

چکیده

یکی از راههای مناسب برای کاهش تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها افزایش زمان تناوب و میرایی است. این مهم توسط جداسازها امکانپذیر خواهد بود. با توجه به این موضوع، عملکرد مناسب سازه‌های جداسازی شده در مناطق نزدیک گسل به عملکرد مناسب جداسازها تحت مؤلفه قائم زلزله وابسته است. با توجه به خطر لرزه‌ای زیاد در کشور و وجود گسل‌های فراوان در نزدیکی بسیاری از شهرهای بزرگ، احتمال وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک با مؤلفه قائم قابل توجه در این شهرها زیاد است. از سوی دیگر، اغلب آیین‌نامه‌ها با نادیده گرفتن مؤلفه قائم و با جایگزین کردن آثار دینامیکی این مؤلفه با بارهای استاتیکی معادل به آن پرداخته‌اند. با این حال، زلزله‌های گذشته، که در مناطق نزدیک گسل رخ داده‌اند، اهمیت در نظریه این مؤلفه را بر پاسخ پلها نشان می‌دهند. در این پژوهش، برای تعیین آثار فزاینده مؤلفه قائم زلزله بر پلهای بزرگراهی جداسازی شده، با طراحی جداساز ترکیبی اصطکاکی - لاستیکی (سری) برای یک پل بزرگراهی اثر مؤلفه قائم حرکت قوی زمین بررسی شده است. به این منظور، مطالعات عددی بر روی مدل پل جداسازی شده در حالت‌های تنها تحت مؤلفه‌های افقی بدون مؤلفه قائم و تحت سه مؤلفه زلزله پرداخته شده است. در این راستا، مدل اجزای محدود سازه یاد شده در نرم‌افزار *OpenSees* ایجاد و تحلیل‌های دینامیکی سازه تحت شتابنگاشت‌های ثبت شده در 14 رویداد لرزه‌ای در نزدیک گسل صورت گرفته است. همچنین ضریب اصطکاک جداساز به صورت متغیر با سرعت و نیروی قائم مدلسازی شده است. مقادیر لنگر وسط دهانه، نیروی محوری ستونها، نیرو و جابه‌جایی جداسازها و جابه‌جایی قائم وسط دهانه ثبت شده است. نتایج نشان داد نیروی برشی و جابه‌جایی نسبی جداساز مورد نظر در برخی از رویدادهای لرزه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین در مقادیر لنگر وسط دهانه، نیروی محوری ستونها و جابه‌جایی قائم وسط دهانه در نظر گرفتن مؤلفه قائم در تمامی موارد باعث افزایش این پاسخها شده است. در بخش دیگر، ارتباط میزان اثرگذار بودن مقادیر لنگر وسط دهانه، نیروی محوری ستونها و جابه‌جایی قائم وسط دهانه با مقدار شتاب طیفی در مد قائم بیان شده است. نتایج نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین این شدت لرزه‌ای و شاخصهای در دست بررسی است.

کلمات کلیدی: جداسازی لرزه‌ای، مؤلفه قائم، تحلیل تاریخیچه زمانی، پل بزرگراهی

ارزیابی شاخصهای عملکردی پل بزرگراهی جداسازی شده با جداساز اصطکاکی - لاستیکی تحت رویدادهای لرزه‌ای نزدیک گسل

افشین کلانتری (نویسنده مسؤل)

استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
a.kalantari@iiees.ac.ir

سید امیرحسین مؤیدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

1 - مقدمه

اهمیت این سازه‌ها در سامانه‌های حمل و نقل، حفظ ایمنی و عملکرد لرزه‌ای مطلوب آنها در زلزله ضروری است. استفاده از این سیستم‌های جداسازی، که با هدف کاهش تقاضای لرزه‌ای انجام می‌شود، روشی مناسب برای محافظت از روسازه در برابر آسیبهای ناشی از زلزله است.

امروزه به علت رشد جمعیت شهری و توسعه صنعت، طراحی و ساخت سازه‌های بزرگراهی در شهرهای بزرگ افزایش چشمگیری داشته است. پلها به‌عنوان یکی از مهمترین ارکان شبکه‌های بزرگراهی نقش مهمی در انتقال بار ترافیک در این شهرها ایفا می‌کنند. با توجه به

برشی افزایش می یابد؛ اما می توان از تغییرات نیروی برشی و جابه جایی طولی صرف نظر کرد. تحقیق دیگر [5]، اثر مخرب زلزله نزدیک گسل نسبت به زلزله دور از گسل بر پاسخ پل طراحی شده با ضوابط آیین نامه های کشور ژاپن مورد بررسی قرار گرفته است. در میان تحقیقات انجام شده بر روی جداسازها [6] اثر شتاب قائم بر عملکرد لرزه ای در پلهای بزرگراهی تحت چهار رویداد لرزه ای در ژاپن بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که اثر مؤلفه قائم تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سیستم های جداسازی ایجاد نمی کند. ناکاجیما و همکاران [7] با مدل آزمایشگاهی و تحلیل عددی اثر مؤلفه قائم بر پلهای جداسازی شده را مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به لحاظ نمودن آثار مؤلفه قائم در تغییرات نیروی محوری جداساز، این تغییرات آثار قابل توجهی برای مقادیر پاسخها نداشته است. با وجود این، اشاره می شود که تغییرات ضریب اصطکاک در صورت بررسی عملکرد پل جداسازی شده تحت مؤلفه قائم زلزله باید به صورت صحیحی در نظر گرفته شود. مازا و ولکانو [8] با بررسی پاسخهای یک ساختمان جداسازی شده با جداسازهای ترکیبی تحت هر سه مؤلفه زلزله به این نتیجه دست یافتند که استفاده از سیستم اصطکاک-لاستیکی به صورت سری برای کنترل آسیب به اعضای قاب بتن مسلح به علت تولید دوره تناوب مؤثر بلندتر در مقایسه با سازه های جداسازی شده دیگر مؤثرتر عمل می کند. با توجه به مقالات اشاره شده، مؤلفه قائم می تواند بر پاسخ جداسازها و پلهای جداسازی شده اثر گذار باشد.

2- تعریف مسأله

بر اساس مشاهده تغییرات شتاب قائم و همزمانی حدودی دوره تناوب طبیعی مؤثر در امتداد قائم در پلهای بزرگراهی با دوره تناوب حاکم در طیف شتاب قائم اغلب زلزله ها، انتظار می رود برخی از شاخصهای عملکرد لرزه ای پلها در مسیر قائم بار (جداسازها و ستون پایه ها) بر اثر شتاب قائم زلزله دستخوش تغییرات قابل توجهی شوند. در این مطالعه ارتباط این دو عامل بررسی و رابطه بین مقادیر پاسخ و طیف زلزله ارزیابی شده است. بخشهایی از این موارد در مطالعات پیشین مشخص و در ضوابط طراحی لرزه ای منظور شده اند. برای مطالعه در رابطه با این فرضیات و ارزیابی نتایج حاصل از این روابط، پاسخهای یک سازه واقعی طی رویدادهای لرزه ای به روش عددی تحلیل می شود. در این مطالعه با مدل کردن یک پل دو دهانه

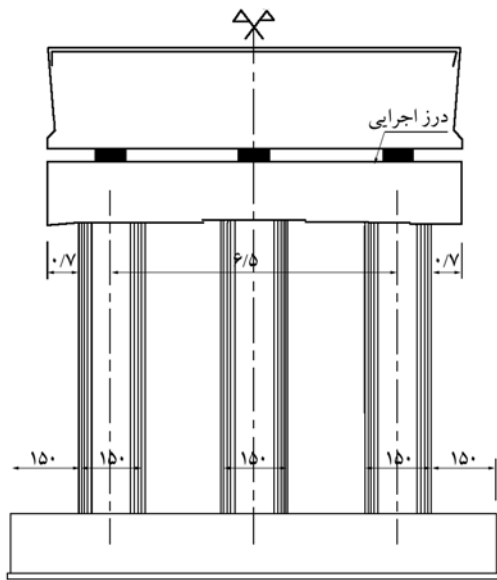
کاهش تقاضای سازه، در صورت عملکرد صحیح جداسازها در هنگام زلزله صورت می گیرد. از این رو، عوامل مؤثر بر عملکرد جداسازها حائز اهمیت و بررسی تأثیر زلزله بر عملکرد جداساز ضروری است. مؤلفه قائم زلزله و ضربه های قوی ناشی از این تکانها. از مواردی است که عملکرد پلهای جداسازی شده را در مناطق نزدیک گسل تحت تأثیر قرار می دهد. در جداسازهایی که با عملکرد اصطکاک باعث اتلاف انرژی می شوند تغییر نیروی محوری بین دو صفحه لغزشی می تواند باعث نوسان در فرآیند استهلاک انرژی در این سیستم های جداسازی شود. عملکرد پیش بینی نشده جداسازها می تواند بر روی جابه جایی نسبی و نیروی برشی در آنها تأثیر گذار باشد. در این پژوهش، با توجه به موضوعات ارائه شده و بررسیهای ابتدایی بر روی ضوابط آیین نامه ها و پژوهشهای گذشته، اثر مؤلفه قائم زلزله بر پاسخ پلهای جداسازی شده با جداساز اصطکاک-لاستیکی به صورت سری مورد توجه قرار گرفته است. پیش از این مطالعات متعددی در این زمینه صورت گرفته است. در این پژوهشها، پیامدهای ناشی از صرف نظر کردن این مؤلفه در سازه های نزدیک گسل بیان شده است. از جمله این تحقیقات می توان به مرجع پاپازوگلو و النسی [1] اشاره کرد که شواهد تحلیلی و میدانی آثار مخرب مؤلفه قائم بر روی ساختمانها و پلها را نشان می دهد. این پژوهشگران ادعا کردند که نوسانات قابل توجه در نیروی محوری اجزای قائم به کاهش ظرفیت برشی ستونها منجر می شود. در تحقیقی دیگر گلوید [2] معیاری در طراحی 60 پل با شایستگیهای جعبه ای پیش تنیده ارائه کرده که اثر مؤلفه قائم زلزله در آن منظور شده است. مقادیر طراحی برای برش قائم عرشه و لنگر خمشی در دو دهانه سراسری پلها نشان دهنده این است که پاسخ دینامیکی حاصل از شتاب قائم می تواند بسیار بزرگتر از آثار بار مرده باشد. در تحقیقی دیگر [3] با در نظر گرفتن چند پل معمولی، مؤلفه قائم زلزله در ضوابط طراحی لرزه ای در کالیفرنیا (Caltrans) مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج این پژوهش نشان داد ضوابط Caltrans دقت مناسبی ندارد و مؤلفه قائم تغییراتی در نیروی محوری ستونها و لنگر خمشی وسط دهانه ایجاد می کند. در سال 2008 رهایی و آرزومندی [4] اثر مؤلفه قائم بر پایه های پل مورد نظر در دو حالت با و بدون مؤلفه قائم تحت زلزله های طبعی، نورتریج و کوبه مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج با در نظر گرفتن مؤلفه قائم، نیروی محوری، کرنش محوری و

