فصلنامه آنالیز سازه- زلزله دوره ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶

پاسخ دینامیکی پل‌ها به حرکات زمین در نزدیکی گسل و با راستاداری پیشرونده

محمد حاجعلی

گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

عبدالرحیم جلالی*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

احمد ملکی

گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

jalali@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۶/۱۱/۱۴

چکیده:

در این تحقیق به بررسی عملکرد پل بتنی تحت بار دینامیکی زلزله در حوزه‌دور و نزدیک گسل پرداخته شده است. با توجه به اطلاعات موجود و نشان دادن اثرات عوامل و متغیرهای کلیدی حرکات زمین در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل، به عملکرد پل پرداخته شده است. مدل‌سازی یک پل دو دهانه به صورت سه بعدی در نرم‌افزار CSI Bridge صورت گرفته و برای بررسی قابلیت یک سازه تحت زلزله‌های نزدیک به یک گسل با زلزله‌های حوزه دور از گسل، مقایسه و بررسی گردید. تحلیل تاریخچه‌ی زمانی بر روی مدل‌های ایجاد شده و تحت ۷ رکورد از زلزله‌های گذشته در دو حالت دور و نزدیک به گسل، صورت گرفت که با بررسی رکورد زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل مشاهده شد که این زمین‌لرزه‌ها نسبت به زمین‌لرزه های دور از گسل تغییرمکان‌های شدیدی را تولید می‌کنند. پل‌های جداسازی شده با استفاده از جداگرهای لرزه‌ای، نسبت به زلزله‌های دور از گسل پاسخ بسیار مناسبی دارند. بدین معنی که با جدا نمودن این پل‌ها میزان شتاب وارده بر عرشه، برش پایه و همچنین جابه‌جایی نسبی عرشه نسبت به پل جدا نشده کاهش می‌یابد. این موضوع در پاسخ این پل‌ها نسبت به زلزله‌های نزدیک گسل دیده نمی‌شود. با بررسی رکورد زمین لرزه‌های نزدیک گسل مشاهده شد که این زمین لرزه‌ها نسبت به زمین لرزه‌های دور از گسل تغییرمکان‌های شدیدی را تولید می‌کنند که می‌تواند سیستم جداسازی را به شرایط بحرانی ببرد، لذا برای جلوگیری از این رخداد لازم است از سیستم مضاعفی (FDGM) جهت اصلاح پاسخ پل‌هایی که تحت این زمین لرزه‌ها قرار می‌گیرند، استفاده نمود. براساس نتایج بالا می‌توان بیان کرد که تغییر مکان‌ها در نزدیکی گسل و با اثر جهت پذیری پیش‌رونده بیشتر از حوزه‌های دور از گسل خواهد بود به طوری که برای نسبت‌های فاصله مختلف از گسل، هر چه مقدار این نسبت کمتر باشد، تغییر مکان حداکثر پایه‌های پل بیشتر و مقدار نیروی برش حداکثر نیز بیشتر خواهد بود.

کلید واژگان: پاسخ دینامیکی پل، حرکات زمین، حوزه دور و نزدیک گسل، راستاداری پیشرونده

۱-مقدمه

امروزه اثرات مخرب زلزله‌های نزدیک به گسل به خوبی شناخته شده‌است. تخریب پل‌ها در زلزله‌های نزدیک گسل به خوبی شناخته شده‌است. تخریب پل‌ها در زلزله‌های نزدیک گسل در سالیان اخیر نشان می‌دهد که در طراحی پل‌ها باید اثرات این نوع زلزله‌ها را در نظر گرفت. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع زلزله‌ها پدیده جهت‌داری می باشد. در رکوردهای سرعت زلزله‌های نزدیک گسل، عبارت از وجود سرعت‌های نموی بزرگ زمین است که در پی پالس‌های بلند مدت شتاب ایجاد می‌شود . نمودی از این اثرات به شکل ایجاد تغییر مکان های نوسانی بزرگ است که در رکورد تغییر مکان زمین نیز دیده می شود .وجود این مقادیر بزرگ در پارامتر های حرکات زمین در نزدیک گسل، مشخصه بارز رکوردهای زلزله ها نظیر زلزله نورتریج، زلزله کوبه، زلزله چی چی تایوان و برای زلزله‌های حوزه نزدیک گسل یا به بیان دیگر زلزله‌های با فاصله کم نسبت به گسل لرزه‌زا می باشند. هدف از این پژوهش استفاده از ارزش داده‌های اخیر حرکت زمین به منظور بهبود درک پاسخ بتن مسلح معمولی و پل بتنی پیش‌ساخته از حرکات زمین است. افزایش وضوح در مورد FDGM و پاسخ سازه‌ای به این نوع حرکت زمین به منافع مستقیم برای جوامع در نزدیکی گسل و معرض گسل در سراسر ایران منجر می‌شود و هم‌چنین در نتیجه در کاهش خطر لرزه‌ای حاصل و همچنین فرصت برای تخصیص منابع بهبود یافته می‌گردد.

پیشینه تحقیق

از جمله مهمترین کارهایی که توسط دانشمندان و محققان که به بررسی اثر زلزله‌های نزدیک گسل بر روی رفتار سازه‌ها انجام شده است می‌توان به بررسی رفتار ساختمانها در اثر حرکات زمین نزدیک منبع زلزله دارای ضربان که توسط برترو و آندرسون (۱۹۸۷) انجام شده است، اشاره کرد و همچنین لیو (۲۰۰۰) رفتار دینامیکی یک پل بتنی پنج دهنه را در اثر زلزله‌های نزدیک و دور از گسل بررسی کرده است.

اسمائیل پور(۱۳۹۱) به تحقیقی در خصوص بررسی لرزه‌های پایه های پل تحت اثر حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل پرداخت و در آن چند ستون پل با ارتفاعات متفاوت مدلسازی و رفتار دینامیکی این ستون‌ها ، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد تا در نهایت به پاسخ مناسبی در خصوص رفتار این ستون‌ها، تحت این نوع بارگذاری دست یافت. مطالعات صورت گرفته نشان داد که صدمات وارده به سازه‌ها از جمله پل‌ها علاوه برنواقص آیین‌نامه‌ای لرزه‌ای دارای مشکلات عمده ای در نحوه عملکردی بودند. در نتیجه موضوع اثرات زمین لرزه‌های نزدیک و دور از گسل بر روی رفتار اعضای پلها از جمله ستون‌ها و بررسی اثرات رفتار محلی این المان‌ها از جمله مواردی است که در حال حاضر به آن توجه ویژه‌ای نشان داده می‌شود.

