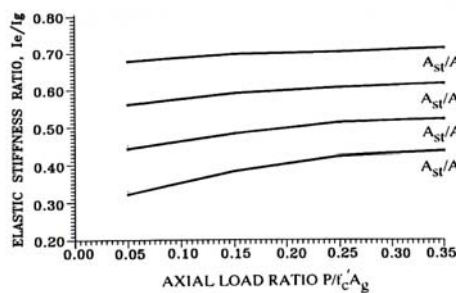


شکل ۴ مشخصات پایه‌ی مورد مطالعه

### مدل‌سازی

**پایه‌ی شامل شمع - ستون بتن مسلح در جاریز. شمع - ستون** با استفاده از المان تیر-ستون بتنی برنامه‌ی DRAIN-2DX مدل شده است [14]. دیاگرام اندرکنش نشان داده شده در شکل (۳) به عنوان دیاگرام اندرکنش تسلیم المان معرفی شده است.

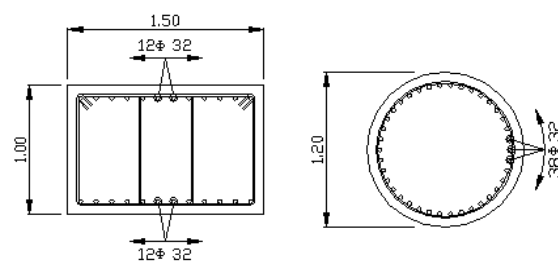
ممان اینرسی مؤثر مقطع شمع - ستون، طبق نمودار شکل (۸) برابر  $I_e = 0.40I_g$  در نظر گرفته شده است. در نمودار فوق،  $A_{st}$  مساحت فولاد و  $A_g$  مساحت کل مقطع ستون می‌باشد.



شکل ۸ ممان اینرسی مؤثر مقاطع دایره‌ای بتن مسلح

ترک خورده [10]

ستون‌ها و سرستون پایه مورد نظر طبق ضوابط آئین نامه‌ی AASHTO96 طراحی شده است و طبق شکل (۵) آرماتورگذاری شده اند.



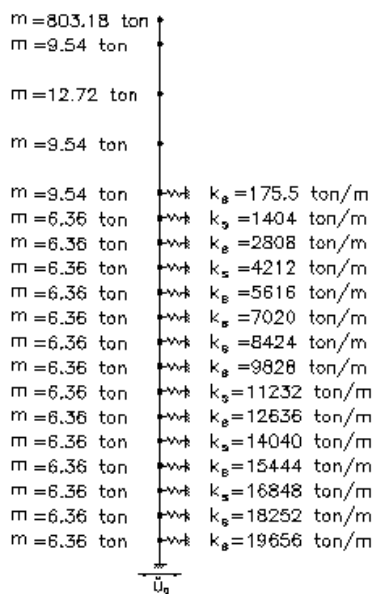
شکل ۵ آرماتورگذاری ستون و سرستون

دیاگرام‌های اندرکنش بار محوری - لنگر خمشی برای مقاطع ارائه شده در شکل (۵) در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

تغییر مکان تسلیم خاک‌های دانه‌ای، معمولاً برابر ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [1] و مقاومت تسلیم هر فنر از ضرب سختی اولیه‌ی آن در تغییر مکان تسلیم به دست می‌آید. لازم به ذکر است که با لحاظ نمودن رفتار غیر خطی خاک اطراف شمع - ستون، میرایی هیسترتیک ایجاد شده در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک خاک در فرآیند تحلیل وارد می‌گردد.

به منظور مدل‌سازی فنرهای دو خطی فوق‌الذکر به وسیله‌ی برنامه‌ی DRAIN-2DX، از المان‌های خرابایی با طول واحد استفاده شده است؛ به طوری که مقدار EA المان‌های خرابایی برابر سختی اولیه‌ی فنرهای دو خطی لحاظ شده است.

مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه‌ی مورد نظر در حالت جدا نشده به صورت شماتیک در شکل (۱) ارائه داده شده است.



شکل ۱۰ مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه در حالت جدا نشده

جرم سهمیه‌ی پایه از جرم کل عرشه به صورت جرم متمرکز در گره‌ی فوقانی انباشته شده است. جرم

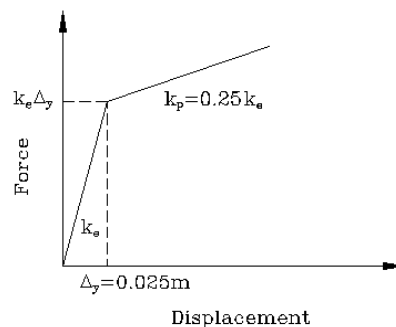
به منظور مدل‌سازی خاک اطراف شمع - ستون از مدل وینکلر استفاده شده است. طبق مدل وینکلر یک محیط الاستیک یا الاستوپلاستیک را می‌توان به وسیله‌ی یک سری فنر الاستیک یا الاستوپلاستیک نزدیک به هم جایگزین نمود. سختی اولیه‌ی هر فنر از ضرب مدول عکس‌العمل افقی خاک در مساحت سهمیه‌ی آن محاسبه می‌شود.

مدول عکس‌العمل افقی خاک‌های دانه‌ای به صورت خطی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد [15]. مقدار مدول عکس‌العمل افقی خاک‌های دانه‌ای در عمق  $z$  از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$k_z = n_h z \quad (1)$$

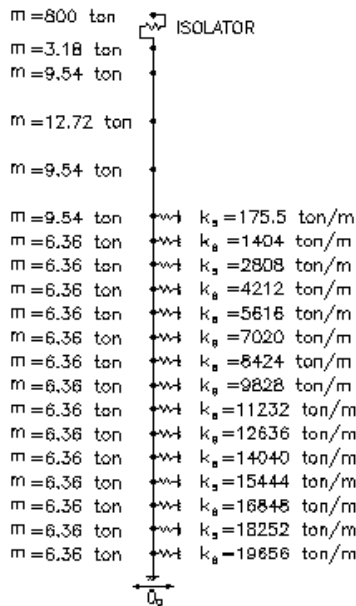
به گونه‌ای که  $n_h$ ، ثابت عکس‌العمل افقی خاک است. مقدار ثابت عکس‌العمل افقی خاک در این‌جا برابر  $n_h = 780 \text{ ton/m}^3$  می‌باشد. به منظور لحاظ نمودن رفتار غیرخطی خاک اطراف شمع - ستون، رابطه‌ی نیرو - تغییر مکان فنرهای به کار رفته به صورت دو خطی در نظر گرفته شده است. سختی اولیه‌ی هر فنر از ضرب مدول عکس‌العمل افقی خاک در مساحت سهمیه‌ی آن به دست می‌آید و سختی ثانویه‌ی هر فنر برابر ۲۵٪ سختی اولیه‌ی آن در نظر گرفته شده است [1].

رابطه‌ی نیرو - تغییر مکان فنرهای دو خطی به کار رفته برای مدل‌سازی خاک اطراف شمع - ستون در شکل (۹) نشان داده شده است:



شکل ۹ رابطه‌ی نیرو - تغییر مکان فنرهای دو خطی به کار رفته برای مدل‌سازی خاک اطراف شمع - ستون

است. مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه‌ی مورد نظر در حالت جدا شده به صورت شماتیک در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه در حالت جدا شده

ظرفیت اتلاف انرژی هیسترتیک ایجاد شده توسط سیستم جداساز، مستقیماً توسط رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان هیستریسیس اعمال شده به مدل تحلیلی در نظر گرفته می‌شود و نیازی به محاسبه‌ی میرایی ویسکوز معادل با رفتار هیسترتیک جداساز نمی‌باشد.

**پایه شامل یک قاب دو ستونی بتن مسلح.** ستون‌ها و سرستون با استفاده از المان تیر - ستون بتنی برنامه DRAIN-2DX مدل شده است. دیاگرام‌های اندرکنش نشان داده در شکل‌های (۶ و ۷) به ترتیب به عنوان دیاگرام‌های اندرکنش تسلیم المان‌های ستون و سرستون معرفی شده است.

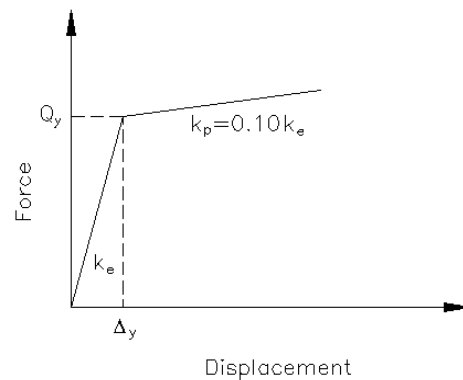
ممان اینرسی مؤثر مقطع ستون طبق نمودار شکل (۸) برابر  $I_e = 0.55I_g$  و ممان اینرسی مقطع سرستون

خود المان‌ها نیز بین گره‌های طرفین آن توزیع شده است، ماتریس میرایی سازه در برنامه‌ی DRAIN-2DX به صورت ترکیب خطی از ماتریس جرم و سختی تعریف می‌شود. ضرایب ماتریس جرم ( $\alpha$ ) و ماتریس سختی ( $\beta$ ) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \begin{bmatrix} \omega_2 & -\omega_1 \\ -\frac{1}{\omega_2} & \frac{1}{\omega_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

به گونه‌ای که  $\omega_1$  و  $\omega_2$  فرکانس‌های زاویه‌ای مد‌های ارتعاشی اول و دوم و  $\xi_1$  و  $\xi_2$  نسبت میرایی ویسکوز مد‌های ارتعاشی اول و دوم می‌باشد. مقادیر  $\xi_1$  و  $\xi_2$  برابر ۰.۵ در نظر گرفته شده است [14].