اضافه شده است. این پل، دو دهانه 25 متری دارد که ارتفاع آن 10/15 متر و عرشه آن شامل پنج شاهتیر و دال بتنی به ضخامت 20 سانتیمتر است. تک پایه آن نیز متشکل از سه ستون لویایی شکل است که در بالا به تیر سرستون متصل شده است. شاهتیرها بر روی تکیه گاه وسط و در پایه ها با دیوار بتنی به هم دوخته شده تا عملکرد یکپارچه داشته باشند و سه جداساز مورد نظر در هر یک از پایه ها زیر این دیوار بتنی و روی سرستونها قرار گرفته اند. مدل مورد مطالعه از این نشریه انتخاب شده و جداساز ترکیبی برای آن طراحی و استفاده شده است. همچنین از اثر برهمکنش خاک و سازه در شالوده و کوله ها صرف نظر و اتصال ستونها در شالوده و پایه جداسازها در کوله ها به صورت گیردار مدل شد. مهمترین اجزای پل در شکل (1) نشان داده شده است.

2-3- جداساز لرزه ای

در این مطالعه از جداساز ترکیبی استفاده شده است. این جداساز شامل تکیه گاه لغزشی است که بر روی تکیه گاه لاستیکی نصب می شود. در قسمت زیرین لاستیک و در قسمت بالایی دو صفحه از جنس فولاد ضد زنگ و PTFE قرار دارند که به صورت سری عمل می کنند. بر اثر اعمال نیروی زلزله ابتدا لاستیک عمل می کند تا نیروی افقی وارد بر آن بیشتر از نیروی اصطکاکی دو سطح لغزشی شود. سپس دو صفحه بالایی جداساز شروع به حرکت می کنند و لغزش اتفاق می افتد. نمودار رفتاری این جداساز، دوخطی با شیب ثانویه صفر است (شکل 2).



شکل (1): مهمترین مؤلفه های پل تحت مطالعه [9]

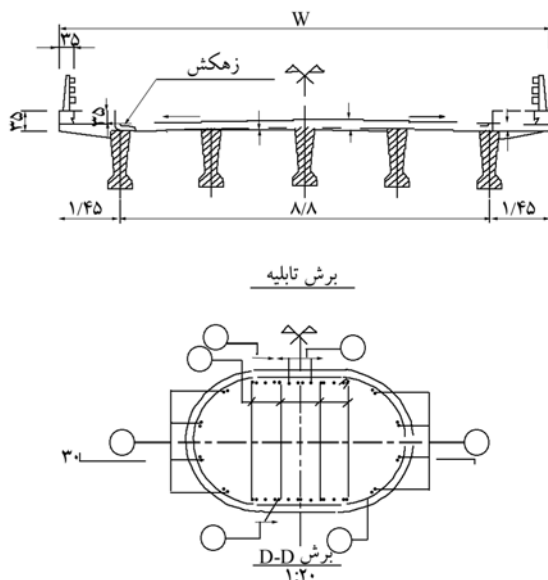
بزرگراهی همسان در نرم افزار اجزای محدود OpenSees و طراحی جداساز ترکیبی اصطکاکی-لاستیکی (سری) اثر مؤلفه قائم در حالت های تنها تحت دو مؤلفه افقی و تحت دو مؤلفه افقی به همراه مؤلفه قائم بر روی پاسخهای پل پرداخته شده است. به عبارت دیگر، هدف این مقاله کنترل ضوابط آیین نامه های مختلف نیست؛ بلکه به اثر فزاینده مؤلفه قائم بر پاسخ اجزای مختلف پلها و جداساز مورد نظر توجه شده است. همچنین برای صحت این فرضیات و ارزیابی نتایج حاصل از این روابط، پاسخهای یک سازه واقعی طی رویدادهای لرزه ای به روش عددی تحلیل شده است.

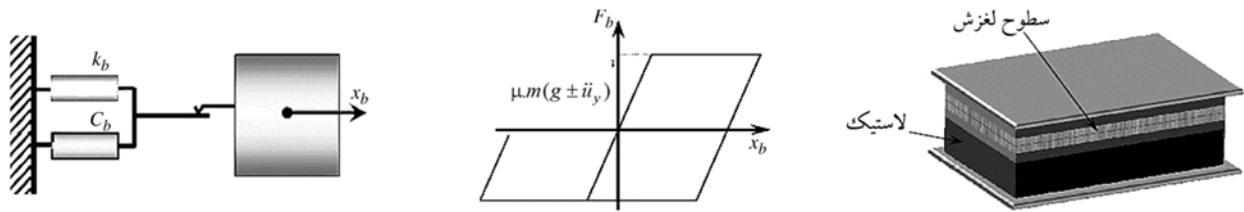
3- مدل عددی

مشخصات پل مورد نظر و نحوه مدلسازی آن در بخش بعد شرح داده شده است.

1-3- مشخصات پل مورد نظر

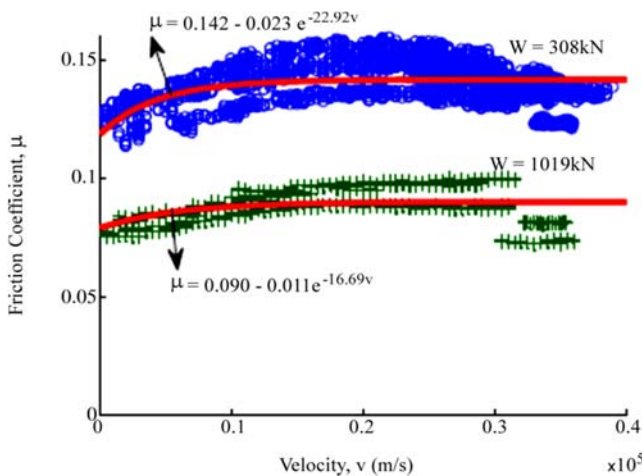
در سال 1386، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور نشریه شماره 294 را با عنوان "نقشه های همسان پلها و عرشه پلهای راه دهانه های 10 تا 25 متر" منتشر نمود [9]. این نشریه جزئیات نقشه های اجرایی برای پلهای بزرگراهی همسان را ارائه نموده است. با توجه به فراگیری کاربرد این نقشه ها در کشور، سازه های پل مشابه با این گروه از پلها به تعداد زیاد در کشور ساخته شده یا طبق برنامه وزارت راه و شهرسازی ساخته می شود. در این مطالعه از مدل پل شماره 25 F-G-2X-294 به عنوان سازه اولیه استفاده شده و جداساز و جداسازهای لرزه ای به آن



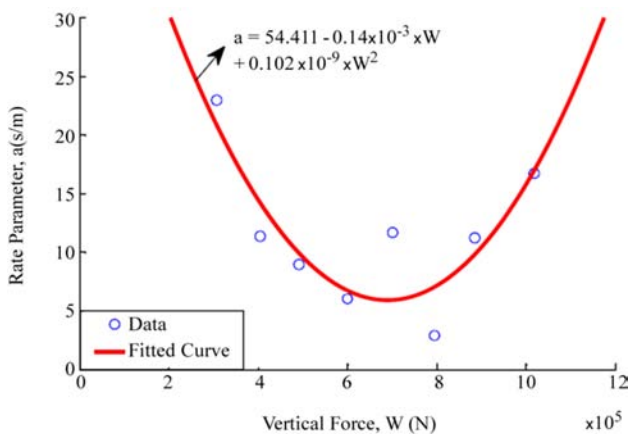


شکل (2): شکل واقعی، نمودار رفتاری ایده‌آل و مدل ریاضی جداساز ترکیبی [15]

این جداساز فاقد نیروی بازگرداننده کامل است و تغییر مکان دائمی در این سیستم می‌تواند حادث شود. طراحی این جداساز بر اساس راهنمای (AASHTO (2010)، که برای طراحی جداسازها در پلها می‌باشد [10]، صورت گرفته است. در این راهنما، چهار روش برای طراحی جداسازها وجود دارد. در این پژوهش، برای برآورد اولیه از روش ساده‌سازی شده و در نهایت با توجه به دوره تناوب مؤثر پل مورد نظر کمتر از 3 ثانیه، از تحلیل طیفی برای طراحی جداسازها استفاده شد. جداساز طراحی شده در این مطالعه دارای سختی اولیه‌ای برابر با 2260 کیلو نیوتن بر متر برای پایه‌های کناری و 7450 کیلو نیوتن بر متر برای پایه وسطی است. نشریه 523 [11]، سختی قائم لاستیک در فشار را حدود 1000 برابر سختی افقی بیان می‌کند که در این پژوهش از این نسبت استفاده شده است. جابه‌جایی حد تسلیم این جداساز دو سانتیمتر است.