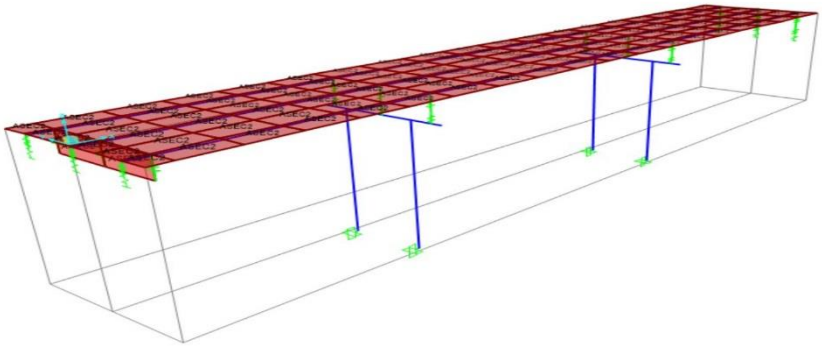
فقیهی‌نژاد (۱۳۹۲) به پژوهشی با عنوان بررسی کوبش عرشه‌های مجاور پل‌ها تحت حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل پرداخت و در آن عامل اصلی تخریب پل‌ها را کوبش بین عرشه‌های مجاور پل بیان می‌نماید که در زلزله‌های نزدیک گسل بسیار نمایانگر است. مدل ها به صورت سه بعدی و تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی هفت رکورد زلزله به روش اجزا محدود و با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 قرار داد و بر اساس نتایج تحقیق وی فرضیه کوبش بین عرشه‌های مجاور پل عامل اصلی تخریب پل اثبات گردید.

عرب (۱۳۹۴) به بررسی خود با عنوان آنالیز دینامیکی پل‌های تخت در اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک پرداخت و در آن اشاره کرد: در بررسی خرابی‌های به وقوع پیوسته در زلزله‌های گذشته خسارت‌های ناشی از زلزله نزدیک گسل یکی از مهمترین دلایل آسیب‌دیدگی پل‌های تخریب شده می‌باشد.

برنارد (۲۰۱۳) به پژوهشی با عنوان بررسی اعمال مولفه قائم زلزله بر پایه‌ها از طریق تکیه‌گاه‌ها در پل‌های بتن مسلح پرداخت و در این پژوهش به منظور بررسی اثر مولفه قائم زلزله بر رفتار لرزه‌ای پایه پل‌های بتنی، چهار سازه پل بتن‌مسلح سه دهانه با دهانه‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متر با عرشه جعبه‌ای و با جزئیات اجرایی متداول کشور مدل‌سازی و رفتار آن‌ها تحت اثر مولفه قائم زلزله، با اعمال ۷ شتابنگاشت مختلف به روش تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی، بررسی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که نیروی محوری موجود در ستون، به میزان قابل ملاحظه‌ای توسط حرکات قائم زمین‌لرزه تشدید شده به طوری که نیروی محوری ستون‌های پل به طور میانگین ۴۱٪ افزایش می‌یابد. همچنین میزان تغییرمکان پلاستیک حداکثر ستون‌ها که معرف تغیرمکان‌های ماندگار عضو است به طور میانگین ۳۵٪ افزایش یافته است. رافائل (۲۰۱۵) در بررسی خود با عنوان اثر زلزله‌های نزدیک گسل بر روی پل‌های طویل به نتایجی دست یافت که این نتایج بر روی پل کابلی طویل عابرگذر بوجود آمد و نتایج نشان داد که زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل وجود پالس در رکورد خود در قیاس با زلزله‌های حوزه ی دور می‌تواند باعث به وجود آمدن نیروها و جابجایی‌های بیشتری شود. رودریگز و کوفردر بررسی خود دربارهٔ پل‌های ۴۰۵ و ۵۲۰ واقع در واشینگتون ایالات متحده به نتایجی دست یافتند که بر اساس آن ممکن است آسیب لرزه‌ای قابل توجه‌ی رخ دهد اگر پاسخ سازه منظم با پریود پالس سرعت FDGM باشد. این پالس سرعت یک نتیجه از اثرات شکست گسل می‌باشد و زمانی رخ می‌دهد که لغزش و انتشار پارگی همزمان باشد. به عنوان یک نتیجه از این آسیب در یک پل با دوره متوسط ۰/۱ ثانیه تا ۱ ثانیه در زلزلهٔ حوزهٔ نزدیک اهمیت بیشتری نسبت به حوزهٔ دور دارا باشد که به دلیل تحلیل‌های MDOF و SDOF برای سه پل در نظر گرفته شده در تحقیق آنها نتایج آنها حاصل شد. همچنین نتایج آنها نشان داد وقوع PGA و یا PGV بالا تنها یکی از چندین شرایط است که اهمیت توجه بالا را در پل ایجاد می‌نماید.

اعتبار سنجی

اعتبار نتایج بر روی مدل تحقیق رودریگرز که در نرم‌افزار ABACUSE بر روی پل ۵۲۰ و ۴۰۵ واقع در شهر واشنگتن در ایالات متحده صورت پذیرفت با نرم‌افزار CSI BRIDGE صورت پذیرفت و نتایج بررسی با نتایج بررسی‌های رودریگرز مقایسه گردید. پل ۵۲۰ دارای پهنای عرشه بتنی ۱۱ متر و پهنای عبورگاه پل ۸/۵۰متر می‌باشد. سیستم عرشه به صورت مقطع بتنی جعبه‌ای با شاه‌تیرهای پس‌تنیده است. ارتفاع ستون‌های میانی ۸ متر در نظر گرفته می‌شود و ستون‌ها در انتهای فوقانی به صورت گیردار به عرشه متصل می‌شوند و در انتهای تحتانی نیز متکی بر پی‌های صلب و به صورت گیردار فرض می‌شوند و از اندرکنش خاک و سازه صرف‌نظرمی‌شود.



شکل۱- پل بتنی SR520 با عرشه تیر جعبه‌ای(پیش‌تنیده)

با توجه به نتایج تحقیق رودریگرز و کوفر، اعتبار نتایج خود را بررسی می‌کنیم. در بررسی آنها روی پل ۵۲۰ را انتخاب و جواب‌های موجود در تحقیق آنها با نتایج خود مقایسه شد تا اعتبار جواب‌های نرم‌افزار به اثبات رسد.