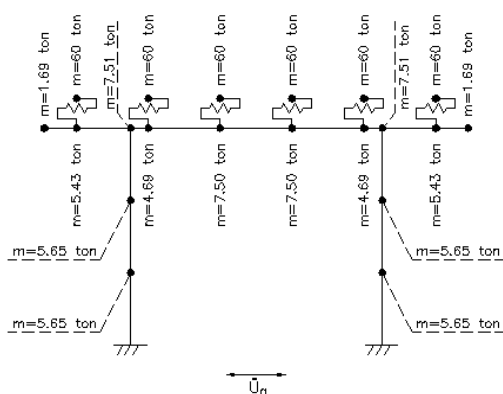
به منظور مدل‌سازی سیستم جداساز از المان اتصال برنامه‌ی DRAIN-2DX استفاده شده است. رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان سیستم جداساز به صورت دو خطی تعریف شده است. سختی ثانویه سیستم جداساز برابر ۱۰٪ سختی اولیه‌ی آن در نظر گرفته شده است [1].



شکل ۱۱ رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان به کار رفته برای مدل‌سازی سیستم جداساز

رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان به کار رفته برای مدل‌سازی سیستم جداساز در شکل (۱۱) نشان داده شده

برابر ۰.۵٪ در نظر گرفته شده است و ضرایب  $\alpha$  و طبق رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شوند. به منظور مدل‌سازی سیستم جداساز از المان اتصال برنامه‌ی DRAIN-2DX استفاده شده است. رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان سیستم جداساز به صورت دو خطی و مطابق شکل (۱۱) تعریف شده است. مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه‌ی مورد نظر در حالت جدا شده در شکل (۱۵) به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱۵ مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه در حالت جدا شده

### مشخصات شتاب‌نگاشت‌های ورودی

در این پژوهش به منظور انجام تحلیل‌های تاریخی‌چهی زمانی غیر خطی بر روی پایه‌های مورد مطالعه از شتاب‌نگاشت‌های زیر استفاده شده است:

۱- زلزله‌ی ۱۹۷۸ طیس، مولفه طولی (N16W) با حداکثر شتاب  $0.933g$  و زمان تداوم ۲۵ ثانیه - نوع

زمین تیپ II

۲- زلزله‌ی ۱۹۷۷ ناغان، مولفه طولی با حداکثر شتاب

$0.723g$  و زمان تداوم ۵ ثانیه- نوع زمین تیپ II

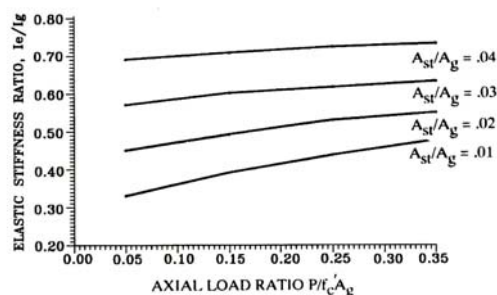
۳- زلزله‌ی ۱۹۹۰ منجیل با حداکثر شتاب  $0.514g$  و زمان

تداوم  $53/5$  ثانیه- نوع زمین تیپ III

در شکل‌های (۱۶ تا ۱۸) نمودار تاریخی‌چهی زمانی

شتاب زلزله‌های فوق‌الذکر بر حسب شتاب ثقل نشان

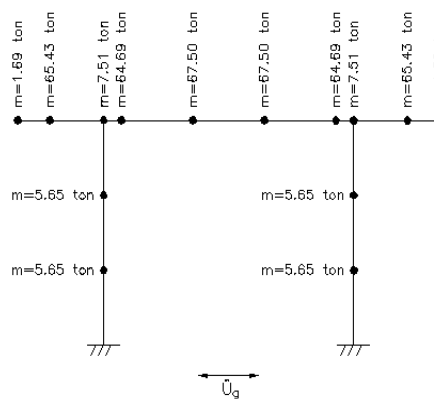
طبق نمودار شکل (۱۳) برابر  $I_e = 0.30I_g$  در نظر گرفته شده است که در آن  $I_g$  ممان اینرسی کل مقطع و  $I_e$  ممان اینرسی مؤثر مقطع می‌باشد.



شکل ۱۳ ممان اینرسی مؤثر مقاطع مستطیلی بتن

مسلح ترک خورده [1]

مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه‌ی مورد نظر در حالت جدا نشده به صورت شماتیک در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۴ مدل سازه‌ای ساخته شده از پایه در حالت جدا نشده

جرم سهمیه‌ی پایه از جرم عرشه به طور مساوی میان گره‌های ایجاد شده در محل استقرار تیرهای طولی بر روی سرستون توزیع شده است. جرم خود المان‌ها نیز بین گره‌های طرفین آن توزیع شده است. نسبت میرایی ویسکوز مودهای ارتعاشی اول و دوم



داده شده است. و ۰/۹ شتاب ثقل باشد. دوره‌ی بازگشت زلزله متناظر با هر یک از حالات حدی مذکور به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۵۰۰ و ۵۰۰۰ سال می‌باشد [1].

### تحلیل

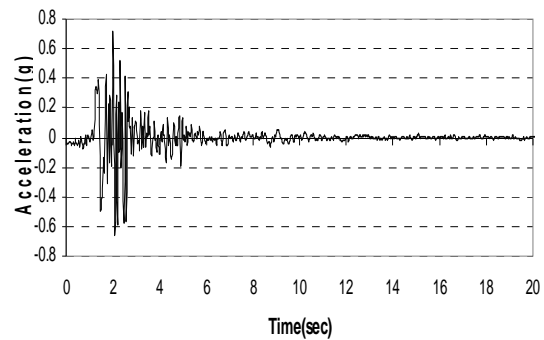
پایه‌ی شامل شمع - ستون بتن مسلح در جاریز. پس از مدل‌سازی پایه‌ی مورد مطالعه، با استفاده از برنامه‌ی DRAIN-2DX مدل ساخته شده در حالت‌های جدا نشده و جدا شده، تحت تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیر خطی قرار گرفته است.

**حالت جدا نشده.** نتایج تحلیل‌های انجام شده در حالت جدا نشده شامل حداکثر تغییر مکان عرشه، تغییر مکان پسماند عرشه، شکل پذیری مورد نیاز پایه و حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در پایه در جدول (۱) ارائه شده است. بار محوری فشاری ناشی از وزن عرشه و وزن خود شمع - ستون در محل تشکیل لولاهای پلاستیک در حدود ۸۶۵ تن می‌باشد. طبق دیاگرام اندرکنش نشان داده شده در شکل (۳) لنگر خمشی تسلیم متناظر با چنین باری برابر با ۱۱۲۰ تن - متر می‌باشد.

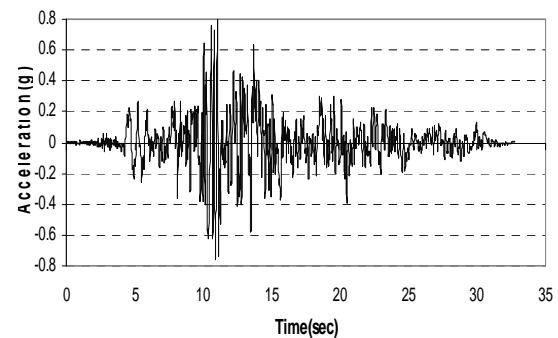
با انجام تحلیل استاتیکی تحت بار جانبی، برابر با ۱۰۰ تن، مشاهده شد که حداکثر لنگر خمشی در عمق ۲ متری از سطح زمین ایجاد می‌شود و مقدار آن برابر ۸۴۶ تن - متر می‌باشد. همچنین تغییر مکان گره‌ی فوقانی در اثر بار جانبی ۱۰۰ تنی برابر ۰/۱۴۶ متر به دست آمد. با توجه به رفتار خطی سازه تا قبل از مرحله‌ی تسلیم می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مکان گره‌ی فوقانی در نقطه‌ی تسلیم، برابر خواهد بود با:

$$\Delta_y = \frac{1120}{846} \times 0.146 = 0.193 \text{ m}$$

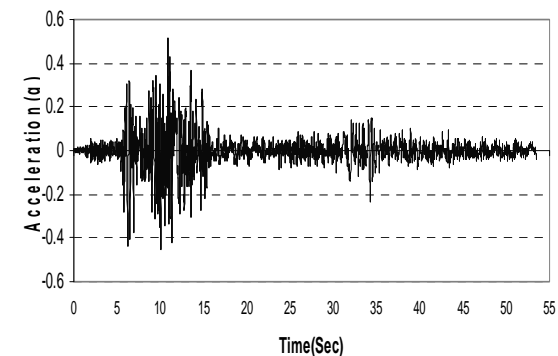
به منظور محاسبه‌ی شکل پذیری مورد نیاز پایه در جدول (۱)، حداکثر تغییر مکان عرشه بر تغییر مکان تسلیم پایه ( $\Delta_y = 0.193 \text{ m}$ ) تقسیم شده است. تغییر مکان پسماند عرشه با طولانی نمودن زمان تحلیل به اندازه‌ی سه برابر زمان تداوم شتاب‌نگاشت، به دست آمده است.



شکل ۱۶ تاریخچه‌ی زمانی شتاب زمین در زلزله‌ی طبس



شکل ۱۷ تاریخچه‌ی زمانی شتاب زمین در زلزله‌ی ناغان



شکل ۱۸ تاریخچه‌ی زمانی شتاب زمین در زلزله‌ی منجیل

میزان خطر لرزه‌خیزی منطقه، زیاد در نظر گرفته شده است و شتاب‌نگاشت‌های انتخابی طوری مقیاس شده‌اند که مقدار PGA آن‌ها در حالات حدی بهره برداری، کنترل خسارت و بقا به ترتیب برابر با ۰/۸، ۰/۴ و ۰/۲ باشد.