شکل (3): تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به سرعت لغزشی [12]



شکل (4): تغییرات \$a\$ نسبت به بار قائم [12]

برای مدلسازی ضریب اصطکاک در این مطالعه از مدل رفتاری پژوهش دائو و همکاران [12] استفاده شده است. در این مدل، تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به سرعت لغزشی و بار قائم لحظه‌ای در نظر گرفته شده است. در این مطالعه تغییرات ضریب اصطکاک با توجه به پژوهش موخا و همکاران [13] با معادله (1) به صورت تابعی از حداقل و حداکثر مقدار ضریب اصطکاک و سرعت لغزشی بیان و تغییرات نیرو برای هشت بار قائم آزمایش و نمودارها بر روی این مقادیر برازش شده‌اند.

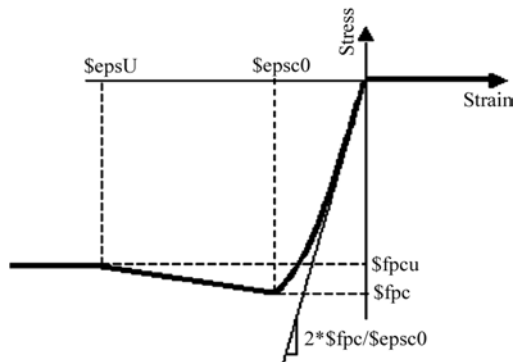
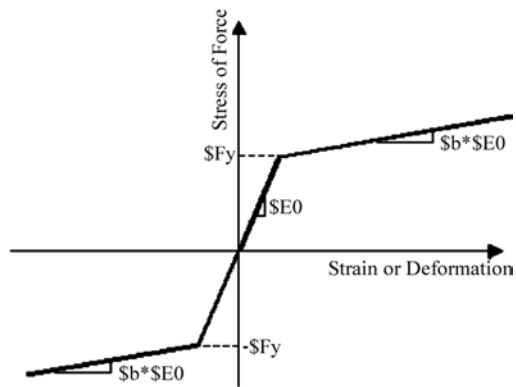
$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-a\dot{u}) \quad (1)$$

در رابطه (1)، μ_{\max} و μ_{\min} ضریب اصطکاک در بیشترین سرعت و کمترین سرعت لغزشی است [14].

تغییرات این دو پارامتر در رابطه‌های (2) و (3) ارائه شده است:

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

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



شکل (6): مصالح فولاد و بتن [17]

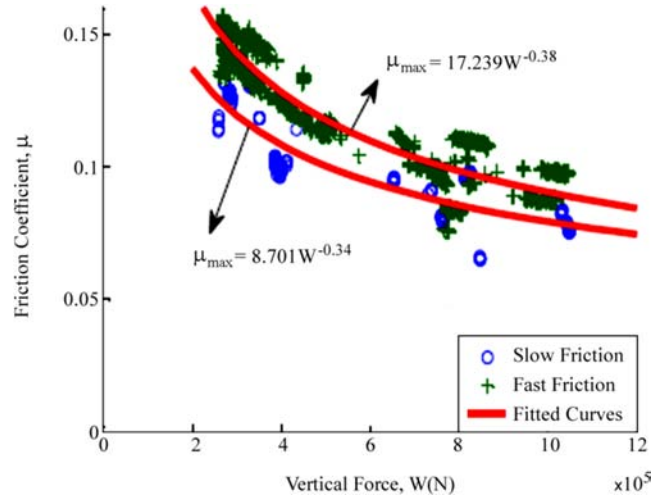
همچنین مقطع ستونها از دو شکل نیم‌دایره و یک مستطیل تشکیل و با استفاده از دستور Fiber در نرم‌افزار مدل شده است. برای مدل‌سازی جداسازها از دستور element flat Slider Bearing و برای در نظر‌گیری تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به سرعت لغزشی و نیروی محوری از دستور friction Model VelNormalFrcDep استفاده شده است [18].

4- تحریک ورودی زلزله

برای بررسی اثر مؤلفه قائم بر پاسخ پلها از شتابنگاشت‌های ثبت‌شده در حوزه نزدیک، که اغلب نسبت مؤلفه قائم به افقی قابل توجهی دارند، استفاده شده است. در این پژوهش از 14 نگاهت برگرفته از پژوهش [3] استفاده شده است. زلزله‌های انتخابی این پژوهش دارای مشخصات زیر می‌باشند:

- 1- فاصله از گسل فعال کمتر از 10 کیلومتر؛
- 2- بیشینه شتاب افقی بیش از $5g$ ؛
- 3- خاک نوع دو و سه (C, D).

مشخصات شتابنگاشت‌های استفاده شده در این پژوهش در جدول (1) آورده شده است.



شکل (5): تغییرات بیشینه و کمینه ضریب اصطکاک نسبت به بار قائم [12]

3-3- مصالح

مدل مصالح Uniaxial Material Concrete01 برای بتن محصور شده (هسته بتنی) و بتن پوششی به کار رفته است. این دستور برای مصالح بتن تک‌محوری از مدل ارائه شده توسط کنت و پارک [16] با سختی باربرداری و بارگذاری که به صورت خطی کاهش یافته بهره می‌برد. در مدل‌سازی برای بتن محصور نشده حداکثر تنش در کرنش $0/002$ و حد نهایی در کرنش $0/006$ در نظر گرفته شده است. مصالح بتن محصور شده حداکثر تنش $26/5$ نیوتن بر میلی‌متر مربع در کرنش $0/005$ و تنش 25 نیوتن بر میلی‌متر مربع در کرنش $0/05$ دارد. میلگردهای طولی با مصالح Steel01 با رابطه تنش - کرنش دوخطی و با منظور کردن سختی کرنشی مدل شدند. در میلگرد فولادی تنش جاری شدن 4000 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و شیب ناحیه سختی کرنشی $0/01$ شیب اولیه در نظر گرفته شده است. در شکل (6) نمودار رفتاری این مصالح نشان داده شده است.

4-3- پیکربندی اجزا

در اغلب مدل‌سازیهای صورت گرفته بر روی عرشه، به علت حفظ سادگی از مدل شاخه‌ای استفاده می‌شود؛ به گونه‌ای که در آن عرشه با یک تیر تک معادل‌سازی می‌شود. در این مطالعه نیز عرشه پل شامل شاهتیرها و دال بتنی در روسازه به صورت کشسان و مقطع ترک نخورده در نظر گرفته شده و با خصوصیات کامل مقطع به صورت شاخه‌ای مدل‌سازی شده است. در این پژوهش از اجزای با پلاستیسیته توزیع شده در طول عضو در OpenSees استفاده شده است [17].

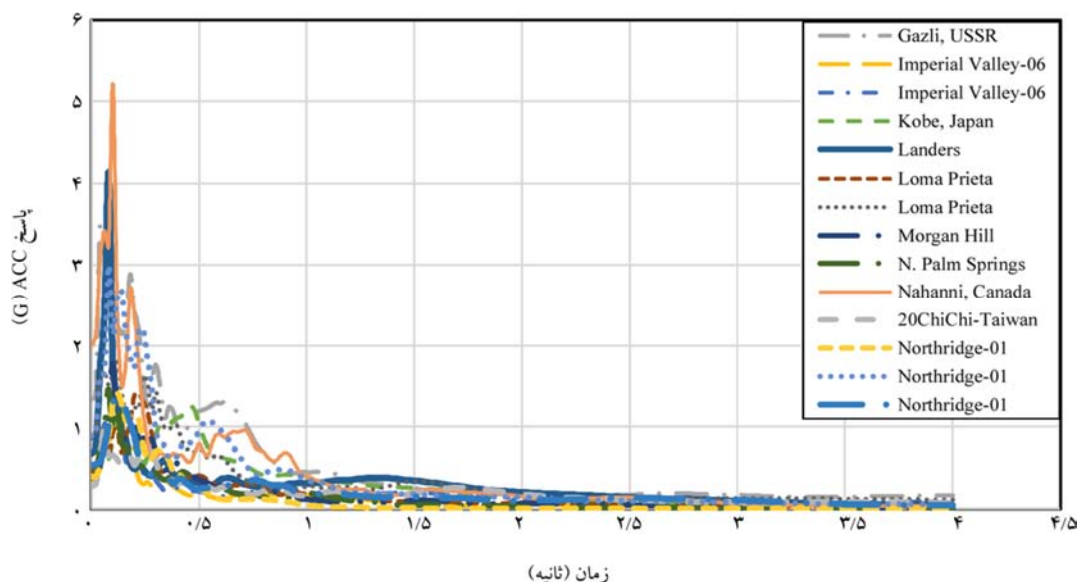
جدول (1): شتابنگاشتهای مورد استفاده در این پژوهش