جدول ۱- نتایج فرکانس پل ۵۲۰ در تحقیق رودریگرز

Eigenvalue Output					
Mode No	Eigenvalue	Frequency		Generalized Mass	Governing DOF
		(Rad/Time)	(Cycles/Time)		
1	۶۱/۸۸	۷/۸۶۶۴	۱/252	۴/36E+05	X-Component
2	۸۶۹/۶۹	۲۹/۴۹۱	۱/6936	۱/01E+07	X,Z-Rotation
3	۱۲۳۷/۸	۳۵/۱۸۲	۵/5994	92E+05۹/	X,Z-Rotation
4	۱۴۳۴/۸	۳۷/۸۷۹	۶/0287	۲/46E+05	Y-Component
5	۱۸۴۴/۵	۴۲/۹۸۴	۶/8354	۱/28E+07	
6	۳۱۶۳/۸	۵۶/۲۴۸	۸/9522	97266	

جدول نتایج بررسی و مدلسازی پل ۵۲۰ در نرم‌افزار CSI BRIDGE
در جداول (۲) بدست آمده است.

جدول ۲- نتایج فرکانس پل ۵۲۰ در برنامه CSI BRIDGE

Eigenvalue Output					
Mode No	Eigenvalue	Frequency		Generalized Mass	Governing DOF
		(Rad/Time)	(Cycles/Time)		
1	۶۱/87956823	۷/856785792	۱/250675382	۴/36E+05	X-Component
2	۸۶۹/6893574	۲۹/48984545	۴/4.693564259	۱/01E+07	X,Z-Rotation
3	۱۲۳۷/784328	۳۵/09757523	۵/585619951	92E+059/	X,Z-Rotation
4	۱۴۳۴/781138	۳۷/8789365	۶/012956351	۲/46E+05	Y-Component
5	۱۸۴۴/46034	۴۲/98505857	۶/854311111	۱/28E+07	
6	۳۱۶۳/778132	۵۶/23697036	۸/946752098	97266	

طبق نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر برای پل ۵۲۰ در شهر واشنگتن ایالات متحده تحت شتاب‌نگاشت Moquegua تحلیل و اعتبار نتایج حاصل از مدلسازی در برنامه CSI Bridge صورت گرفته که با نمودار تحقیق رودریگز که با نرم افزار ABAQUS تحلیل نمودند، منطبق می باشد از طرفی جدول (۲) نیز حاصل از تحلیل پل ۵۲۰ می‌باشد که در T=0/8sec فرکانسی برابر ۱/۲۵ در هر دو نرم‌افزار بدست آمده که تطابق نتایج صحت نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار CSI BRIDGE اثبات می‌شود.

مواد و روش‌ها

شتاب نگاشت‌هایی که برای تحلیل در نرم‌افزار بکارگیری شدند در اشکال زیر ارائه شدند. همچنین به دو روش برای بهسازی پل اشاره می‌شود که عبارتند از:

۱- استفاده از میراگرهای الحاقی در پل‌ها

۲- استفاده از جداگرهای لرزه‌ای در پل‌ها

جدول ۳- مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

ردیف	رکورد انتخابی	زمان وقوع زلزله	ایستگاه	بزرگی زلزله	فاصله از گسل(کیلومتر)	بیشینه شتاب			نسبت V/H
						طولی	عرضی	قائم	
۱	Sun Valley	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	Northridge	۶/۷	۱۰/۰۵	۰/۳۴۴	۰/۳۰۸	۰/۵۲۲	۱/۶۰۵
۲	بم	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	bam	۶/۶	کمتر از یک	۰/۸۱۵	۰/۶۴۹	۱/۰۰۸	۱/۲۳۷
۳	imperial valley	۱۹۷۹/۰۶/۲۰	bam	۷/۳۷	۱۲/۵۶	۰/۵۱۵	۰/۴۹۶	۰/۵۳۸	۱/۰۴۵
۴	چی‌چی	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	CHY080	۷/۶	۲۰/۹۵	۰/۹۶۸	۰/۹۰۲	۰/۷۲۴	۰/۷۴۸
۵	moqorogue	۱۹۹۸/۱۱/۰۴	PERU	۸/۴	۲۱/۲۲	۰/۶۶۸	۰/۵۸۵	۰/۶۹۶	۱/۰۴۲
۶	Northridge	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	Artela	۶/۷	۱۲/۲۲۵	۰/۳۵۵	۰/۳۱۸	۰/۵۱۵	۱/۴۵۰

مدلسازی

در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای سه مدل پل دارای مشخصات سازه‌ای ذیل مشابه ولی با شرایط مختلف، در نرم افزار CSI BRIDGE مورد بررسی قرار گرفت. پل اول پلی ساده، پل دوم همان مشخصات پل اول را دارد با این تفاوت که تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های آن توسط جداسازهای لرزه‌ای (LRB) جداسازی شده‌اند. پل سوم علاوه بر مشخصات پل دوم، دارای میراگرهای الحاقی بر روی کوله‌ها می‌باشد. هرکدام از این پل‌ها تحت شش زلزله دور و نزدیک گسل تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی شدند (۳ زلزله در شرایط خاک نرم و ۳ زلزله در خاک سخت). پل اول پلی ساده و بدون جداساز لرزه‌ای و میراگر الحاقی بود، پل دوم بر مبنای پل اول بوده با این تغییر که جداگرهای لرزه‌ای در بالای هر پایه (بین پایه و عرشه) و همچنین در محل تکیه‌گاه‌های ابتدایی و انتهایی پل قرار گرفتند که جمعاً ۱۰ جداگر در مدل مورد استفاده قرار گرفت. و پل سوم نیز مبتنی بر پل دوم بود که در تکیه‌گاه‌های ابتدایی و انتهایی آن علاوه بر جداگرهای لرزه‌ای، شامل میراگرهای الحاقی نیز شد که جمعاً شش میراگر به تکیه‌گاه‌های آن اعمال شد.

جدول۴- اطلاعات پل مورد مطالعه

مشخصات کلی پل	پل بتنی دو دهانه با پایه‌های چند ستونه
طول کلی پل	۶۰ متر
طول هر یک از قسمت‌های عرشه	۱۱متر
عرض عرشه	۸/۵۷ متر
عمق عرشه	متغیر از ۰/۹۱ تا ۱/۲ متر
تعداد و عمق آزاد هر یک از ستون‌های پایه	سه ستون هر یک به ارتفاع ۹ متر
ابعاد و مشخصات ستون‌ها	ستون‌های مستطیلی با طول ۱/۲۲ متر و عرض ۱/۲۲ متر
طول تیر سرستون	۷ متر
جزئیات تکیه‌گاه‌ها در محل فونداسیون ستون‌ها	شرایط گیرداری فرض شده‌است
اتصال عرشه به کوله‌ها	به صورت مفصلی مدل شده‌است
اتصال عرشه به پایه‌ها	به صورت گیردار مدل شده‌است
بتن مصرفی در تیرهای پیش‌ساخته	300MPa
بتن مصرفی در پایه و کلیه اعضای کوله	250MPa
بتن مصرفی در سایر اجزا روسازه	250MPa