طبق تحلیل استاتیکی انجام شده، سختی الاستیک پایه برابر می‌باشد با:

$$k_e = \frac{100}{0.146} = 685 \text{ ton/m}$$

مقدار جرم سهمیه‌ی پایه از جرم کل عرشه برابر با  $W_d = 800 \text{ ton}$  می‌باشد. روند تحلیل، بدین گونه می‌باشد که تحت هر شتاب‌نگاشت معین، سختی سیستم جداساز به ترتیب برابر با ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ سختی الاستیک پایه و در هر یک از حالت‌های فوق‌الذکر مقاومت تسلیم سیستم جداساز ( $Q_y$ ) به ترتیب برابر با ۲/۵٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جرم سهمیه‌ی پایه ( $W_d$ ) در نظر گرفته شده و تحلیل‌های مکرر انجام گرفته است. در هر مورد مقادیر حداکثر تغییر مکان عرشه، شکل‌پذیری مورد نیاز جداساز، ضریب حفاظت پایه و تغییر مکان پسماند عرشه محاسبه شده است. ضریب حفاظت پایه (PPI) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$PPI = \frac{\Delta_{mni} - \Delta_{mi}}{\Delta_{mni}} \quad (3)$$

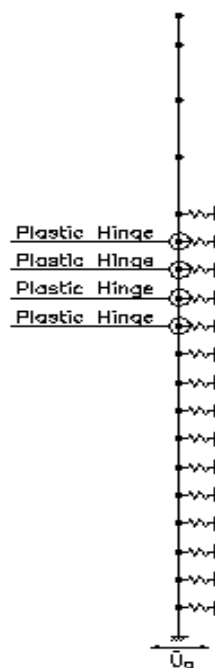
به گونه‌ای که  $\Delta_{mni}$  حداکثر تغییر مکان جانبی رأس پایه در حالت جدا نشده و  $\Delta_{mi}$  حداکثر تغییر مکان جانبی رأس پایه در حالت جدا شده می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار (PPI) همواره بین صفر و یک قرار می‌گیرد. زمانی که پایه در حالت جدا نشده باشد، مقدار ضریب حفاظت پایه برابر صفر می‌باشد و مقدار ۱ برای ضریب حفاظت پایه بدین معناست که پایه کاملاً از حرکات زمین جدا شده است.

در هر مورد، مقادیر حداکثر تغییر مکان عرشه، شکل‌پذیری مورد نیاز جداساز، ضریب حفاظت پایه و تغییر مکان پسماند عرشه محاسبه شده و نتایج در قالب نمودارهای (۲۰) تا (۳۱) ارائه شده است. در تمامی نمودارها  $K_p$  و  $K_i$  به ترتیب سختی ایزولاتور و پایه می‌باشد.

در صورتی که پایه در طول اعمال تحریک دچار تغییر شکل‌های غیرالاستیک شود، پس از اتمام تحریک و آغاز مرحله‌ی ارتعاش آزاد، پایه حول نقطه‌ی تعادل جدیدی ارتعاش خواهد کرد و در نهایت به علت وجود عامل میرایی در وضعیت تغییر شکل یافته‌ی جدیدی به حالت سکون خواهد رسید.

روند تشکیل لولاهای پلاستیک در پایه‌ی مورد نظر تحت شتاب‌نگاشت‌های متناظر با حالت حدی بقا در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

**حالت جدا شده.** به منظور بررسی اثر سختی و مقاومت تسلیم سیستم جداساز بر پاسخ پایه‌ی جدا شده، طی تحلیل‌های مکرر، سختی سیستم جداساز به صورت گام به گام از ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ سختی الاستیک پایه و در هر گام، مقاومت تسلیم سیستم جداساز از ۵٪ تا ۲۰٪ جرم سهمیه‌ی پایه، تغییر داده شده است.

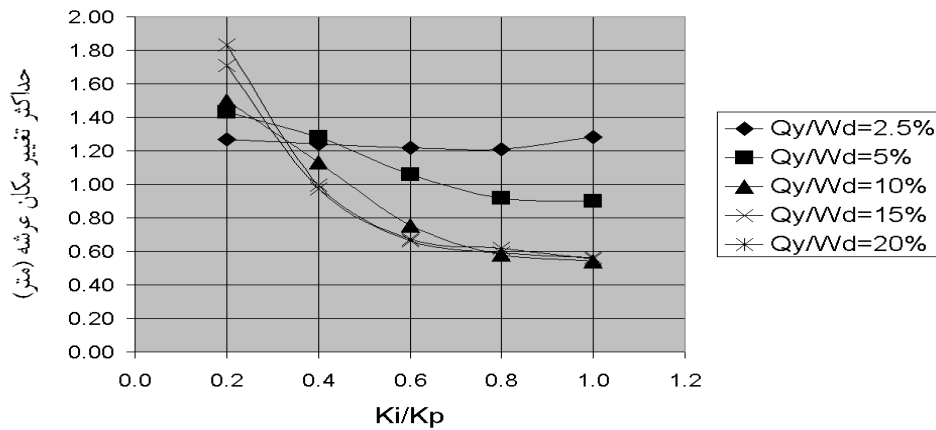


شکل ۱۹ لولاهای پلاستیک ایجاد شده تحت شتاب‌نگاشت‌های

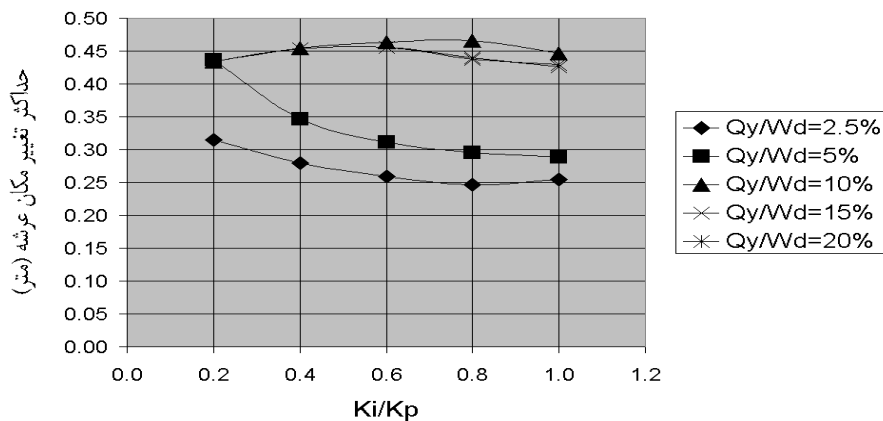
متناظر با حالت حدی بقا

جدول ۱ نتایج تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل شمع- ستون در حالت جدا نشده

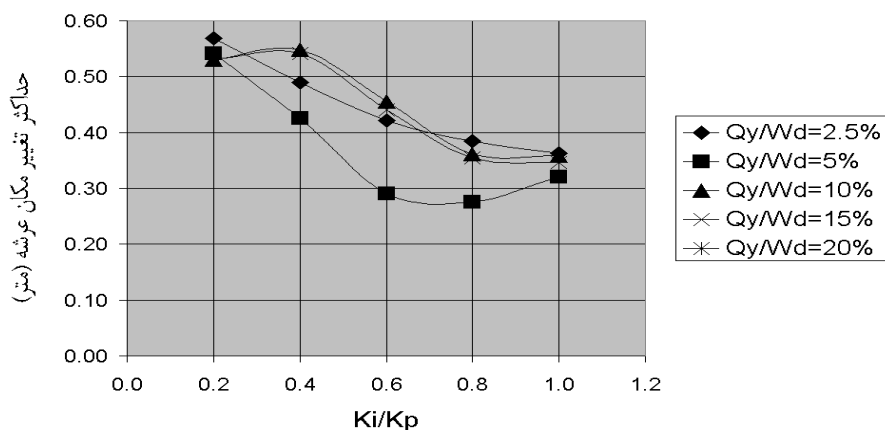
| شتاب‌نگاشت ورودی | حالت حدی    | حداکثر تغییر مکان عرشه (متر) | تغییر مکان پسماند عرشه (متر) | شکل پذیری مورد نیاز پایه | حداکثر لنگر خمشی پایه (تن - متر) |
|------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| طیس              | بهره برداری | ۰/۲۰۷                        | ۰/۰۰۹                        | ۱/۰۷                     | ۱۱۲۰                             |
|                  | کنترل خسارت | ۰/۴۰۰                        | ۰/۱۱۴                        | ۲/۰۷                     | ۱۱۲۰                             |
|                  | بقا         | ۰/۴۴۹                        | ۰/۱۳۶                        | ۲/۳۳                     | ۱۱۲۰                             |
| ناغان            | بهره برداری | ۰/۱۵۵                        | ۰                            | ۱/۰۰                     | ۸۹۹                              |
|                  | کنترل خسارت | ۰/۳۲۹                        | ۰/۰۸۴                        | ۱/۷۰                     | ۱۱۲۰                             |
|                  | بقا         | ۰/۳۸۰                        | ۰/۱۱۹                        | ۱/۹۷                     | ۱۱۲۰                             |
| منجیل            | بهره برداری | ۰/۱۸۵                        | ۰                            | ۱/۰۰                     | ۱۰۷۴                             |
|                  | کنترل خسارت | ۰/۳۵۸                        | ۰/۰۶۱                        | ۱/۸۵                     | ۱۱۲۰                             |
|                  | بقا         | ۰/۳۶۷                        | ۰/۰۷۳                        | ۱/۹۰                     | ۱۱۲۰                             |