| PGA-V(g) | PGA-H(g) | PGA-L(g) | نوع | فاصله (کیلومتر) | M_w | ایستگاه | سال | زلزله | ردیف |
|----------|----------|----------|-----|-----------------|-------|-------------------|------|--------------------|------|
| 1/26 | 0/60 | 0/71 | C | 3 | 6/8 | Lamont 375 | 1976 | Gazli, USSR | 1 |
| 0/42 | 0/58 | 0/77 | D | 2/5 | 6/5 | Bonds Corner | 1979 | Imperial Valley-06 | 2 |
| 0/43 | 0/45 | 0/60 | D | 3/8 | 6/5 | El centro Array#8 | 1979 | Imperial Valley-06 | 3 |
| 0/43 | 0/69 | 0/69 | C | 1/2 | 6/9 | Takarazuka | 1995 | Kobe, Japan | 4 |
| 0/81 | 0/72 | 0/78 | C | 1/1 | 7/3 | Lucerne | 1992 | Landers | 5 |
| 0/45 | 0/64 | 0/47 | C | 5/1 | 6/9 | Corralitos | 1989 | Loma Prieta | 6 |
| 0/89 | 0/56 | 0/60 | C | 6/1 | 6/9 | LGPC | 1989 | Loma Prieta | 7 |
| 0/38 | 0/7 | 1/2 | C | 0/1 | 6/2 | Coyoto Lake Dam | 1984 | Morgan Hill | 8 |
| 0/47 | 0/49 | 0/61 | D | 7/3 | 6 | White water | 1986 | N. Palm Springs | 9 |
| 2/08 | 0/97 | 1/09 | C | 6 | 6/8 | Site1 | 1985 | Nahanni, Canada | 10 |
| 0/33 | 0/65 | 0/82 | C | 7/31 | 7/6 | CHY028 | 1999 | ChiChi-Taiwan | 11 |
| 0/38 | 0/40 | 0/65 | D | 7/46 | 6/7 | Pardee-SCE | 1994 | Northridge-01 | 12 |
| 0/85 | 0/47 | 0/83 | D | 7/1 | 6/7 | Rinaldi | 1994 | Northridge-01 | 13 |
| 0/53 | 0/6 | 0/84 | C | 6/4 | 6/7 | Sylmar | 1994 | Northridge-01 | 14 |

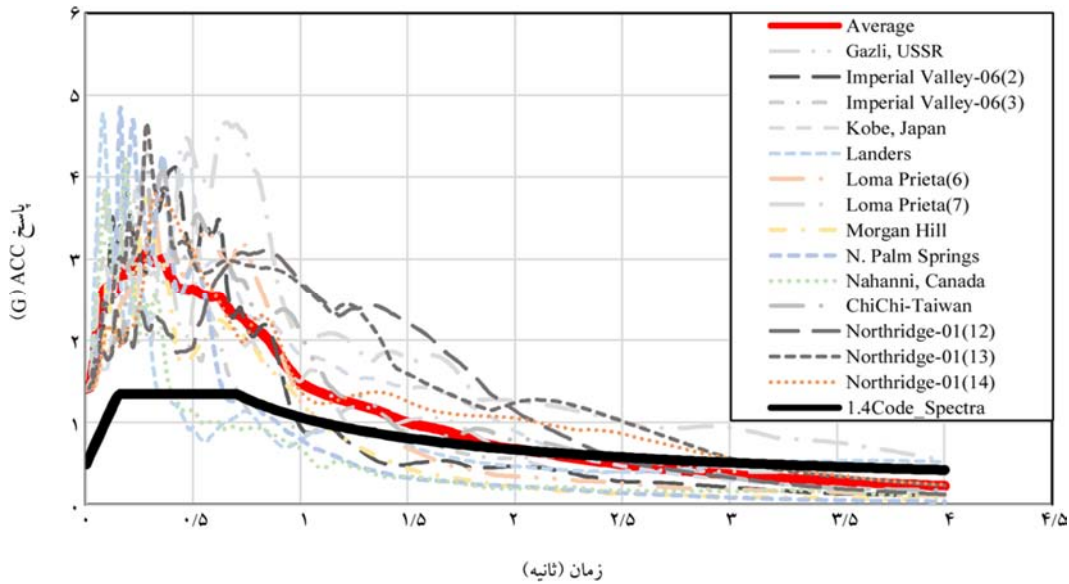
4-1- راستی آزمایی

مدلسازی عددی در اغلب پژوهشهای انجام شده روند مشابهی را طی می کند. روسازه پل به صورت عرشه معادل مدل شده و به اجزای ستون مقاطع فایبر اختصاص داده می شود. در تحقیقی [20] با انجام آزمایش بر روی یک قاب دو ستونی، که ابعاد ستونهای آن بسیار نزدیک به عمده ستون پلهای بکار رفته در کالیفرنیاست، با انجام تحلیل بار افزون، صحت روش مدلسازی در نرم افزار OpenSees بررسی شده است. در این مطالعه نیز با مدلسازی یک قاب یک دهانه و انجام تحلیل مشابه اطمینان از

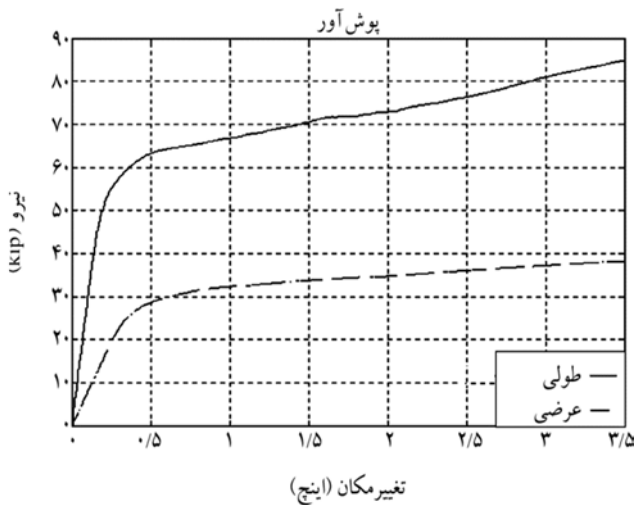
تمامی شتابنگاشتها به روش ارائه شده در نشریه شماره 463 سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور [19] مقیاس شده اند. بر این اساس ضریب مقیاس برای شتابنگاشتهای این پژوهش 0/8 محاسبه شده است. برای ثابت ماندن نسبت شتاب قائم به افقی این ضریب در راستای قائم نیز مورد استفاده قرار گرفته است. طیفهای قائم در یک شکل و طیفهای ترکیبی مؤلفه های افقی و 1/4 برابر طیف آیین نامه، که برای مقیاس کردن شتابنگاشتها مورد استفاده قرار گرفته، در شکلهای (7 و 8) نشان داده شده است.



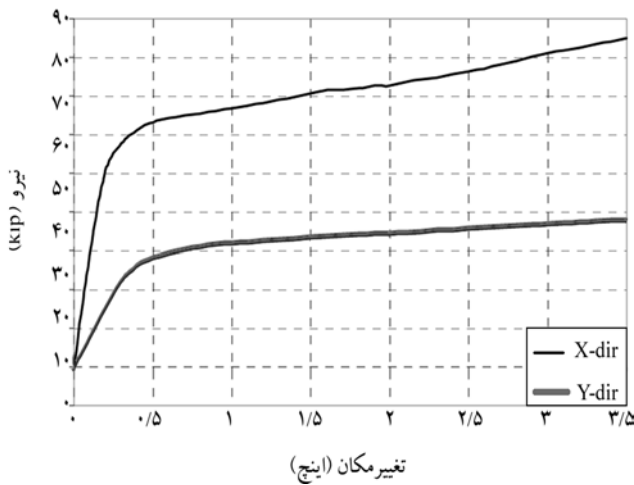
شکل (7): طیفهای قائم



شکل (8): طیف ترکیبی مؤلفه‌های افقی و 1/4 برابر طیف آیین‌نامه

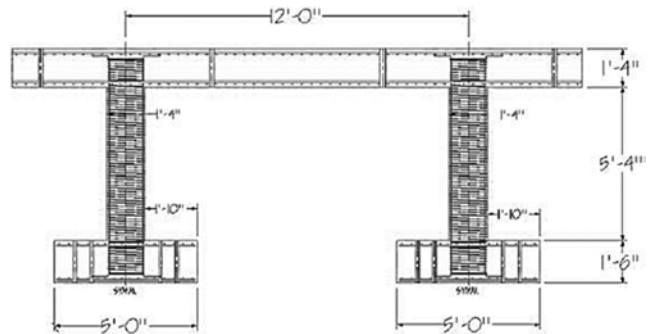


شکل (10): تحلیل پوش آور [20]



شکل (11): تحلیل پوش آور برای راستی آزمایشی نتایج

صحت روش مدل‌سازی صورت گرفته است. هریک از ستونهای قاب شامل 12 میلگرد طولی شماره #4 (12/7 میلیمتر) و ماریجهای محصورکننده با گام 3/5 است. جزئیات میلگرد گذاری و مشخصات هندسی قاب مورد بررسی در شکل (9) نشان داده شده است.