مدل‌سازی پل‌های جداسازی شده

برای مدل‌سازی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی پل‌های جداسازی شده از نرم‌افزار CSI BRIDGE استفاده شده است. روش FD یک روش بسیار موثر و کارآمد می‌باشداین نرم‌افزار توسط Naeim و Kelly به‌عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند در آنالیز دینامیکی سازه‌هایی که دارای المان‌های غیرخطی موضعی می‌باشند، معرفی شده است. چون طبق توصیه آیین‌نامه‌ها فرض بر این است که المان‌های روسازه و زیرسازه در پل‌های جداسازی شده در محدوده خطی باقی بمانند، بنابراین در تحلیل ها، المان‌های زیرسازه یعنی پایه‌ها با استفاده از المان Frame و المان روسازه یعنی شاهتیرهای طولی و دیافراگم‌های عرضی عرشه نیز توسط المان Frame و المان عرشه پل نیز توسط المان Shell مدل شده‌اند که تمام این المان‌ها دارای رفتار خطی می‌باشند. برای مدل‌سازی المان-های جداگر از المان‌های غیرخطی Nllink استفاده شده است که بر حسب نوع جداگر از المان‌های Isolator 1 (rubber isolator) و Isolator 2 (sliding isolator) به ترتیب برای مدل کردن جداگرهای لاستیکی- سربی و جداگرهای پاندولی اصطکاکی استفاده شده است که این المان‌ها در حین یک آنالیز تاریخچه زمانی قادر به ارائه رفتار غیرخطی از خود می‌باشند. برای مدل‌سازی روسازه و زیرسازه پل جداسازی نشده از همان المان‌های Frame و Shell استفاده شده است. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده برابر همان شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده حالت جداسازی شده می‌باشد؛ علت این کار این است که اگرچه روش مقیاس کردن شتاب‌نگاشت در حالت جداسازی نشده، طبق آیین‌نامه آشتو اندکی با حالت جداسازی شده متفاوت می‌باشد، ولی چون در اینجا هدف مقایسه نتایج بوده و قصد طراحی پل وجود ندارد، همان شتاب‌نگاشته‌های حالت جداسازی شده به‌پل‌های جداسازی نشده اعمال شده است.

طراحی هسته سربی: مقاومت تسلیم هسته سربی را برابر $f_{py} = 8.82\ MN/m^2$ فرض کنید. مساحت سطح مقطع مورد نیاز سربی برابر است با:

$$A_p = \frac{Q_d}{f_{py}} = \frac{28.6}{8.82\times10^3} = 0.325\times10^{-2} = 32.5\ cm^2$$

از قطر ۷ سانتی‌متر استفاده می‌کنیم.

۲. طراحی سطح مقطع و ابعاد لایه‌های لاستیک:

۲,۱. ارتفاع کلی لایه‌های لاستیک:

$$t_r = D_D/\gamma_{max} = \frac{0.21}{0.5} = 0.42\ m$$

۲,۲. مشخصات لاستیک را انتخاب می‌کنیم. سختی لاستیک را برابر IRHD-60 و کشیدگی لاستیک را برابر $\varepsilon_b = 500\%$ درنظر می‌گیریم. مشخصات مصالح که به دست می‌آید به صورت زیر می‌باشد:

$$E = 448\frac{N}{cm^2} = 4.45\ MN/m^2$$

$$G = \frac{106N}{cm^2} = 1.06\ MN/m^2$$

$$k = 0.57$$

مدل‌سازی جداگرهای لرزه‌ای

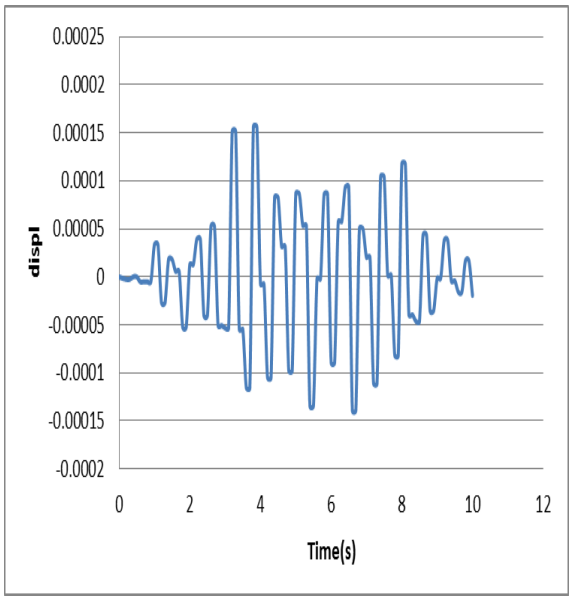
برای مدل‌کردن جداگرها از المان‌های غیرخطی Nlink استفاده می‌شود که چون جداگر به‌صورت الاستومتری درنظر گرفته شده، در مدل جداگرها از المان rubber isolator استفاده گردیده است.

مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها

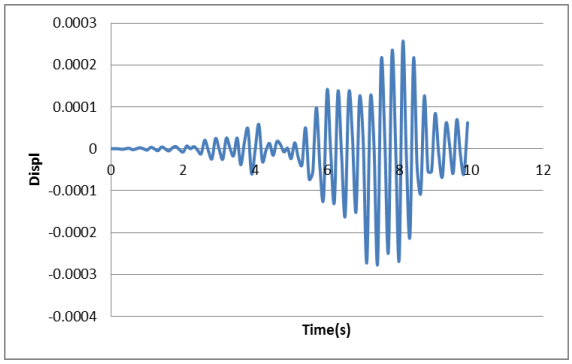
نحوه مقیاس کردن به این صورت است که برای هر زلزله، طیف پاسخ با ۵ درصد میرایی هر دو مولفه افقی آن تهیه می‌شود. سپس طیف (SRSS) برای آن زلزله با در نظر گرفتن جذر مجموع مربعات طیف های دو مولفه عمود بر هم ساخته می‌شود. سپس یک طیف با متوسط گیری از طیف‌های (SRSS) تمام زلزله‌های مستقل تشکیل داده می-شود. این طیف به گونه‌ای مقیاس می‌شود که در محدوده ۰/۵Teff تا ۱/۵Teff از ۱/۳ برابر طیف پایه طرح با میرایی ۵ درصد (مطابق آیین-نامه آشتو با شتاب موثر ۰/۴g و خاک نوع دو) کمتر نشود.

نتایج:

در بررسی موضوع اصلی تحقیق که اثر زلزله‌های حوزهٔ دور و نزدیک بر پل مورد مطالعه می‌باشد نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای جابجایی پل در حوزهٔ نزدیک به صورت شکل (۱۰) می‌باشد.