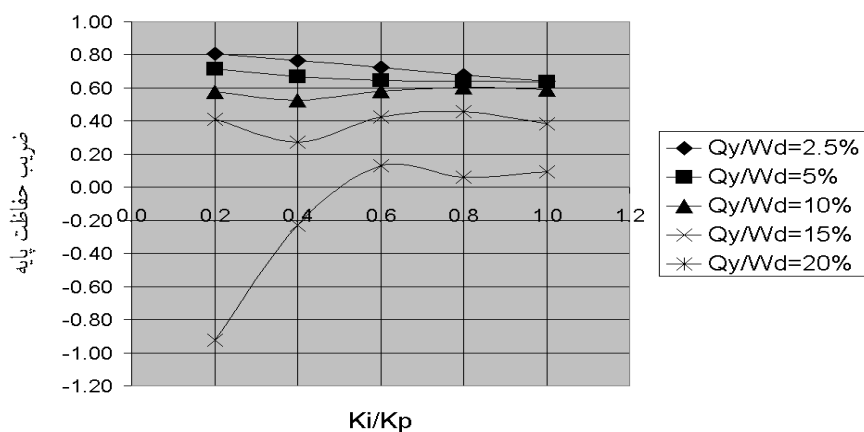
شکل ۲۰ حداکثر تغییر مکان عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طیس،  $PGA = 0.8g$



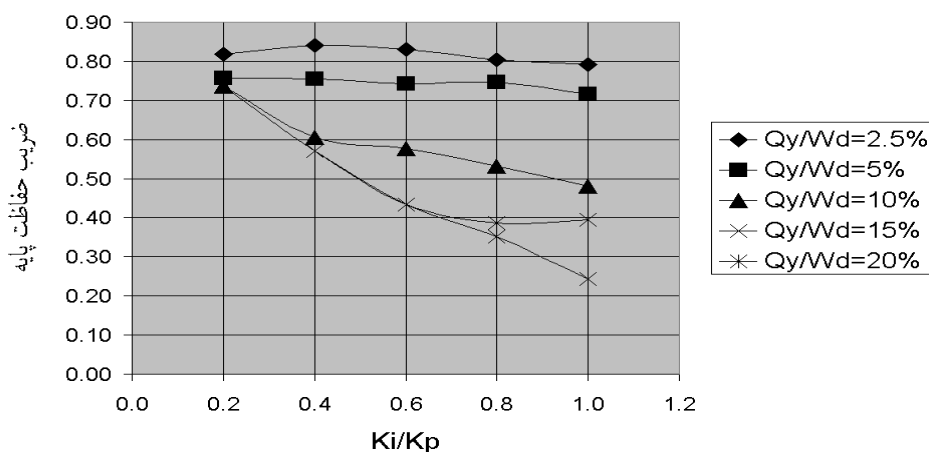
شکل ۲۱ حداکثر تغییر مکان عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان،  $PGA = 0.8g$



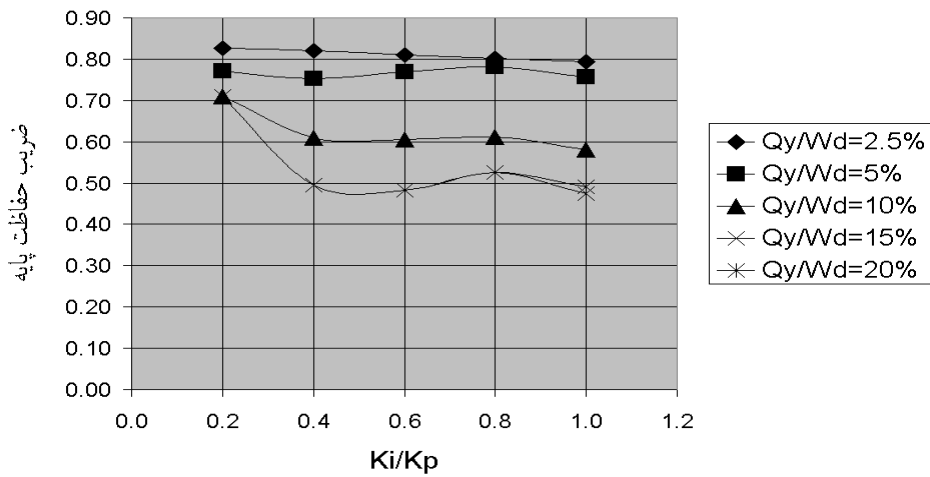
شکل ۲۲ حداکثر تغییر مکان عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل،  $PGA = 0.8g$



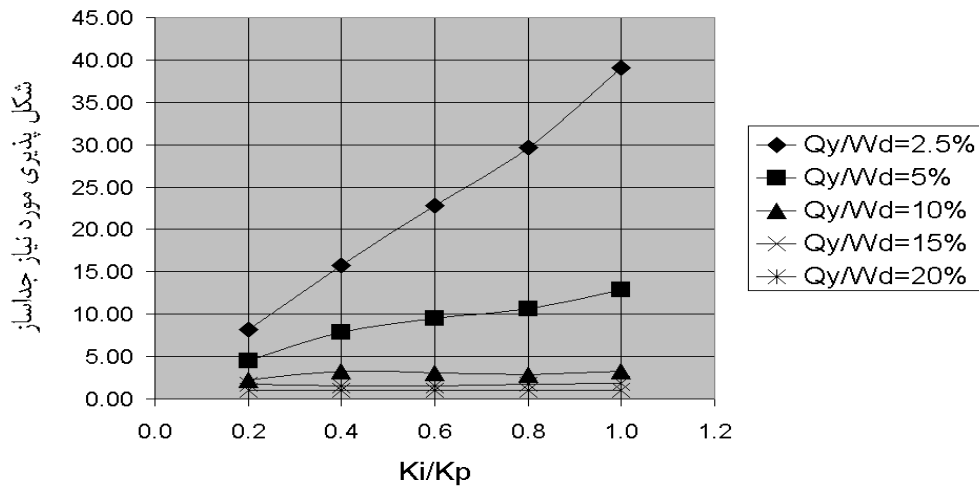
شکل ۲۳ ضریب حفاظت پایه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طبس،  $PGA = 0.8g$



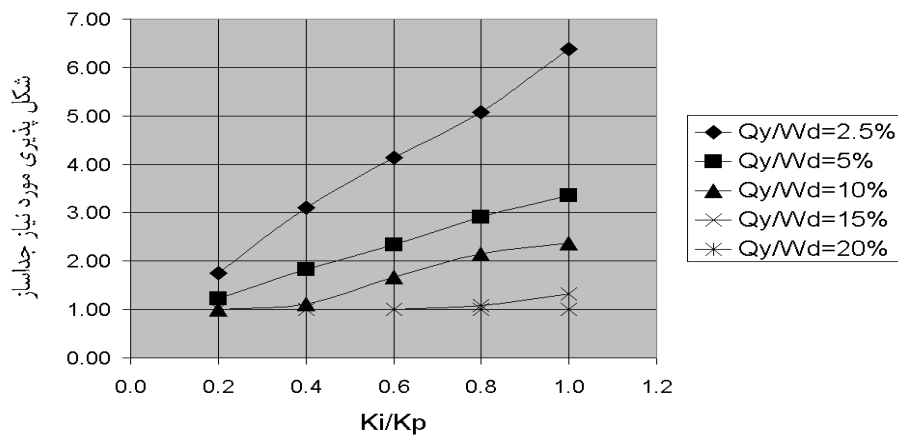
شکل ۲۴ ضریب حفاظت پایه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان،  $PGA = 0.8g$



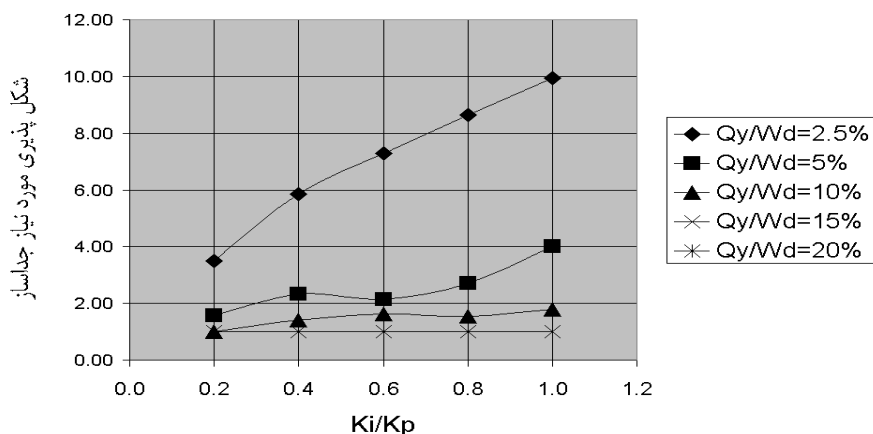
شکل ۲۵ ضریب حفاظت پایه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل،  $PGA = 0.8g$



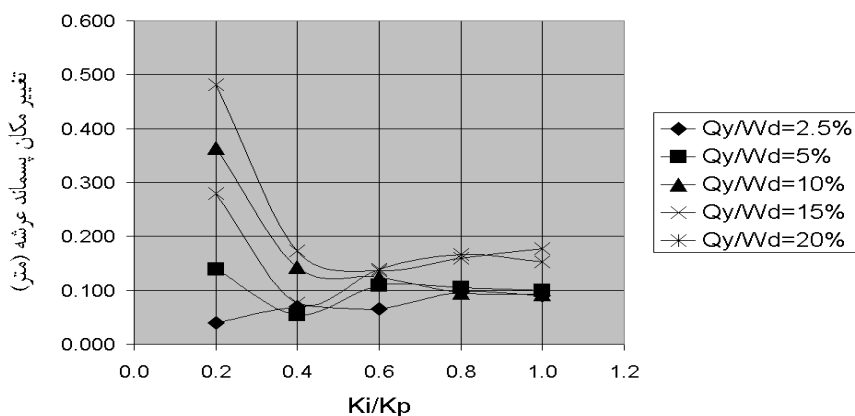
شکل ۲۶ شکل پذیری مورد نیاز جداساز بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طبرس،  $PGA = 0.8g$