شکل (9): ابعاد قاب پل دو ستونی بتن مسلح و جزئیات میلگرد گذاری

در این تحلیل گره شماره 3 (روسازه) به مقدار تغییر مکان 3/5 اینچ (88/9 میلیمتر) پوش داده می‌شود. نتایج حاصل از تحقیقی دیگر [20] در شکل (10) و نتایج حاصل از مدل‌سازی مطالعه حاضر در شکل (11) نشان داده شده است.

مقادیر سختی جداساز و ضریب اصطکاک تعریف شده با مدل نیز به کمک نمودارهای هیستریزیس معرف رفتار جداساز، مورد کنترل قرار گرفته و از صحت رفتار و تطابق آن با مقادیر مورد نظر اطمینان حاصل شد. مشخصات این دو جداساز در جدول (2) آورده شده است.

جدول (2): مشخصات جداسازهای واقع بر پایه وسط و کوله پل

| سختی اولیه (کیلو نیوتن بر متر) | جابه‌جایی تسلیم (متر) | نیروی برشی (نیوتن) | |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|
| 7450 | 0/02 | 1/43×100000 | جداساز پایه وسط |
| 2260 | 0/02 | 0/43×100000 | جداساز کوله‌ها |

جدول (3): دوره تناوب در مد اول تا سوم

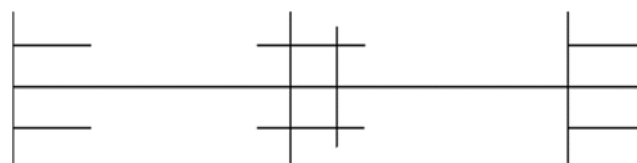
| شماره مد | OpenSees | Sap2000 |
|----------|----------|---------|
| اول | 1/03 | 1/06 |
| دوم | 0/92 | 0/92 |
| سوم | 0/82 | 0/83 |

5- نتایج تحلیل‌های عددی

برای ارزیابی پل مورد نظر دو تحلیل ارتعاش آزاد و تاریخچه زمانی انجام شده است.

5-1- تحلیل ارتعاش آزاد

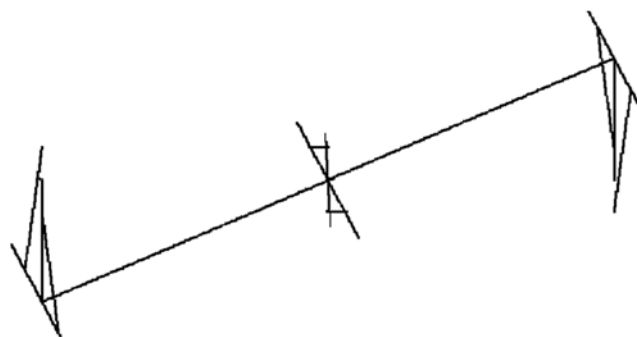
به منظور تعیین دوره تناوب طبیعی و شکل مدهای ارتعاش پل مورد نظر تحلیل مدی انجام پذیرفته است. مدهای اول، دوم و سوم پل جداسازی شده در نمای پلان پل در شکل‌های (12، 13 و 14) نشان شده است. همچنین با توجه مراحل طراحی جداساز و انجام تحلیل طیفی در نرم‌افزار Sap2000 دوره تناوب سه مد اول پل جداسازی شده در نرم‌افزار OpenSees و SAP2000 مقایسه شده است.



شکل (12): مد اول (طولی)



شکل (13): مد دوم (عرضی)



شکل (14): مد سوم (پیچی)

5-2- تحلیل تاریخچه زمانی

در این پژوهش با در نظرگیری دو حالت مختلف، اثر مؤلفه قائم بر پل جداسازی شده مقایسه شده است:

حالت اول: فقط تحت دو مؤلفه افقی زلزله بدون مؤلفه قائم،

حالت دوم: تحت هر سه مؤلفه قائم زلزله.

در هر مرحله حداکثر پاسخها در دو حالت مورد نظر محاسبه و تأثیر مؤلفه قائم بر مقادیر پاسخها با پارامتر α_R بیان شده است. در

رابطه (4) این پارامتر تعریف شده است:

$$\alpha_R = \frac{R_{3D} - R_{2D}}{R_{2D}} \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه، R_{3D} حداکثر پاسخ مورد نظر در حالت در نظرگیری مؤلفه قائم (حالت دوم) حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و R_{2D} حداکثر همان پاسخ در حالتی است که پل مورد نظر تنها تحت دو راستای افقی زلزله (حالت اول) قرار گرفته است. در این بخش پاسخهای اشاره شده برای دو حالت مورد نظر محاسبه شده و شاخص ارائه شده در رابطه (4) برای زلزله‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نمودار تاریخچه زمانی در زلزله‌ای که مؤلفه قائم بیشترین تأثیر را بر پاسخ مورد نظر دارد قرار داده شده است. شاخص α_R برای پاسخهای مورد بررسی در این پژوهش در جدول (4) ارائه شده است.

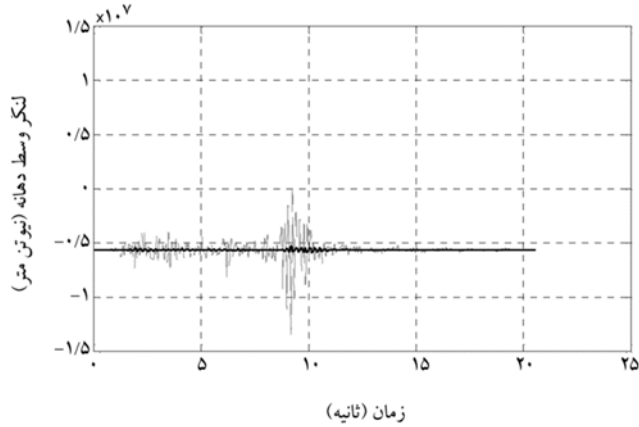
 جدول (4): تعریف شاخص α_R برای هر یک از پاسخها

| | |
|--|--------------------|
| نیروی محوری ستون میانی | α_{F-C} |
| لنگر وسط دهانه | α_M |
| نیروی برشی جداساز پایه میانی در راستای عرضی پل | $\alpha_{F-Iso-P}$ |
| جابه‌جایی نسبی جداساز پایه میانی در راستای عرضی پل | $\alpha_{D-Iso-P}$ |
| تغییرات نیروی محوری جداسازها | α_{N-F} |

5-2-1- اثر مؤلفه قائم بر پاسخها

با توجه به اینکه ستونها در حالت قائم قرار دارند، تغییرات مؤلفه قائم زلزله می‌تواند بر مقدار پاسخها تأثیر گذار باشد. در جدول (5)، α_R برای این پاسخ ارائه شده است.

قرار گرفتن رفتار جداسازها تحت مؤلفه قائم زلزله بر این پاسخ، لنگر وسط دهانه بررسی شد. مقایسه تاریخیچه پاسخ برای لنگر وسط دهانه در دو حالت در شکل (16) نشان داده شده است.



شکل (16): لنگر وسط دهانه در حالت اول (خط توپر) و حالت دوم (خط چین) (Nahanni, Canada)

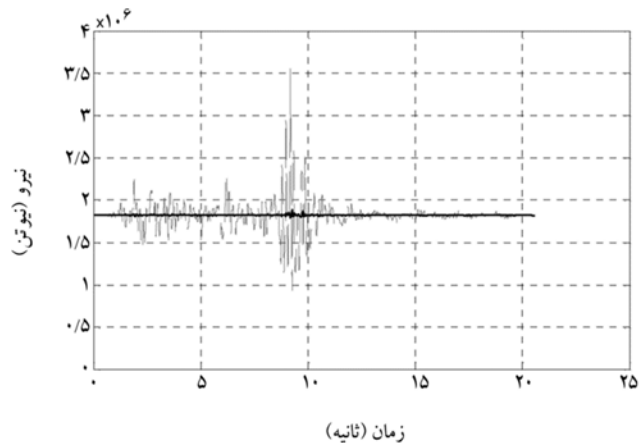
جدول (6): α_R برای لنگر وسط دهانه

| ؟ | زلزله | α_M |
|----|-----------------------|------------|
| 1 | Gazli, USSR | 121/56 |
| 2 | Imperial Valley-06(2) | 35/23 |
| 3 | Imperial Valley-06(3) | 25/01 |
| 4 | Kobe, Japan | 50/14 |
| 5 | Landers | 35/57 |
| 6 | Loma Prieta(6) | 51/03 |
| 7 | Loma Prieta(7) | 67/29 |
| 8 | Morgan Hill | 42/04 |
| 9 | N. Palm Springs | 59/00 |
| 10 | Nahanni, Canada | 127/40 |
| 11 | ChiChi-Taiwan | 23/76 |
| 12 | Northridge-01(12) | 48/82 |
| 13 | Northridge-01(13) | 113/86 |
| 14 | Northridge-01(14) | 62/08 |