شکل ۲- نمودار جابجایی بر حسب زمان برای زلزله حوزه نزدیک از گسل

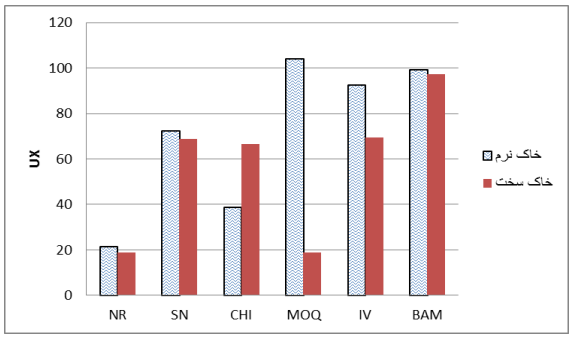


شکل ۳- نمودار جابجایی بر حسب زمان برای زلزله حوزه دور از گسل

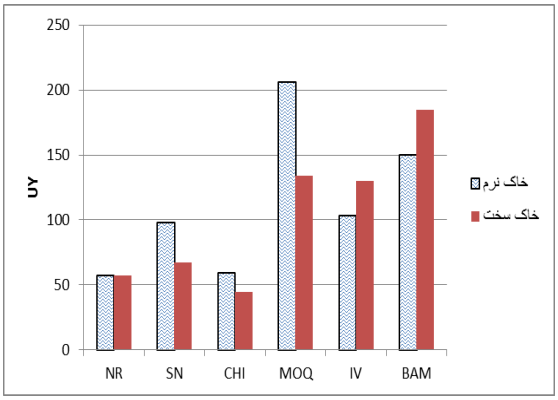
جهت محاسبه شتاب وارد بر عرشه، نقطه‌ای روی سطح فوقانی عرشه که دقیقاً بر روی جداگر قرار داشته باشد را انتخاب نمودیم (Joint 345). شتاب وارد بر این نقطه را در هر دو جهت افقی (Ux , Uy) مورد بررسی قرار دادیم.

جدول ۵-نتایج زلزله‌های دور و نزدیک از لحاظ جابجایی‌های افقی و قائم در پل ساده

	خاک نرم			خاک سخت	
	UX	UY		UX	UY
NR	۲۲۱/	۳۵۷/	NR	۸۶۸/	۲۵۷/
SN	۴۷۲/	۹۹۷/	SN	۴۶۶/	67
CHI	۷۳۸/	59	CHI	۸۱۸/	۶۴۴/
MOQ	104	206	MOQ	۳۹۷/	134
IV	۵۹۲/	103	IV	۳۶۹/	130
BAM	۳۹۹/	150	BAM	137	185



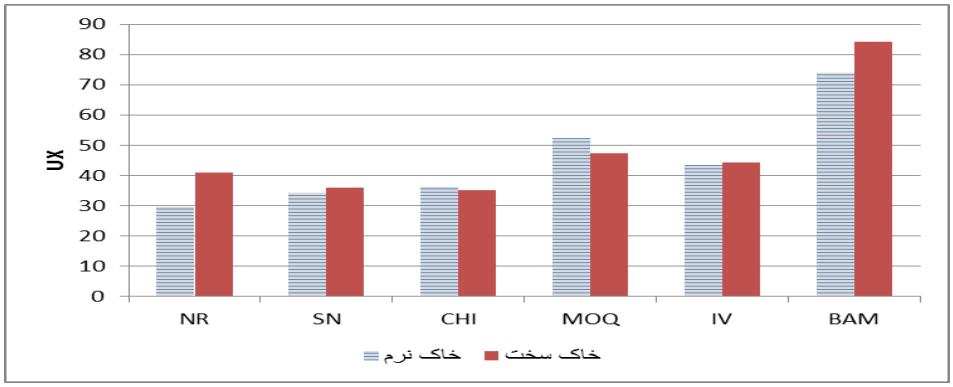
شکل ۴- مقایسهٔ جابجایی افقی در پل ساده در خاک‌های سخت و نرم



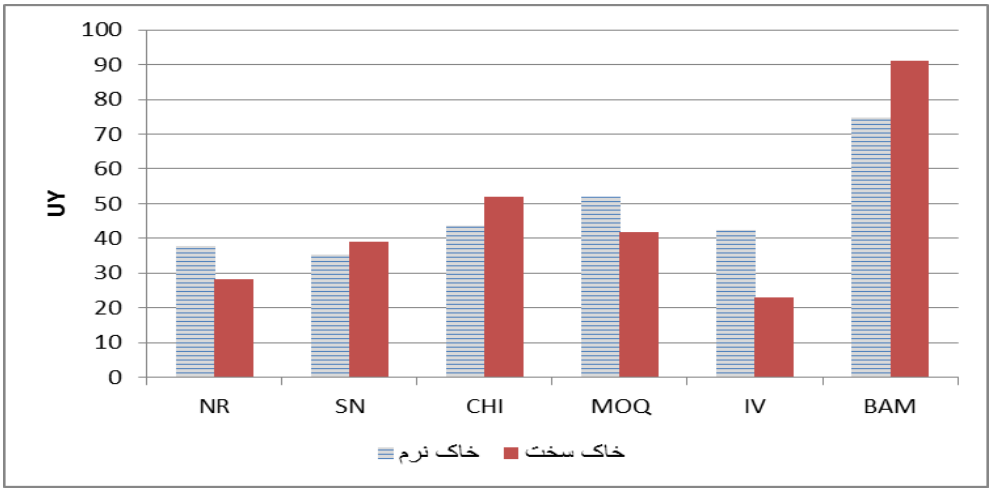
شکل ۵- مقایسهٔ جابجایی قائم در پل ساده در خاک‌های سخت و نرم

جدول ۶- نتایج زلزله‌های دور و نزدیک از لحاظ جابجایی‌های افقی و قائم در پل با جداساز

	خاک نرم			خاک سخت	
	UX	UY		UX	UY
NR	۲۹/۵	۳۷/۶	NR	41	۲۸/۱
SN	۳۴/۲	۳۵/۳	SN	36	39
CHI	۳۶/۱	۴۳/۵	CHI	35	۵۲/۱
MOQ	۵۲/۲	52	MOQ	۷۴/۴	۴۱/۸
IV	۳۴/۴	۴۲/۵	IV	۴۴/۴	23
BAM	74	۷۴/۸	BAM	۸۴/۲	۹۱/۲