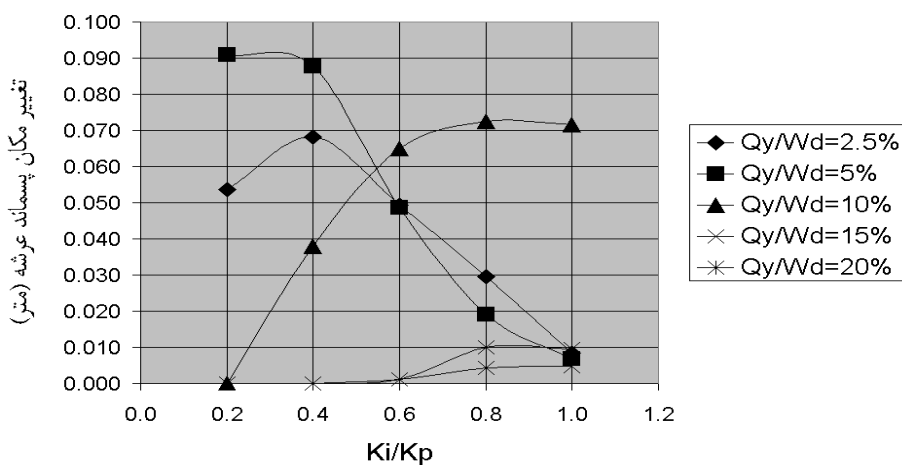
شکل ۲۷ شکل پذیری مورد نیاز جداساز بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان،  $PGA = 0.8g$



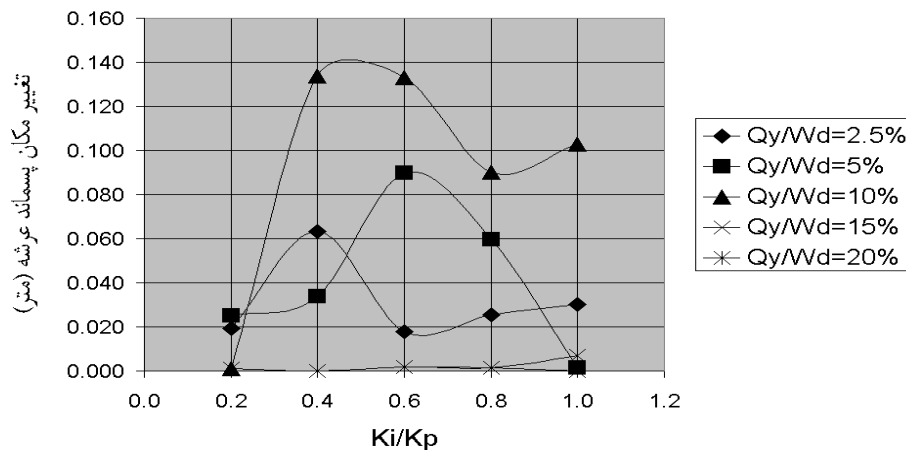
شکل ۲۸ شکل پذیری مورد نیاز جداساز بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل،  $PGA = 0.8g$



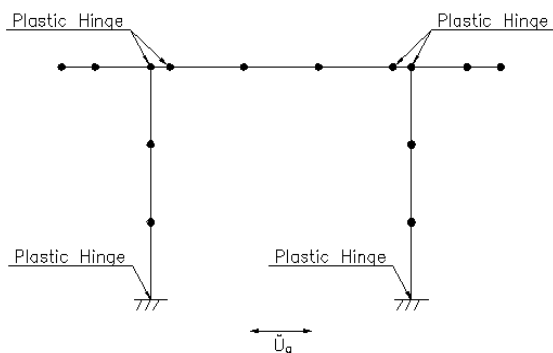
شکل ۲۹ تغییر مکان پسماند عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طبرس،  $PGA = 0.8g$



شکل ۳۰ تغییر مکان پسماند عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان،  $PGA = 0.8g$



شکل ۳۱ تغییر مکان پسماند عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل،  $PGA = 0.8g$



شکل ۳۲ لولاهای پلاستیک ایجاد شده تحت شتاب‌نگاشت‌های متناظر با حالت حدی بقا

**حالت جدا شده.** به منظور بررسی اثر سختی و مقاومت تسلیم سیستم جداساز بر پاسخ پایه جدا شده، در این حالت طی تحلیل‌های مکرر سختی سیستم جداساز به صورت گام به گام از ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ سختی الاستیک پایه و در هر گام، مقاومت تسلیم سیستم جداساز از ۵٪ تا ۲۰٪ جرم سهمیه‌ی پایه تغییر داده شده است.

### پایه شامل یک قاب دو ستونی بتن مسلح

پس از مدل‌سازی پایه‌ی مورد مطالعه، با استفاده از برنامه‌ی DRAIN-2DX مدل ساخته شده در حالت‌های جدا نشده و جدا شده تحت تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیر خطی قرار گرفته است.

**حالت جدا نشده.** نتایج تحلیل‌های انجام شده در حالت جدا نشده شامل حداکثر تغییر مکان عرشه، تغییر مکان پسماند عرشه، شکل پذیری مورد نیاز پایه و حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در پایه در جدول (۲) ارائه شده است.

با انجام تحلیل‌های استاتیکی مکرر، مقدار تغییر مکان جانبی قاب در نقطه‌ی تسلیم برابر  $\Delta_y = 0.0295$  m برآورد شده است. به منظور محاسبه‌ی شکل پذیری مورد نیاز پایه در جدول (۲) حداکثر تغییر مکان عرشه بر تغییر مکان تسلیم پایه تقسیم شده است.

روند تشکیل لولاهای پلاستیک در پایه‌ی مورد نظر تحت شتاب‌نگاشت‌های متناظر با حالت حدی بقا در شکل (۳۲) نشان داده شده است.

حالت‌های فوق‌الذکر مقاومت تسلیم سیستم جداساز ( $Q_y$ ) به ترتیب برابر با ۲/۵٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جرم سهمیه‌ی پایه ( $W_d$ ) در نظر گرفته شده و تحلیل‌های مکرر انجام گرفته است.

در هر مورد، مقادیر حداکثر تغییر مکان عرشه، شکل‌پذیری مورد نیاز جداساز، ضریب حفاظت پایه و تغییر مکان پسماند عرشه در قالب نمودارهای (۳۳) تا (۴۵) ارائه شده است.

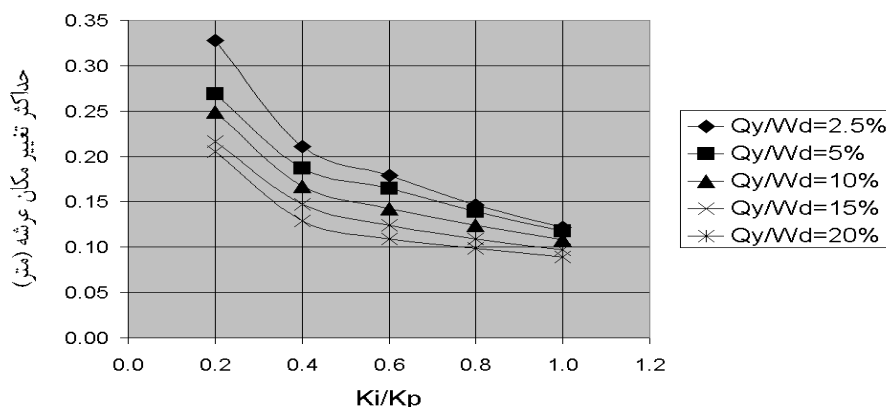
طبق تحلیل استاتیکی انجام شده، سختی الاستیک پایه برابر می‌باشد با:

$$k_e = \frac{20}{0.0022} = 9091 \text{ ton/m}$$

مقدار جرم سهمیه‌ی پایه از جرم کل عرشه برابر با  $W_d = 360 \text{ ton}$  می‌باشد. در این حالت، روند تحلیل بدین گونه می‌باشد که تحت هر شتاب‌نگاشت معین، سختی سیستم جداساز به ترتیب برابر با ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ سختی الاستیک پایه و در هر یک از

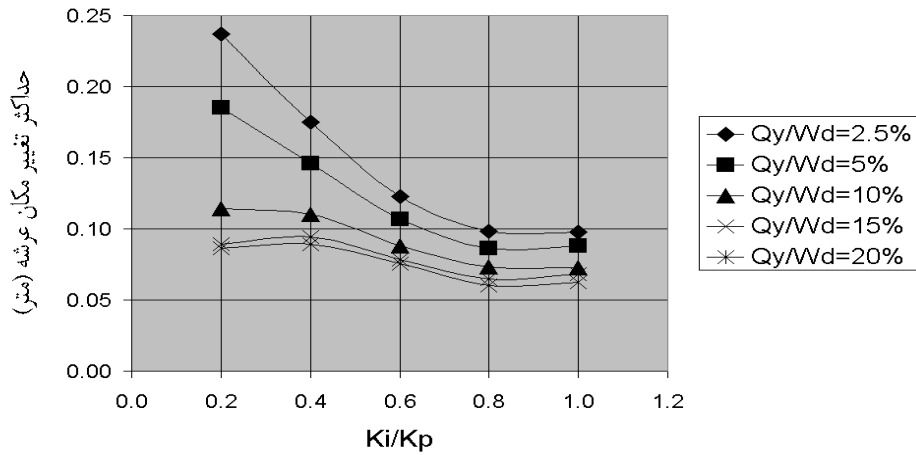
جدول ۲ نتایج تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل قاب دو ستونی در حالت جدا نشده