با توجه به نتایج به دست آمده، مؤلفه قائم زلزله بر مقادیر لنگر وسط دهانه نیز تأثیر گذار است و باعث افزایش این پاسخ برای تمامی زلزله‌ها می‌شود. این پاسخ برای زلزله Nahanni, Canada به بیشترین مقدار خود رسیده و می‌تواند آن را تا میزان 128% افزایش دهد. واقع در این زلزله لنگر وسط دهانه به علت در نظرگیری مؤلفه قائم زلزله بیش از دو برابر افزایش می‌یابد. همچنین اثر مؤلفه قائم بر این پاسخ نسبت به نیروی محوری ستونها بیشتر بوده، باعث بزرگتر شدن

جدول (5): α_R برای نیروی محوری ستون

| ؟ | زلزله | α_{F-C} |
|----|-----------------------|----------------|
| 1 | Gazli, USSR | 85/56 |
| 2 | Imperial Valley-06(2) | 19/74 |
| 3 | Imperial Valley-06(3) | 18/43 |
| 4 | Kobe, Japan | 27/74 |
| 5 | Landers | 25/69 |
| 6 | Loma Prieta(6) | 36/48 |
| 7 | Loma Prieta(7) | 42/63 |
| 8 | Morgan Hill | 24/59 |
| 9 | N. Palm Springs | 35/22 |
| 10 | Nahanni, Canada | 89/02 |
| 11 | ChiChi-Taiwan | 15/13 |
| 12 | Northridge-01(12) | 32/10 |
| 13 | Northridge-01(13) | 81/96 |
| 14 | Northridge-01(14) | 35/29 |

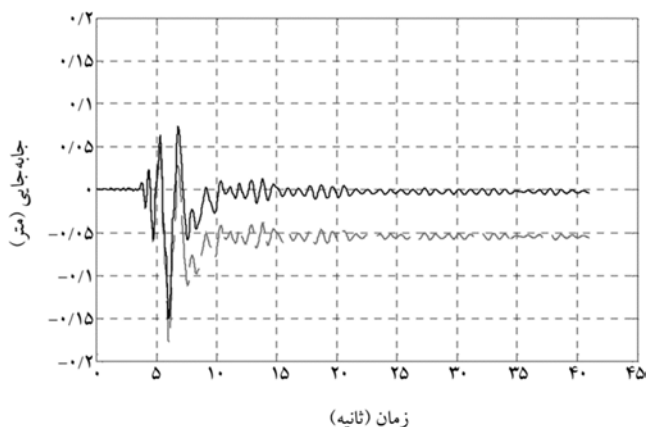


شکل (15): نیروی محوری ستون در حالت اول (خط توپر) و حالت دوم (خط چین) (Nahanni, Canada)

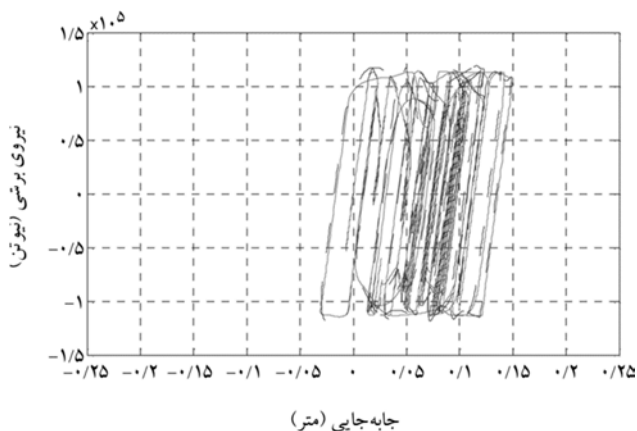
با توجه به نتایج به دست آمده، مؤلفه قائم زلزله بر مقادیر نیروی محوری ستونها مؤثر است و باعث افزایش این پاسخ برای تمامی زلزله‌ها می‌شود. این پاسخ برای زلزله Nahanni و Canada به بیشترین مقدار خود رسیده، می‌تواند آن را تا 90% افزایش دهد. با توجه به تأثیر این مؤلفه در نیروی محوری ستونها و در نظرگیری منحنی برهمکنش نیروی محوری-لنگر خمشی، مقطع این مؤلفه می‌تواند آثار سوء بر عملکرد خمشی ستونها داشته باشد. در نتیجه، توجه به این مؤلفه در روند تحلیل و طراحی پلها، بویژه پایه‌ها حائز اهمیت است.

با توجه به قرار گیری عرشه پل بر روی جداسازها و تحت تأثیر

با توجه به مقادیر محاسبه شده برای این پاسخ، مشاهده می‌شود که مؤلفه قائم زلزله باعث افزایش تغییرات حداکثر نیروی برشی به وجود آمده در جداسازها در تمامی زلزله‌ها می‌شود. در نتیجه، مؤلفه قائم باعث شده تا در مقدار، نیروی بزرگتری لغزش عرشه بر روی جداسازها صورت پذیرد. با توجه به اینکه در طراحی جداساز لرزه‌ای از مؤلفه قائم زلزله صرف نظر می‌شود و جداساز برای مقدار نیروی ثابت $\mu.m.g$ ثابتی طراحی می‌شود، این نیرو به علت تغییرات ضریب اصطکاک و وزن اعمالی بر جداسازها می‌تواند تا حدود 46% افزایش یابد. این افزایش به معنای آن است که نیروی بیشتری از زیر سازه به روسازه منتقل می‌شود. با توجه به شکل‌های (18)، (19) و (20) در مدت زمان زلزله این پاسخ در دو حالت با و بدون مؤلفه قائم نزدیک به هم تغییر کرده است و تنها در زمانهایی از زلزله‌ها تفاوت وجود دارد که باعث اختلاف بیشینه نیروی برشی جداسازها می‌شود.



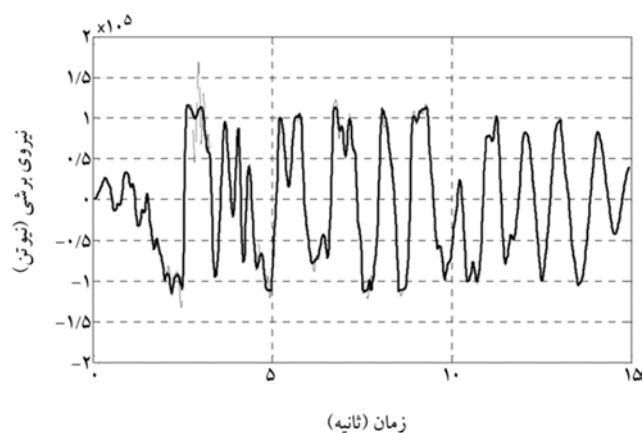
شکل (18): نسبی جداساز در حالت اول (خط توپر) و حالت دوم (خط چین) (Kobe, Japan)



شکل (19): نیرو-جاب‌جایی جداساز میانی در حالت اول (خط توپر) و حالت دوم (خط چین) (Imperial valley-06)

پارامتر α_R در این پاسخ نسبت به α_R برای نیروی محوری ستون‌ها شده است.

نیروی برشی جداساز بر روی پایه میانی و در راستای عرضی پل پارامتر دیگری است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر ضریب اصطکاک و وزن قائم اعمال شده بر جداسازها، نیروی برشی ایجاد شده در جداساز نیز امکان تغییر خواهد داشت. با توجه به افزایش نیروی محوری ناشی از مؤلفه قائم زلزله، امکان فراگذشت این نیرو از ظرفیت برشی تکیه‌گاه لاستیکی وجود خواهد داشت. نتیجه این بررسی در شکل (17) ارائه شده است.

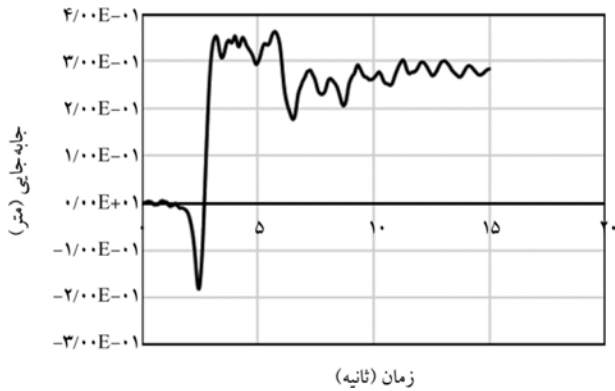


شکل (17): نیروی برشی جداساز در حالت اول (خط توپر) و حالت دوم (خط چین) (Northridge-01(13))

جدول (7): α_R برای نیروی برشی جداساز در راستای عرضی

| $\alpha_{F-Iso-P}$ | زلزله | |
|--------------------|-----------------------|----|
| 27/20 | Gazli, USSR | 1 |
| 5/94 | Imperial Valley-06(2) | 2 |
| 6/48 | Imperial Valley-06(3) | 3 |
| 10/71 | Kobe, Japan | 4 |
| 9/12 | Landers | 5 |
| 15/14 | Loma Prieta(6) | 6 |
| 12/97 | Loma Prieta(7) | 7 |
| 2/34 | Morgan Hill | 8 |
| 5/57 | N. Palm Springs | 9 |
| 21/14 | Nahanni, Canada | 10 |
| 6/59 | ChiChi-Taiwan | 11 |
| 9/55 | Northridge-01(12) | 12 |
| 45/36 | Northridge-01(13) | 13 |
| 17/44 | Northridge-01(14) | 14 |

دارای رفتار انعطاف پذیر است، مقدار جابه جایی ماندگار عرشه پل پس از زلزله به علت بازگرداندن این جداساز به محل اولیه حائز اهمیت می باشد. برای این پاسخ تنها مقدار پاسخ تحت سه راستا محاسبه شده است.