شکل ۶- مقایسهٔ جابجایی افقی در پل با جداساز در خاک‌های سخت و نرم

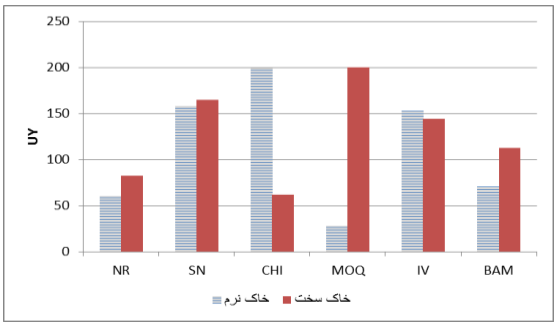


شکل ۷-مقایسهٔ جابجایی قائم در پل با جداساز در خاک‌های سخت و نرم

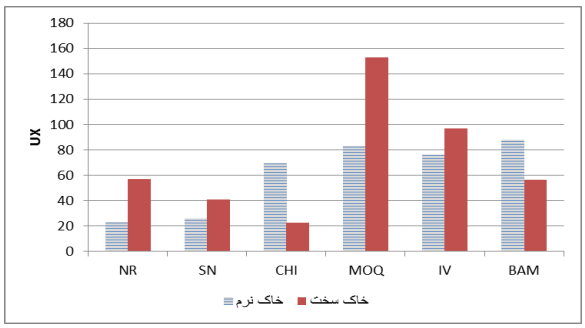
جدول ۷- نتایج زلزله‌های دور و نزدیک از لحاظ جابجایی‌های افقی و قائم در پل با جداساز و میراگر

خاک نرم			خاک سخت		
	UX	**UY**		**UX**	**UY**
NR	۲۳/۱	۶۰/۱	NR	۵۶/۹	۸۲/۵
SN	26	158	SN	۴۰/۷	165
CHI	۶۹/۶	199	CHI	۲۲/۳	۶۲/۳
MOQ	۸۲/۹	28	MOQ	153	200
IV	76	153	IV	۹۶/۷	144
BAM	۸۷/۸	۷۰/۳	BAM	۵۶/۳	113

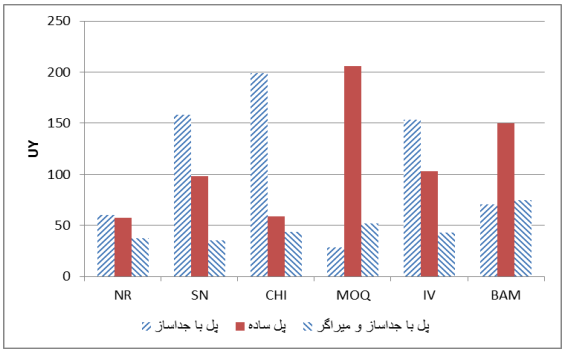
شکل زیر مقایسهٔ جابجایی قائم و افقی را در پل با جداساز و میراگر نشان می‌دهد.



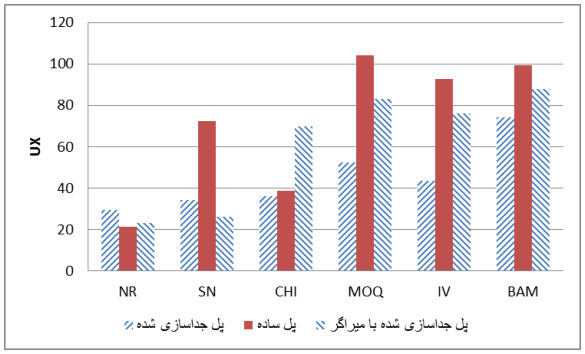
شکل۸- مقایسهٔ جابجایی قائم



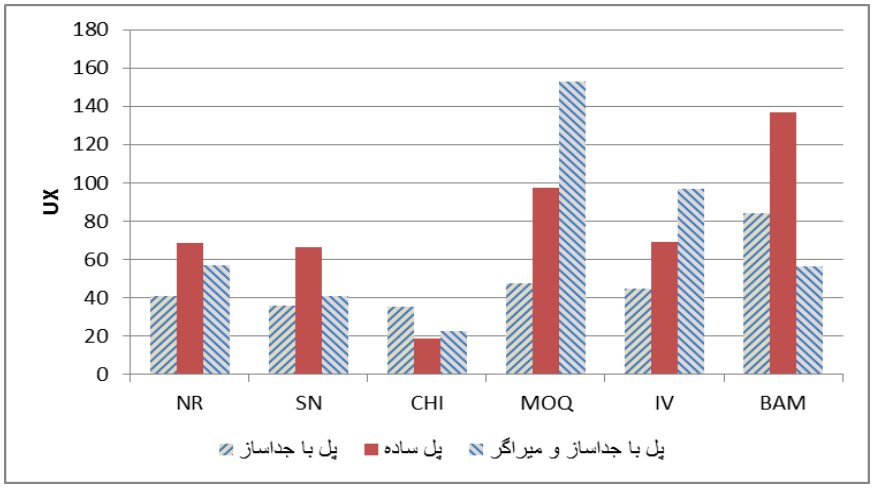
شکل ۹-مقایسهٔ جابجایی افقی



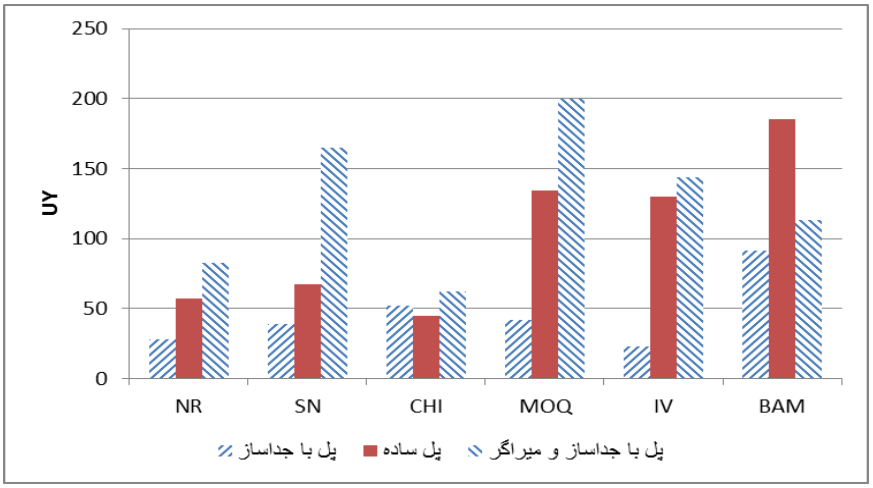
شکل ۱۰- جابجایی افقی در خاک نرم



شکل ۱۱- جابجایی قائم در خاک نرم



شکل ۱۲- مقایسهٔ سه مدل ساده، با جداساز و با میراگر در جابجایی افقی در خاک سخت



شکل ۱۳- مقایسهٔ سه مدل ساده، با جداساز و با میراگر در جابجایی قائم در خاک سخت

با استفاده از جداول و نمودارهای بدست آمده چنین برداشت می‌شود که استفاده از میراگرو جداگرهای لرزه‌ای در صورتی که خاک زیر پل سخت باشد از لحاظ جابجایی افقی و قائم نتیجهٔ مناسبی حاصل نمی‌شود و نیاز به بررسی های بیشتر در این زمینه می‌باشد ولی در خاک های نرم استفاده از میراگر و جداساز به طور میانگین نتیجهٔ مناسبی از لحاظ کاهش جابجایی بدست آمده است.