| شتاب‌نگاشت ورودی | حالت حدی    | حداکثر تغییر مکان عرشه (متر) | تغییر مکان پسماند عرشه (متر) | شکل‌پذیری مورد نیاز پایه | حداکثر برش پایه قاب (تن) |
|------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| طیس              | بهره برداری | ۰/۰۳۴۶                       | ۰/۰۰۰۸۷                      | ۱/۱۷                     | ۲۸۹/۵                    |
|                  | کنترل خسارت | ۰/۰۵۱۷                       | ۰/۰۰۱۳۴                      | ۱/۷۵                     | ۳۰۵/۰                    |
|                  | بقا         | ۰/۰۵۶۳                       | ۰/۰۰۰۳۷                      | ۱/۹۱                     | ۳۰۸/۲                    |
| ناغان            | بهره برداری | ۰/۰۲۹۹                       | ۰/۰۰۰۰۲                      | ۱/۰۱                     | ۲۶۴/۲                    |
|                  | کنترل خسارت | ۰/۰۶۶۸                       | ۰/۰۳۲۲۰                      | ۲/۲۶                     | ۳۱۰/۷                    |
|                  | بقا         | ۰/۰۷۸۷                       | ۰/۰۴۳۲۰                      | ۲/۶۷                     | ۳۰۰/۰                    |
| منجیل            | بهره برداری | ۰/۰۲۸۲                       | ۰                            | ۱/۰۰                     | ۲۴۴/۸                    |
|                  | کنترل خسارت | ۰/۰۵۵۵                       | ۰/۰۱۱۹۰                      | ۱/۸۸                     | ۳۱۲/۶                    |
|                  | بقا         | ۰/۰۶۲۳                       | ۰/۰۰۹۵۹                      | ۲/۱۱                     | ۳۱۳/۳                    |

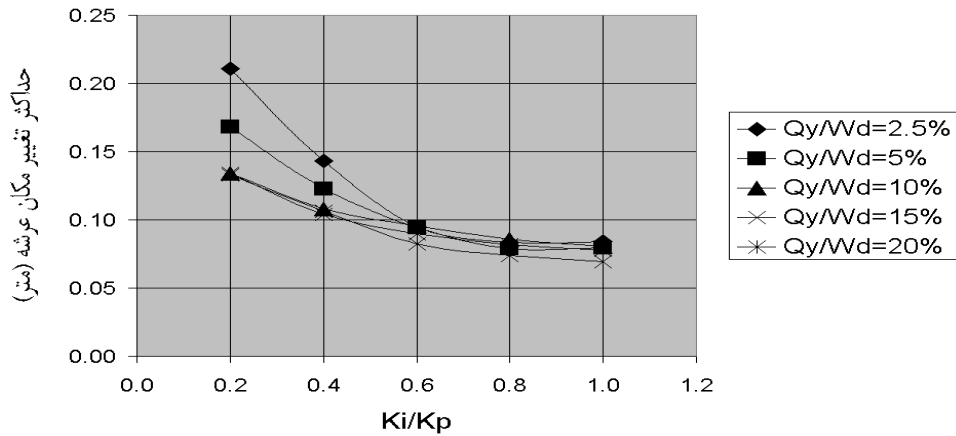


شکل ۳۳ حداکثر تغییر مکان عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طیس،  $PGA = 0.8g$

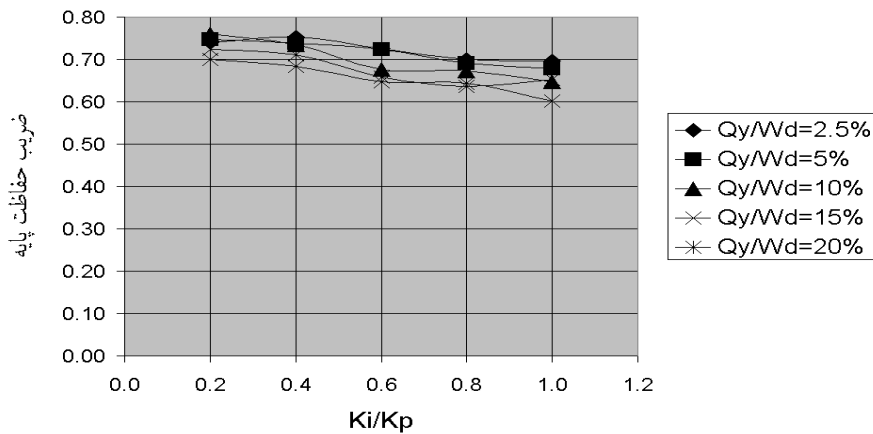




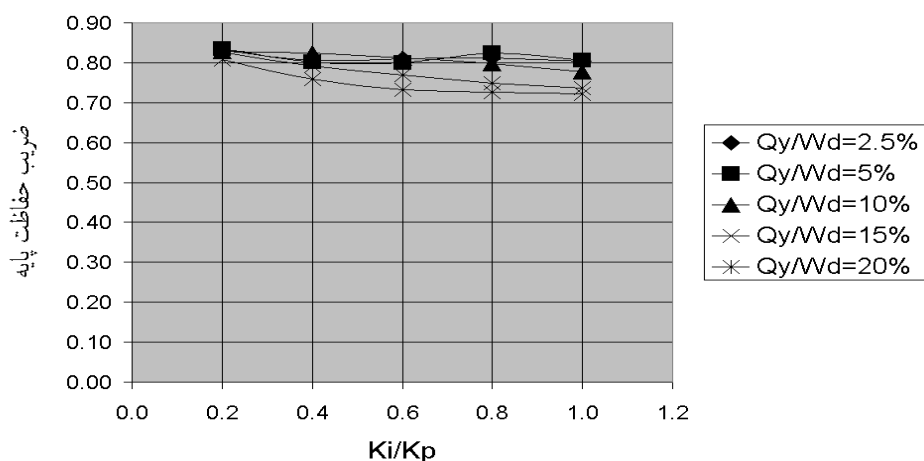
شکل ۳۴ حداکثر تغییر مکان عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان،  $PGA = 0.8g$



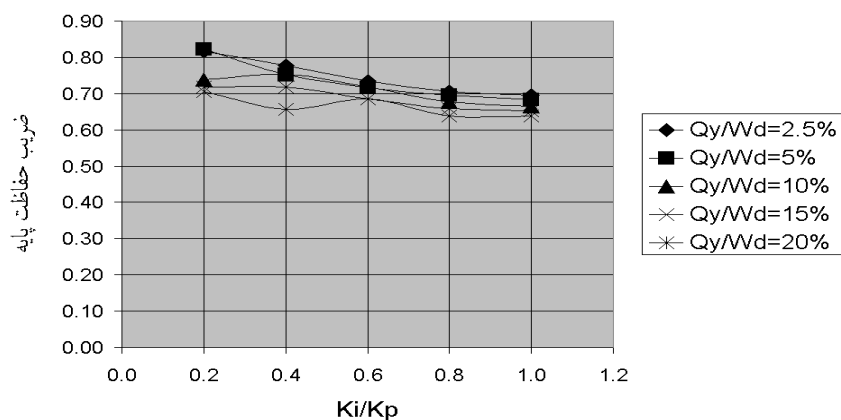
شکل ۳۵ حداکثر تغییر مکان عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل،  $PGA = 0.8g$



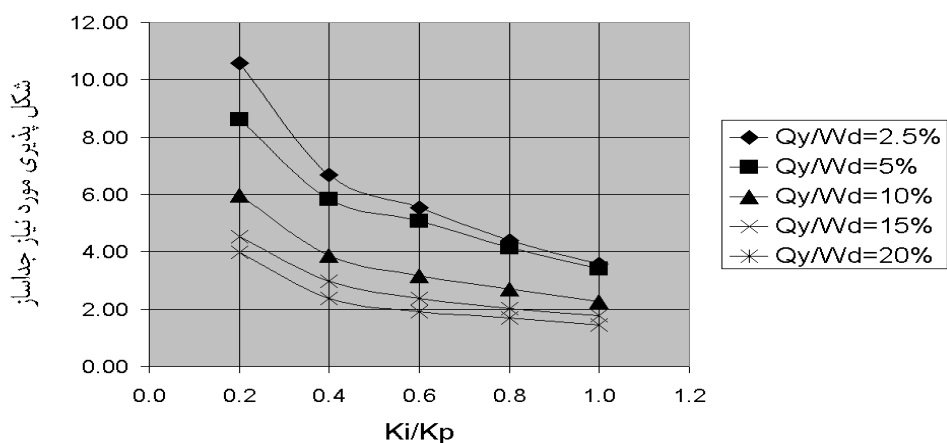
شکل ۳۶ ضریب حفاظت پایه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طبس،  $PGA = 0.8g$



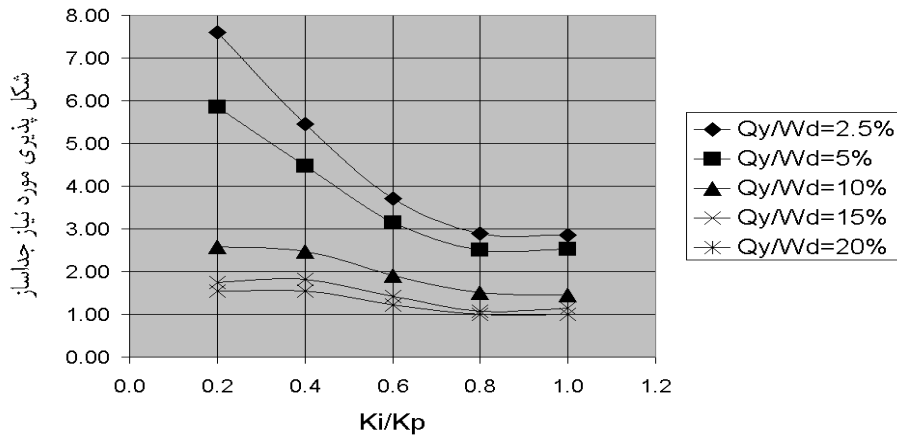
شکل ۳۷ ضریب حفاظت پایه بر حسب Ki/Kp و Qy/Wd تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان، PGA = ۰/۸g