شکل (21): جابه جایی ماندگار عرشه در راستای عرشی در Northridge- (01(13)

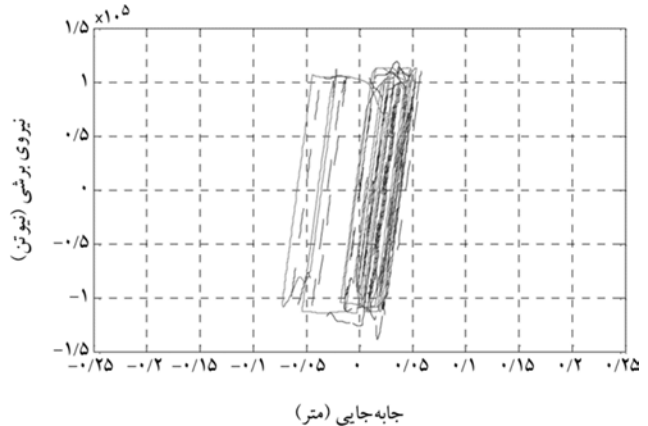
جدول (9): جابه جایی ماندگار عرشه

| ؟ | زلزله | سانتیمتر |
|----|-----------------------|----------|
| 1 | Gazli, USSR | 15/12 |
| 2 | Imperial Valley-06(2) | 8/56 |
| 3 | Imperial Valley-06(3) | 2/81 |
| 4 | Kobe, Japan | 5/68 |
| 5 | Landers | 1/68 |
| 6 | Loma Prieta(6) | 2/39 |
| 7 | Loma Prieta(7) | 12/70 |
| 8 | Morgan Hill | 16/54 |
| 9 | N. Palm Springs | 1/88 |
| 10 | Nahanni, Canada | 2/89 |
| 11 | ChiChi-Taiwan | 1/88 |
| 12 | Northridge-01(12) | 17/77 |
| 13 | Northridge-01(13) | 28/36 |
| 14 | Northridge-01(14) | 2/52 |

بیشترین مقدار این پاسخ برای زلزله Northridge-01(13) به حدود 29 سانتیمتر می رسد که با توجه به توضیحات ارائه شده این مقدار جابه جایی ماندگار برای عرشه پل می تواند حائز اهمیت باشد. این پاسخ در زلزله های دیگر در بازه 1 تا 17 سانتیمتر تغییر می کند.

2-2-6- تغییرات پاسخها با مد مؤثر در ارتعاش قائم سازه

در این قسمت ارتباط میان بعضی از پاسخها با طیف قائم



شکل (20): نیرو - جابه جایی جداساز میانی در حالت اول (خط توپر) و حالت دوم (خط چین) (Nahanni, Canada)

جدول (8): α_R برای جابه جایی نسبی جداساز در راستای عرضی

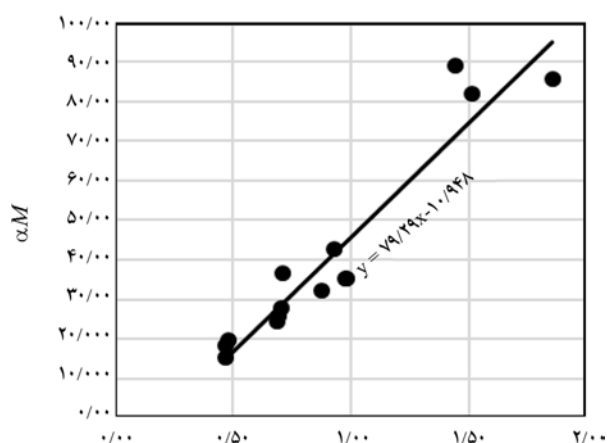
| ؟ | زلزله | $\alpha_{D-Iso-P}$ |
|----|-----------------------|--------------------|
| 1 | Gazli, USSR | 6/84 |
| 2 | Imperial Valley-06(2) | -0/83 |
| 3 | Imperial Valley-06(3) | 0/66 |
| 4 | Kobe, Japan | 17/76 |
| 5 | Landers | 2/47 |
| 6 | Loma Prieta (6) | -5/77 |
| 7 | Loma Prieta (7) | -8/54 |
| 8 | Morgan Hill | 8/59 |
| 9 | N. Palm Springs | -7/09 |
| 10 | Nahanni, Canada | -11/63 |
| 11 | ChiChi-Taiwan | 4/11 |
| 12 | Northridge-01(12) | 2/81 |
| 13 | Northridge-01(13) | 5/70 |
| 14 | Northridge-01(14) | 5/76 |

رفتار انعطاف پذیر جداسازهای اصطکاکی-لاستیکی، جابه جایی انعطاف پذیری جداساز، فقدان قابلیت بازگشت پذیری و مرکزگرایی در جداساز باعث می شود تا عرشه در نهایت در بسیاری از موارد به سر جای خود بازنگردد. اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی این پارامتر در شکل (18) نشان داده شده است.

برای نشان دادن تغییرات جابه جایی و نیروی برشی، نمودارهای نیرو-جابه جایی در دو حالت مورد بررسی برای نمونه در دو زلزله Imperial Valley-06(2) و Nahanni, Canada ارائه شده است.

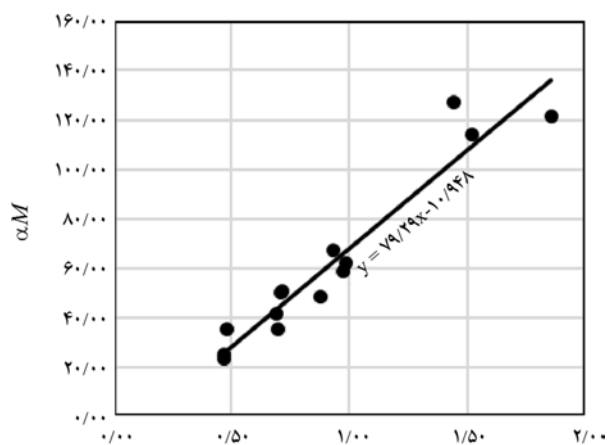
با توجه به اینکه جداساز مورد نظر، فاقد نیروی بازگرداننده و

انجام شده در 14 شتابنگاشت مورد بررسی در این پژوهش برای این سه پاسخ از پل جداسازی شده به طیف قائم زلزله وابسته است. به این ترتیب می توان گفت با افزایش شتاب طیفی مربوط به دوره تناوب مد ششم، مقادیر شاخص تحت بررسی نیز افزایش یافته اند. این افزایش به گونه ای است که تناسب بین شتاب طیفی و شاخصهای تحت بررسی مطابق شکل های (23) و (24) با تقریب قابل قبولی با یک رابطه خطی قابل برازش هستند.



شتاب طیفی در دوره تناوب مربوط به مد ششم در (g)

شکل (23): تغییرات α_R برای نیروی محوری ستون نسبت به مقادیر طیف شتاب قائم در 0/15 ثانیه



شتاب طیفی در دوره تناوب مربوط به مد ششم در (g)

شکل (24): تغییرات α_R برای لنگر وسط دهانه نسبت به مقادیر طیف شتاب قائم در 0/15 ثانیه

6- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت مؤلفه قائم زلزله در مناطق نزدیک گسل،

شتابنگاشتها بررسی شده است. در پل مورد بررسی در این پژوهش مد ششم، مد مؤثر بر ارتعاش قائم پل است که زمان تناوب آن 0/15 است. با مقایسه مقدار شتاب در این دوره تناوب با تعدادی از پاسخها ارتباط این مقادیر با پاسخها بررسی شده است. در جدول (10) مقادیر طیف شتاب قائم برحسب ضریبی از شتاب گرانش (g) در دوره تناوب 0/15 ثانیه آورده شده است.



شکل (22): مد ششم (مد قائم) با استفاده از نرم افزار OpenSees

جدول (10): مقدار شتاب طیفی (قائم) در 0/15 ثانیه

| زلزله | برحسب شتاب گرانش (g) | |
|-------------------|----------------------|----|
| Gazli, USSR | 1/85 | 1 |
| Imperial -06(2) | 0/48 | 2 |
| Imperial -06(3) | 0/47 | 3 |
| Kobe, Japan | 0/71 | 4 |
| Landers | 0/69 | 5 |
| Loma Prieta(6) | 0/72 | 6 |
| Loma Prieta(7) | 0/93 | 7 |
| Morgan Hill | 0/69 | 8 |
| N. Palm Springs | 0/98 | 9 |
| Nahanni, Canada | 1/44 | 10 |
| ChiChi-Taiwan | 0/47 | 11 |
| Northridge-01(12) | 0/88 | 12 |
| Northridge-01(13) | 1/5 | 13 |
| Northridge-01(14) | 0.98 | 14 |

تغییرات α_R برای سه پاسخ نیروی محوری ستون، لنگر وسط دهانه و جابه جایی قائم وسط دهانه نسبت به مقادیر طیف شتاب قائم در مد ششم در شکل های (23 و 23) نشان داده شده است. این نمودارها بیان می کنند که با افزایش مقدار شتاب در دوره تناوب 0/15، تأثیر مؤلفه قائم بر پاسخها افزایش یافته است. مقدار میانگین برای تغییرات α_R با رسم برازش خط در شکل های (23) و (24) نشان داده شده است.