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج حاصله حاکی از آن است که اثرات زلزله‌های حوزهٔ نزدیک بر جابجایی سازه نسبت به حوزهٔ دور بیشتر می‌باشد که این اختلاف قابل ملاحظه و چشمگیر می‌باشد که اثرات زلزله‌های حوزهٔ نزدیک به گسل بر پارامترهای لرزه‌ای مخرب تر از حوزهٔ دور می‌باشد.

هرچه سختی اولیه و نیروی تسلیم جداگر افزایش یابد، سختی موثر کل سازه افزایش و دوره تناوب موثر پل کاهش می‌یابد. بدین ترتیب با هندسه یکسان، می‌توان تعداد یا ضخامت لایه‌های لاستیک را کاهش داد و جابه‌جایی طرح، هم از روش بار یکنواخت و هم از روش تحلیل تاریخچه زمانی کاهش می‌یابد، اما ابعاد جداگر در پلان نیز افزایش می‌یابد که این امر موجب کاهش کرنش برشی جداگر می‌شود.

در پل‌هایی که سختی جانبی پایه‌های میانی در آن‌ها به نسبت کمتر است (ارتفاع ستون‌ها زیاد است) میزان کاهش نیروی برشی در پایه‌های میانی در حالت‌های جداسازی شده نسبت به حالت معمولی کمتر از پل های دیگر است. علت این است که نقش جداسازی لرزه‌ای در این پل‌ها توازن پاسخ نیرو بین اجزای مختلف زیرسازه می‌باشد، بنابراین در این پل‌ها با کاهش قابل ملاحظه نیروی برشی در کوله‌ها ناشی از کاهش زیاد برش پایه مواجه می‌شویم.

هرچقدر سختی اولیه جداگرها افزایش یابد، نیروی برشی تولید شده در آن‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه جابه‌جایی حداکثر آن‌ها افزایش می‌یابد، که منجر به افزایش جابه‌جایی جانبی کل عرشه می‌شود، بنابراین با توجه به محدودیت در جابه‌جایی حداکثر عرشه، می‌بایست از جداگری با سختی اولیه مناسب استفاده نمود.

هرچه نسبت سختی ثانویه به اولیه افزایش یابد، با سختی اولیه یکسان، حداکثر تغییرمکان جداگرها غالباً کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان جابه جایی‌ها را کنترل نمود ولی در مقابل نیروی برشی تولید شده در جداگرها افزایش می‌یابد، در نتیجه نیروی برشی تولید شده در اجزای زیرسازه و به تبع آن برش پایه افزایش می‌یابد. هرچه سختی اولیه جداگر بیشتر باشد، این افزایش بیشتر خواهد بود.

با افزایش نیروی تسلیم جداگرها، نسبت میرایی ویسکوز معادل بر اساس روش بار یکنواخت آشتو افزایش می‌یابد، اما با افزایش سختی اولیه جداگر، این نسبت لزوماً افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در نیروی تسلیم پایین اگر سختی اولیه افزایش یابد، این نسبت کاهش می‌یابد ولی در نیروی تسلیم بالا، با افزایش سختی اولیه نسبت میرایی نیز افزایش می‌یابد. هرچه سختی پس از جاری شدن یک جداگر افزایش یابد، سختی موثر کل پل افزایش یافته ولی دوره تناوب موثر پل و نسبت میرایی ویسکوز معادل جداگر کاهش می‌یابد؛ پس هرچه رفتار دوخطی جداگر به سمت حالت الاستوپلاستیک کامل برود، بازده آن بیشتر خواهد بود. بر اساس تقسیم بندی آیین‌نامه یوروکد جداگرهای طراحی شده جزو گروه جداگرهای لاستیکی با میرایی زیاد قرار می‌گیرند. زیرا نسبت میرایی ویسکوز معادل آن‌ها عمدتاً بین ۰/۱۵ تا ۰/۲ (۱۵٪ تا ۲۰٪) می‌باشد.

با افزایش تعداد جداگرها، نیروها و بارهای وارده بر هر واحد جداگر کاهش می‌یابد، پس ابعاد هندسی آن کاهش می‌یابد؛ اما نکته قابل توجه آن است که با افزایش تعداد جداگر در پل، سختی موثر کل نیز افزایش می‌یابد که خود باعث کاهش دوره تناوب موثر پل جداسازی شده می شود، با اعمال جداگرهای لرزه‌ای پاسخ‌های جابه‌جایی کل سازه به‌خاطر جابه‌جایی‌های غیر الاستیک جداگرها افزایش می‌یابد.

در حالت پل معمولی یا جداسازی نشده، شکل اصلی ارتعاشی پل عمدتاً مود حرکت قائم عرشه می‌باشد. هرقدر سختی جانبی (عرضی) عرشه پل بیشتر باشد، این شکل ارتعاش پل در مودهای بیشتری به چشم می‌خورد.

با افزایش سختی اولیه جداگرها دوره تناوب اصلی سازه که در حالت جداسازی شده همان مود انتقال جانبی می‌باشد، کاهش می‌یابد؛ بنابراین برش پایه سازه افزایش می‌یابد و به برش پایه حالت جداسازی نشده نزدیک مش‌شود.

با افزایش پریود سازه، میزان اتلاف بین پاسخ مناطق حوزه نزدیک و دور به شدت افزایش می‌یابد. در خصوص پل‌ها می‌توان گفت که اگر پل دارای پایه‌های با اتفاع بلند بوده و در منطقه نزدیک گسل ساخته شود باید طول نشیمن عرشه پل برای جابه‌جایی‌های ایجاد شده به اندازه کافی بزرگ باشد.

در ساختمان با پریود ۱/۸۵ ثانیه در فواصل دور از گسل (بیش از ۱۵ کیلومتر) حداکثر تغییرمکان ساختمان کاهش می‌یابد و این موضوع را می‌توان به نوعی در پل‌های با پریود طبیعی ۲ ثانیه نیز مشاهده نمود. یعنی در پل‌ها و ساختمان‌های با پریود بلند، با افزایش فاصله از گسل حداکثر جابه‌جایی کاهش می‌یابد. لذا می‌توان گفت که تغیرمکان‌های سازه‌های با پریودهای بلند (حدود ۲ثانیه) در نزدیک گسل لرزه‌زا نسبت به تغییرمکان همان سازه‌ها در فواصل دور از گسل بیشتر است، که این امر می‌تواند ناشی از نزدیکی پریود ساختمان و پل مورد بحث به پریود رکورد زلزله حوزه نزدیک دانست.