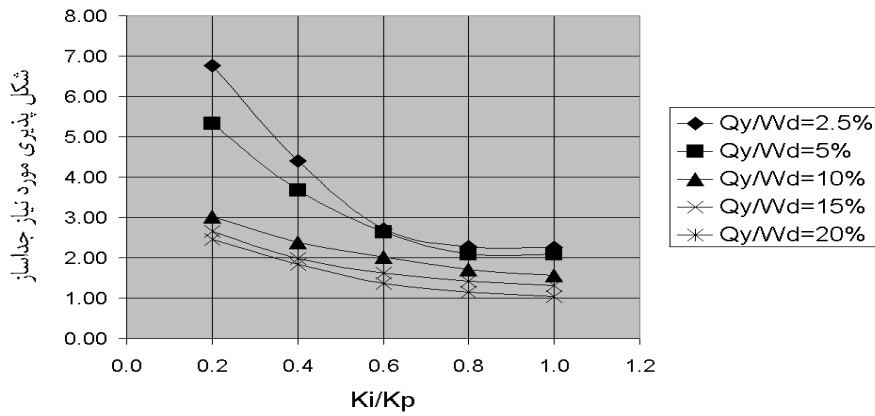
شکل ۳۸ ضریب حفاظت پایه بر حسب Ki/Kp و Qy/Wd تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل، PGA = ۰/۸g



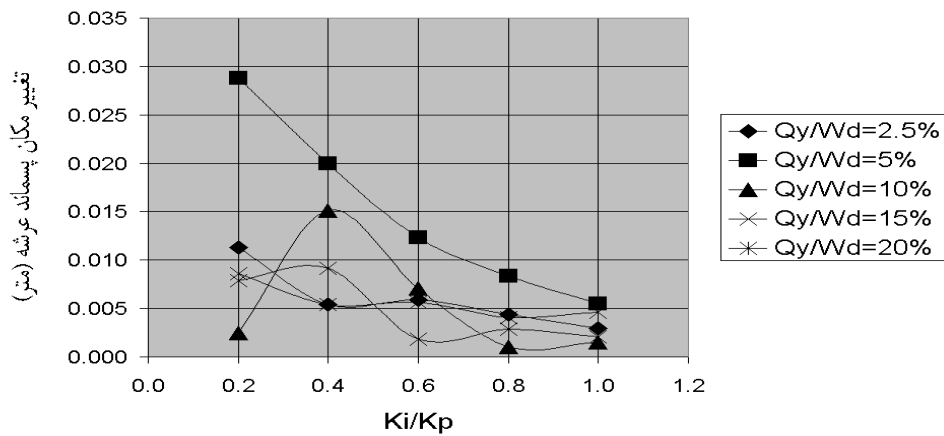
شکل ۳۹ شکل پذیری مورد نیاز جداساز بر حسب Ki/Kp و Qy/Wd تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طبس، PGA = ۰/۸g



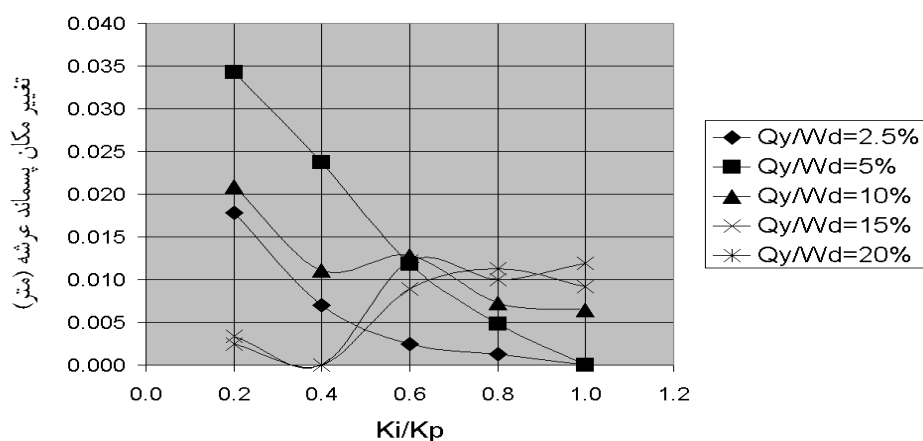
شکل ۴۰ شکل پذیری مورد نیاز جداساز بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان،  $PGA = 0.8g$



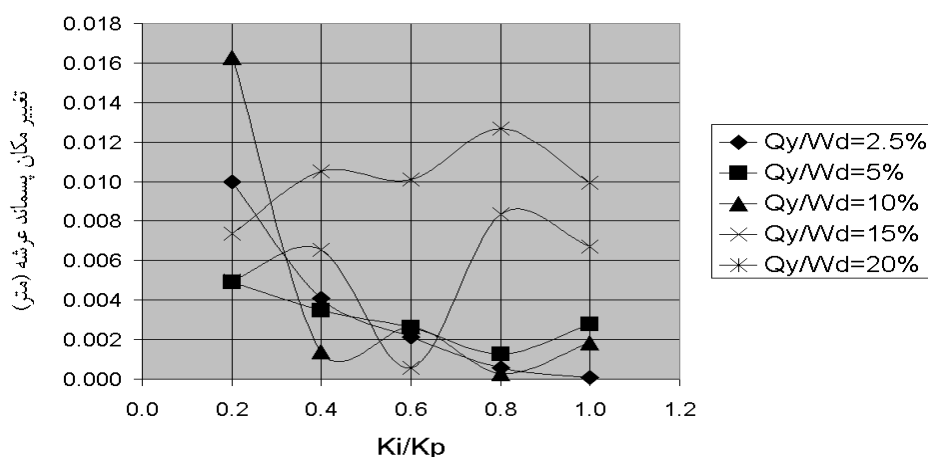
شکل ۴۱ شکل پذیری مورد نیاز جداساز بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل،  $PGA = 0.8g$



شکل ۴۲ تغییر مکان پسماند عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طیس،  $PGA = 0.8g$



شکل ۴۳ تغییر مکان پسماند عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ناغان،  $PGA = 0.8g$



شکل ۴۴ تغییر مکان پسماند عرشه بر حسب  $K_i/K_p$  و  $Q_y/W_d$  تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل،  $PGA = 0.8g$

زلزله افزایش می‌یابد. مطالعات Buddaram و Dicleli نیز نشان می‌دهد که با افزایش سختی فوق الاستیک، تغییر مکان ماکزیمم ایزولاتور کاهش می‌یابد [13]. گاهی اوقات ممکن است که افزایش ایجاد شده در تغییر مکان‌های سازه در اثر افزایش نیروی جذب شده، از کاهش ایجاد شده در تغییر مکان‌های آن در اثر افزایش سختی بیشتر باشد. در چنین مواردی است که افزایش سختی منجر به افزایش تغییر مکان‌های سازه می‌گردد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که رابطه‌ی بین حداکثر تغییر مکان عرشه و نسبت  $K_i/K_p$  خطی نمی‌باشد. عموماً شیب نمودارهای حداکثر تغییر مکان

### تحلیل نتایج

در اکثر موارد، افزایش سختی اولیه‌ی جداساز منجر به کاهش تغییر مکان‌های عرشه می‌گردد. به طور کلی افزایش سختی اولیه‌ی جداساز، منجر به افزایش سختی کلی سیستم پایه - جداساز می‌گردد و همان‌طور که می‌دانیم در اکثر موارد با افزایش سختی سازه، تغییر مکان‌های آن تحت تحریکات لرزه‌ای کاهش پیدا می‌نماید. لازم به ذکر است که افزایش سختی سازه به معنای کاهش پیروید ارتعاشی آن و انتقال به ناحیه‌ی پرنرژی طیف می‌باشد؛ لذا همواره با افزایش سختی، میزان نیروی جذب شده توسط سازه در هنگام وقوع

داشت و نتیجه‌ی وجود میرایی بیشتر، کاهش تغییر مکان‌های سازه است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش ایجاد شده در تغییر مکان‌ها در اثر کاهش مقاومت تسلیم بیشتر از کاهش ایجاد شده در اثر افزایش میرایی هیسترتیک می‌باشد [17].

تحقیقات صورت گرفته توسط Takahashi و همکاران همچنان نشان می‌دهد که با کاهش مقاومت سیستم جداساز، تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابد [17].

در اکثر موارد، ضریب حفاظت پایه‌ی مستقل از نسبت  $K_i/K_p$  می‌باشد. به عبارت دیگر حداکثر تغییر مکان ایجاد شده در بالای پایه به سختی جداساز ارتباطی ندارد. همواره کاهش مقاومت تسلیم جداساز منجر به افزایش ضریب حفاظت پایه می‌شود و افزایش ضریب حفاظت پایه به معنای کاهش نیروهای داخلی ایجاد شده در پایه می‌باشد.

همواره با کاهش مقاومت تسلیم جداساز، شکل پذیری مورد نیاز آن افزایش می‌یابد. در سطوح بالای مقاومت تسلیم، تأثیر سختی جداساز بر میزان شکل پذیری مورد نیاز آن ناچیز می‌باشد؛ در صورتی که در سطوح پایین مقاومت تسلیم، تأثیر سختی جداساز بر میزان شکل پذیری مورد نیاز آن چشمگیر است.