در مجموع می توان بیان کرد که نتایج حاصل از تحلیل های

است و این موضوع، کم اهمیت بودن در نظرگیری این مؤلفه را در این پاسخ نشان می‌دهد.

- در بخش دوم، جابه‌جایی‌های ماندگار برای عرشه محاسبه و مقدار این جابه‌جایی برای زلزله‌های مختلف ارائه شد. بیشترین مقدار این پاسخ در حدود 29 سانتیمتر است که این مقدار جابه‌جایی می‌تواند برای عرشه پلها حائز اهمیت باشد. همچنین تغییر مکان ماندگار عرشه در زمانهایی که شتابنگاشت یک افزایش لحظه‌ای در مقادیر دارد، آغاز شده و این جابه‌جایی به محل اولیه بازگردانده نمی‌شود و باعث تغییر مکان ماندگار شده است.

در بخش دیگر تغییرات نیروی محوری ستون، لنگر وسط دهانه و جابه‌جایی قائم وسط دهانه نسبت به تغییرات میزان شتاب طیف قائم زلزله در دوره تناوب مد قائم پل جداسازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر سه پاسخ، با افزایش مقدار شتاب طیفی در مد قائم، نمودار روند افزایشی برای پارامتر α_R را نشان می‌دهد. در نتیجه، هر چه دوره تناوب قائم سازه بیشتر در محدوده بیشینه طیف قائم قرار داشته باشد، مقادیر پاسخهای حاصل افزایش می‌یابد و آثار مؤلفه قائم بیشتر خواهد بود

7- مراجع

1. Papazoglou, AJ., and Elnashai, AS. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 25, pp. 1109-1137.
2. Gloyd, S. (1997). Design of ordinary bridges for vertical seismic acceleration. Proc., FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities, Tech. Rep. No. NCEER-97-0010.
3. Kunnath, S, Abrahamson, N, Chai, YH., Erduran, E., and Yilmaz, Z. (2008). Development of guidelines for incorporation of vertical ground motion effects in seismic design of highway bridges [Technical report]. California department of transportation under contract 59A0434.
4. Rahai, A. and Arezoumandi, M. (October 12-17, 2008). Effect of vertical motion of earthquake on RC. Bridge Pier Proc. the 14th world conference on earthquake engineering. Beijing, China.
5. Goto, R. (2012). *Seismic performance of a bridge subjected to far-field ground motions by a Mw 9.0 earthquake and near-*

نادیده گرفتن آن در برخی از ضوابط طراحی و تحلیل پلها و تأثیر این مؤلفه بر عملکرد جداسازها، با طراحی جداساز اصطکاکی - لاستیکی با روش ارائه شده در راهنمای AASHTO پل دو دهانه 51 متری در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شد. همچنین با استفاده از مدل ارائه شده در تحقیق دائو برای در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به تغییرات نیروی قائم و سرعت لغزشی مدل‌سازی صحیح صورت پذیرفت. برای بررسی نتایج اثر مؤلفه قائم بر پل جداسازی شده، پاسخها در دو حالت بدون مؤلفه قائم و با مؤلفه قائم محاسبه گردید. نتایج حاصل از این بررسی عبارتند از:

- ستونها عضو قائم پلها هستند و مؤلفه قائم می‌تواند اثر قابل توجهی بر نیروی محوری آنها ایجاد کند. مؤلفه قائم زلزله تا 90%، مقادیر این پاسخ را تحت تأثیر قرار داده، باعث افزایش نیروی محوری ستونها شده است. این افزایش قابل توجه و نشان‌دهنده اهمیت در نظرگیری این مؤلفه در تحلیل و طراحی پایه‌هاست.

- درصد افزایش لنگر وسط دهانه قابل توجه است و می‌تواند بیش از دو برابر افزایش یابد و باید در طراحی عرشه پل در نظر گرفته شود.

- با توجه به طولی بودن دهانه‌های پلها، جابه‌جایی قائم وسط دهانه از مؤلفه قائم تأثیر قابل توجهی می‌پذیرد. افزایش دو برابری در مقدار جابه‌جایی وسط دهانه در این مقاله اهمیت در نظرگیری مؤلفه قائم بر این پاسخ را نشان می‌دهد.

- با توجه به تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر ضریب اصطکاک و وزن قائم اعمال شده، a_R برای نیروی برشی جداسازها در تمامی زلزله‌ها مقداری مثبت بوده که نشان‌دهنده تأثیر افزایشدهنده مؤلفه قائم بر این پاسخ است. همچنین با توجه به اینکه در طراحی جداساز لرزه‌ای از مؤلفه قائم صرف نظر شده و جداساز برای $\mu.m.g$ ثابتی طراحی می‌شود این نیرو می‌تواند در مواردی تا حدود 50% افزایش یابد. این افزایش به معنای آن است که نیروی بیشتری از زیر سازه به روسازه منتقل می‌شود و باید در روند طراحی در نظر گرفته شود.

- با توجه به تأثیر مؤلفه قائم بر عملکرد جداسازها، جابه‌جایی نسبی جداسازها نیز تحت مؤلفه قائم ارزیابی شد. α_R برای جابه‌جایی نسبی جداسازها در تعدادی از زلزله‌ها افزایش و در تعدادی دیگر کاهش را نشان می‌دهد. با این حال قدر مطلق این تغییرات کم

15. Jangid, R. S. (Feb. 2014). *Introduction to earthquake engineering*, Journals Related to Earthquake Engineering and Bureau of Indian Standard codes, IIT Bombay, India.
16. Kent, D. C., and Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *J. Struct. Div., ASCE*, 97(7), p.1969–1990.
17. Mazzoni, S, McKenna, F., Scott, MH., and Fenves, GL. (2006). *OpenSees command language manual, open system for earthquake engineering simulation* (OpenSees), 207-211.
18. Simo, J.C. and Hughes, T.J.R. (1998). *Computational inelasticity*. New York: Springer.
19. معاونت برنامه‌ریزی و راهبردی ریاست جمهوری. (1387). آیین‌نامه طرح پلهای راه و راه‌آهن در برابر زلزله [نشریه شماره 463]. تهران: مؤلف.
20. Cussen, R. (2002). *Analytical Modeling of Reinforced Concrete Bridge Assembly Using Opensees*, Home Institution: University of California, San Diego, Reu Institution: University of California, Berkeley, REU Advisor: Professor Stephen Mahin.
- SAP2000. Ver. 14.2.2. (2010). *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and structures user manual*. University of California at Berkeley.
- 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>.
- PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>
9. معاونت برنامه‌ریزی و راهبردی ریاست جمهوری. نقشه‌های همسان پلها و عرشه پلهای راه، دهانه 10 تا 25 متر. [نشریه شماره 294]. (1386). معاونت برنامه‌ریزی و راهبردی ریاست جمهوری. تهران: مؤلف.
10. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2010). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*. United States of America: AASHTO
11. معاونت برنامه‌ریزی و راهبردی ریاست جمهوری. (1389). راهنمای طراحی و اجرای جداساز لرزه‌ای در ساختمانها. [نشریه شماره 523]. تهران: مؤلف.
12. Dao, Nhan D., Keri, L., Ryan, Eiji Sato and Tomohiro Sasaki. (2013). Predicting the displacement of triple pendulum™ bearings in a full-scale shaking experiment using a three-dimensional element. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Earthquake Engng Struct. Dyn.* 42:1677–1695.
13. Mokha, A., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M. (1988). *Teflon bearings in aseismic base isolation: Experimental studies and Mathematical Modeling* Report Technical NCEER-88-0038. National Center for Earthquake Engineering Research. State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York.
14. Bowden, F.P., and Tabor, D. (1964). *The friction and lubrication of solids part II*. Clarendon Press, Oxford. United Kingdom.

Evaluation of Seismic Performance Indices of Rubber-Friction Bearings in an Isolated Highway Bridge under Near Fault Ground Motion

Afshin Kalantari

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: a.kalantari@iiees.ac.ir

Sayyed Amir Hossein Moayyedi

Graduate Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.

The past near fault seismic events demonstrate the important effect of vertical components on response of the highway bridges. Due to the high seismicity of the country and number of active faults near the major cities, the probability of occurrence of near-fault earthquakes with significant vertical component in such area is high. Most of the design codes and regulations neglect the vertical component of the event in base isolated structures or over-simplify it. In this research, to determine the effects of the vertical component of earthquakes on such a structure, a bridge model is analysed and designed using rubber-sliding bearings in series known as EDF isolators. The model was analysed once using two horizontal components and again using two horizontal and vertical components. The modelling and analysis was performed in Open Sees Software. Effects of variation of sliding velocity and input vertical component were included in coefficient of friction in sliding part of the model. Nonlinear dynamic time history analysis was carried out using near-fault records of 14 seismic events. The deck mid-span moment and deformation, axial force of the piers, and shear force and deformation of isolators have been calculated. It is shown that shear force, deformation and axial force of isolators increase when the vertical component of the ground motion is included. The results also show that the mentioned responses are acceptably approximated by linear regression with spectral value of the excitation at the frequency corresponding to the mode effective on vertical response of the structure.

Keywords: Seismic Base Isolation, Vertical Component, Time History Analysis, Highway Bridge.