نگاشت‌های نزدیک گسل دارای مدت زمان اثر کمتری نسبت به نگاشت‌های دور از گسل هستند و در نگاشت‌های سرعت در نزدیک گسل، یک یا چند پالس ضربه‌ای با دامنه بزرگ و دوره تناوب زیاد وجود دارد که موجب افزایش نیاز شکل‌پذیری سازه‌های صلب در زلزله‌های نزدیک گسل میشود. همچنین افزایش نسبت پریود پالس حرکتی زمین به پریود طبیعی سازه و نیز افزایش نسبت شتاب زمین به مقاومت تسلیم سازه، موجب افزایش پاسخ غیرخطی و خسارت وارده به سازه می‌شود و تمرکز تغییرشکل‌ها در طبقات پایین ساختمان موجب اعمال اثر P-Δ در طبقات پایین می‌گردد.

در پل‌ها با افزایش فاصله از گسل، تغییرمکان‌های حداکثر کاهش می‌یابد و بطور مشابه در سدهای خاکی همگن دارای ارتفاع بلند، با افزایش فاصله از گسل شتاب حداکثر در تاج سد کاهش می‌یابد.

سازه‌های مهندسی با پریود طبیعی نزدیک به هم رفتاری مشابه را در اثر اعمال زلزله‌های حوزه نزدیک گسل و حوزه دور از گسل از خود نشان می‌دهند. یکی از عوامل موثر بر رفتار سازه‌ها در زلزله، نزدیکی پریود سازه و پریود شتاب زلزله است.

مراجع:

[1] Papageorgiou, A. S., (2014)"The Charactrr of Near Source Ground Motion and Related Seismic Design Issues", *Proc. of the Structural Engineers World Congress, San Francisco, California,pp:18-23*.

[2] Anderson, J. C, BertroV. V., (1987) "Uncertainties in Establishing Design Earthquake" *J. Sbrch. Eng. ASCE* **113** (8): 1709-1724

[3] Lio W.I, Loh. C. H, Wan. S., Jean. W.Y, & chai J.F., (2000) "Dynamic Responses of Bridges Subjected to near fault Ground Motins". *Journal of the Chinese Institute of engineers.* **23** *(3) 455-464*

[۴] فقیهی‌نژاد، فریده، ۱۳۹۲، بررسی کوبش عرشه‌های مجاور پل‌ها تحت حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، مؤسسه‌های آموزش عالی غیردولتی-غیرانتفاعی، دانشگاه علم و فرهنگ تهران، دانشکده مهندسی عمران، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

[۵] اسماعیل پور، میترا، ۱۳۹۱، بررسی لرزه‌های پایه‌های پل تحت اثر حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی و غیر دولتی شمال – آمل – دانشکده فنی ، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد.

[۶] عرب، محمدرضا، ۱۳۹۴، آنالیز دینامیکی پلهای تخت در اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، دانشگاه آزاد شاهرود، دانشکده فنی مهندسی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد.

[۷] مهدی جمارانیان، (۱۳۹۴) "بررسی اثر شرایط ساختگاهی بر بیشینه شتاب سطح زمین در حوزه نزدیک" پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، گرایش خاک و پی دانشگاه تهران

[8] Hansen, J. B.2015, "Evaluation of seismic shear capacity of concrete bridges by stimulating demand and near earthquake faults", Danish Earthquake Institute, Copenhagen, Bul., No. 28, 2015.

[9] Rafael Cerqueira Silva,2015, Near earthquake faults on long bridges, Volume 191, 29 May 2015, Pages 48-60

[10] Bernard, 2013, Investigate the actions of the vertical component based on the restraints in reinforced concrete bridges , Construction and Building Materials, Volume 41, April 2013, Pages 857-867]

[11] Priestly, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G. M .(1996). Seismic design and retrofit of bridges", John Wiley and Sons, New York.

[12] Malhotra P.K., (2012) "Response of Building to Near-field Pulse Like Ground Motion". *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* **28***:1309-1326.*

[13] CHAI J., TENG T., LIAO W. (2014) "Numerical Simulation of Near-Fault Ground Motions and Induced Structural Responces", *13th World Conf.on Earthquake Engineering*, Paper No.3309.
[14] Cofer.W, Rodriguez-Marek.A, 2007, DYNAMIC RESPONSE OF BRIDGES TO NEAR-FAULT, FORWARD DIRECTIVITY GROUND MOTIONS, Washington State Transportation Center (TRAC), Washington State University, Pullman, WA 99164-2910

Dynamic Response of Bridges to Near and Far Fault, Forward Directivity Ground Motions

Mohammad Hajali
Department of civil engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran
Abdolrahim Jalali*
Department of engineering, tabriz University, tabriz, Iran
Ahmad Maleki
Department of engineering, Maragheh Islamic Azad University, Maragheh, Iran
jalali@tabrizu.ac.ir

Abstract:

In this study, we assessed the performance of a concrete bridge under the dynamic strain of an earthquake in the near and far domain of earth's faults. With respect to available data and showing the effects of key factors and variables, we have examined the bridge's performance. The modelling of a double span bridge has been done in CSI Bridge software and has been compared and examined to assess the capability of a bridge under the strain of a close-to-fault-line earthquake and a far-from-fault-line earthquake. Timeline interpretation was done on the resulting models and from 7 records from the past earthquakes and it was observed that the close to fault line earthquakes caused much bigger displacements when compared to far from fault line earthquakes. Bridges which are separated by a quake separator, have an acceptable response to far from fault line earthquakes. This means that by disassembling these bridges, the acceleration rate on the deck, the cut of the base, as well as the relative displacement of the deck relative to the undivided bridge, is reduced. This issue is not reflected in the response of the bridges to faults near earthquakes. By investigating the record of near-earthquakes, it was observed that these earthquakes produced large displacements to earthquakes that are far from faults, which could make the isolation system more critical, so, to avoid this event, it FDGM should be used to reform the response these bridges have to the earthquake.

Based on these results, it can be stated that the displacements near the fault and with the effect of progressive movement will be greater than the distances from the fault, so that for the ratio of different distances from the fault, the lower this ratio is, the maximum displacement of the bridge and the maximum cutting force will also be greater.

Keywords: The dynamic response of the bridge, ground motions, the near and far field of the fault, forward directivity

.