در مدل سازه‌ی اول (شمع - ستون) که نماینده‌ی سازه‌های با پریود ارتعاشی بلند می‌باشد، افزایش سختی جداساز، منجر به افزایش شکل پذیری آن می‌گردد؛ در صورتی که در مدل سازه‌ی دوم (قاب دوستونی) که نماینده‌ی سازه‌های دارای پریود ارتعاشی کوتاه می‌باشد، افزایش سختی جداساز، منجر به کاهش شکل پذیری مورد نیاز آن می‌گردد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نحوه‌ی تغییرات تغییر مکان پسماند عرشه، تابع هیچ نظم و قانونی نیست و مقدار این پارامتر مهم به شدت با تغییر مشخصات شتاب‌نگاشت ورودی و مشخصات سیستم

عرشه در مقابل نسبت  $K_i/K_p$ ، در محدوده‌ی نسبت‌های  $K_i/K_p$  کوچک زیاد و در محدوده‌ی نسبت‌های  $K_i/K_p$  بزرگ کم می‌باشد. با کاهش سختی جداساز، پریود سیستم پایه-جداساز افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های فوق کاملاً غیرخطی می‌باشد و تغییرات تغییر مکان به صورت نسبتاً نمایی افزایش می‌یابد. در رابطه‌ی ارائه شده از سوی آئین نامه‌ی آشتو جهت برآورد حداکثر تغییر مکان جداساز، رابطه‌ی بین حداکثر تغییر مکان جداساز و پریود ارتعاشی سیستم پایه - جداساز به صورت خطی فرض شده است [2] که به نظر می‌رسد فرض نادرستی است. با توجه به این‌که اساس طراحی پایه‌ی جدا شده رابطه‌ی مذکور می‌باشد، برآورد دقیق حداکثر تغییر مکان جداساز از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

لازم به ذکر است که در تحقیقات انجام شده از سوی Warn و Whittaker، وجود رابطه‌ی خطی بین حداکثر تغییر مکان جداساز و پریود ارتعاشی سیستم پایه-جداساز مورد تردید قرار گرفته است و یک رابطه‌ی نمایی جهت جایگزینی در آئین نامه پیشنهاد شده است [16]. همچنین مطالعات انجام شده توسط Dicleli و همکاران نیز یک رابطه‌ی نمایی را برای حداکثر تغییر مکان ایزولاتور توصیه می‌نماید [13].

اگر چه در این مقاله منحنی‌های مستقلی برای مقاومت تسلیم جداساز در برابر تغییر مکان‌ها رسم نشده است، ولی با مراجعه به اشکال (۳۳) تا (۳۵) مشاهده می‌شود که عموماً با کاهش مقاومت تسلیم جداساز، تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابد؛ زیرا با کاهش مقاومت تسلیم، سیستم جداساز در سطح پایین تری از نیرو تسلیم شده و دچار تغییر مکان‌های بزرگ می‌گردد. از سوی دیگر هر چه سیستم جداساز زودتر تسلیم شود، تعداد سیکل‌های غیر الاستیک بیشتری را تجربه می‌کند و مقدار انرژی بیشتری در اثر پاسخ غیر الاستیک جداساز تلف می‌شود. در چنین حالتی، میرایی هیسترتیک وجود خواهد

تغییر سختی جداساز به مشخصات ارتعاشی پایه بستگی دارد.

۶- میزان حساسیت پاسخ پایه جدا شده به مشخصات زلزله‌ی ورودی، مانند شدت، مدت و محتوای فرکانسی در بعضی موارد بسیار زیاد می‌باشد؛ لذا در طرح پل‌های جدا شده انجام مطالعات لرزه خیزی، ساختگاه شامل بررسی تأثیر منابع لرزه زای اطراف، تعیین اثرات موضعی خاک ساختگاه و محتوای فرکانسی زلزله طرح بسیار مهم است.

### پیشنهادات

لازم به ذکر است که در تحقیقات آینده می‌توان موارد ذیل را مورد بررسی قرار داد:

- ۱- با توجه به تأثیر میزان سخت شوندگی مجدد جداساز در پاسخ پل‌های جدا شده، لازم است که اثر این پارامتر مورد بررسی قرار بگیرد.
- ۲- مطالعه‌ی تأثیر مولفه قائم شتاب زلزله بر پاسخ پل‌های جدا شده ضروری به نظر می‌رسد.
- ۳- در پل‌های طویل، تأثیر اعمال حرکات ورودی غیر یکسان به پایه‌های پل قابل بررسی خواهد بود.
- ۴- لازم است که تأثیر ارتعاش موضعی پایه‌های بلند در پاسخ پایه‌های بلند جدا شده مورد بررسی قرار بگیرد.
- ۵- در مورد پایه‌های متکی بر شمع، تأثیر درز ایجاد شده میان جداره‌ی شمع و خاک اطراف آن در هنگام ارتعاش پایه قابل مطالعه می‌باشد.
- ۶- در تحلیل پل‌های جدا شده لازم است که تأثیر برخورد عرشه‌های مجاور هم به یکدیگر و عرشه‌های انتهایی به دیوار پشتی کوله با استفاده از المان‌های غیر خطی درز بررسی شود.
- ۷- لازم است که عملکرد انواع اتصالات فدا شونده و تأثیر آن‌ها بر پاسخ پل‌های جدا شده مورد بررسی قرار بگیرد.
- ۸- با توجه به خطی نبودن رابطه‌ی میان حداکثر تغییر

جداساز تغییر می‌نماید. همان‌طوری‌که پژوهش انجام گرفته توسط Dicleli نشان می‌دهد، حداکثر تغییر مکان ایزولاتورها وابسته به نسبت حداکثر شتاب پایه به حداکثر سرعت زلزله می‌باشد. به صورتی که با افزایش نسبت فوق تغییر مکان کاهش می‌یابد [13].

### نتیجه گیری

با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق، نتایج ذیل قابل ارائه می‌باشد:

- ۱- در اکثر موارد، افزایش سختی جداساز منجر به کاهش تغییر مکان‌های عرشه می‌گردد؛ لیکن تغییر مکان رأس پایه با تغییر سختی جداساز تغییر چندانی نمی‌کند، به عبارت دیگر مقدار ضریب حفاظت پایه از مقدار سختی جداساز مستقل است.
- ۲- افزایش سطح تسلیم جداساز در غالب موارد باعث کاهش تغییر مکان‌های عرشه می‌گردد. میزان تأثیر افزایش سطح تسلیم جداساز در کاهش تغییر مکان‌های عرشه، زمانی قابل توجه است که سختی جداساز در حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد سختی پایه انتخاب شود. با افزایش سختی جداساز از میزان این تأثیر به شدت کاسته می‌شود.
- ۳- همواره با کاهش مقاومت تسلیم جداساز، تغییر مکان‌های رأس پایه کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر کاهش مقاومت تسلیم جداساز باعث افزایش ضریب حفاظت پایه می‌گردد.
- ۴- با افزایش مقاومت تسلیم جداساز، ضریب حفاظت پایه‌ی کاهش یافته و امکان ورود پایه به محدوده‌های غیر ارتجاعی افزایش می‌یابد؛ لذا در چنین مواردی لازم است که پایه با استفاده از المان‌های دارای رفتار غیر خطی مدل‌سازی شود.
- ۵- همواره با کاهش مقاومت تسلیم جداساز، شکل پذیری مورد نیاز جداساز افزایش می‌یابد، لیکن نحوه‌ی تغییرات شکل پذیری مورد نیاز جداساز با

رابطه‌ی جدیدی که با واقعیت انطباق بیشتری داشته باشد، جایگزین رابطه‌ی آئین نامه گردد.

مکان جداساز و پریود ارتعاشی سیستم پایه - جداساز و نقش کلیدی حداکثر تغییر مکان جداساز در طراحی سازه‌ی جدا شده، لازم است با انجام تحقیقات بیشتر

## مراجع

1. Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, Inc., (1996).
2. AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolated Design. Washington, DC, (1999).
3. Veletsos As, Newmark NM. Effects of inelastic behavior on the response of simple systems in earthquake motions. Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, vol. 2. 895-912, Tokyo, (1960).
4. Veletsos As, Newmark NM. Chelpati CV. Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motions. Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, vol. 2. 663-682, New Zeland, (1995).
5. Chopra AK. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Wile: Ne Jesy, 288-295, U.S.A., (2001).
6. Markis N, Black CJ. Dimensional analysis of rigid- plastic and elastoplastic structures under pulse type excitation. *Journal of Engineering Mechanics(ASCE)*, 130(9): 1006-1018, (2004).
7. Markis N, Black CJ. Dimensional analysis of bilinear oscillators under pulse type excitations. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 130(9): 1019-1031, (2004).
8. Markis N, Black CJ. Evaluation of peak ground velocity as a "good" intensity measure for near source ground motions. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 130(9): 1032-1044, (2004).
9. Markis N, Chang S. Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures. PEER Report 1998/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, (1998).
10. Park J-G, Otsuka H. Optimal yield level of bilinear seismic isolation devices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(9): 941-955, (1992).
11. Warn CP, Whittaker AS. Performance estimates in seismically isolated bridge structures. *Engineering Structures*, 26(9): 1261-1278, (2004).
12. Tsopelas P, Constantinou M.C. Experimental study of FPS system in bridge seismic isolation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25: 65-78, (1996).

13. Dicleli M, Buddaram S. Effect of isolator and ground motion characteristics on the performance of seismic- isolated bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35: 233-250, (2006).
14. Prakash, V., Powell, G. H., and Campbell, S., "Drain-2DX" Base Program User Guide", Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, (1992).
15. Das, B. M., "Principles of Foundation Engineering", PWS-KENT Publishing Company, Boston, Massachusetts, (1990).
16. Gordon P. Warn, Andrew S. Whittaker, "Displacement Estimates in Isolated Bridge Structures", Department of Civil, Structural & Environmental Engineering, University at Buffalo, (2002).
17. Takahashi Y. , Iemura H. and Kaneyoshi A. "Seismic Response of RC Bridge with Special Reference to the Effect of Bearings", Kyoto University, and Konoike Construction Co., (1998).