



ارزیابی اثر زلزله های حوزه نزدیک بر رفتار لرزه ای پل های متحرک تاشو

محمدحسین تقوی پارسا*، علی آهنی^۲

۱- دانشکده عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

تحلیل تاریخچه زمانی

پل تاشو

تحلیل لرزه ای،

زلزله های حوزه نزدیک

طیف پاسخ

خلاصه: قابلیت بهره‌برداری از پل در حین و پس از زلزله با توجه به نقش کلیدی این سازه‌ها بسیار حائز اهمیت است. بررسی خاصیت مخرب زلزله‌های حوزه نزدیک به گسل درک بهتری از رفتار سازه پل را می‌دهد. از طرفی با توجه به نوع سازه می‌توان پل‌ها را به پل‌های معمولی، کابلی و متحرک تقسیم کرد. پل تاشو نوعی از پل متحرک است که قابلیت باز و بسته شدن را دارد. در این پژوهش عملکرد لرزه‌ای پل متحرک تاشو هورن آلمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. پل مذکور دارای دهانه‌ای به طول ۴۰ متر و سه دهانه با قابلیت باز و بسته شدن به طول‌های ۳/۶۵، ۲/۷ و ۳/۶۵ متر هست. مدل هندسی پل در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس که قابلیت تحلیل غیرخطی را دارد تهیه شده است. سپس جهت تهیه طیف پاسخ، دوره تناوب پل استخراج گردیده و در نهایت مطابق با ضوابط نشریه ۴۶۳ عملیات هم پایه سازی بر روی ۵ شتاب‌نگاشت قوی حوزه نزدیک، بم، ناقان، رودبار و منجیل، سرپل‌ذهاب و ورزقان که در کشور ایران رخ داده است، جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی، صورت گرفته است. بیشینه مقدار عددی پاسخ شتاب، جابه‌جایی قائم، برش پایه و دررفت بر جک در زلزله ورزقان، با توجه به اینکه دوره تناوب غالب این زلزله به دوره تناوب پل نزدیک است، بیشتر بوده، که منجر به آثار تخریبی بیشتری این زلزله در سازه پل نسبت به سایر زلزله‌ها گردیده است. جابه‌جایی قائم ناشی از ارتعاش زمین در راستای افقی در زلزله ورزقان از میانگین بیشینه جابه‌جایی‌ها و از بیشینه جابه‌جایی در زلزله بم که دارای کمترین مقدار بیشینه است به ترتیب ۵۴/۳۳٪ و ۱۱۴/۱۹٪ بیشتر بوده است. دررفت قابل توجه بر جک مورب در راستای عمود بر عرشه از نتایج شایان اهمیت بوده که باعث ایجاد مفصل پلاستیک و تغییر شکل پسماند ۰/۲ و ۳۵ سانتی‌متری در ناحیه اتصالی بر جک‌ها به عرشه و به ترتیب در راستای طول دهانه پل و عمود بر عرشه پل شده است.

۱- مقدمه

پل‌ها سازه‌های با اهمیت فراوانی هستند که دو نقطه غیرقابل عبور و مرور را به هم وصل می‌کنند و بسته به شرایط در شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند که پل‌های معمولی، پل‌های کابلی و پل‌های متحرک از نمونه‌های بارز هستند. پل‌های متحرک به چندین دسته تقسیم می‌شوند که پل‌های باسکولی، بازویی و پل‌های تاشو از جمله پل‌های محبوب در میان مهندسين و طراحان هست. پل‌های تاشو به طور معمول روی رودخانه احداث می‌گردند و در زمان عبور و مرور به روی ترافیک باز شده و در هنگام ترافیک دریایی به صورت بسته می‌باشند. این نوع پل‌ها در مناطقی که از نظر فضای شهری دارای محدودیت است، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. به طور معمول اعمال باز و بسته شدن در این نوع پل‌ها توسط کابل‌ها صورت

می‌گیرد. با توجه به موارد فوق در این تحقیق پل هورن واقع در شهر کیل کشور آلمان که یک نمونه مشهور و مطرح از پل‌های تاشو است، مورد بررسی تحلیل تاریخچه زمانی قرار می‌گیرد. پل مذکور دارای طول ۴۰ متری و سه دهانه با طول‌های ۳/۶۵، ۲/۷ و ۳/۶۵ متر است که قابلیت باز و بسته شدن توسط کابل‌های متصل به بر جک‌ها را دارد.

جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی، در نخستین گام لازم است که خصوصیات دینامیکی پل‌ها که از اهمیت بالایی برخوردار هستند استخراج گردد. به همین دلیل، این ویژگی‌ها توسط محققان و طراحان بررسی شده است. شکل مودهای ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی پل‌ها توسط روش‌های مختلف تجربی و عددی استخراج می‌گردند. جهت استخراج شکل مودهای ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی، توسط محققین روش‌های مختلفی پیشنهاد گردیده است. در روش‌های کلاسیک به صورت تجربی و مدل‌سازی ریاضی،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mh.taghavi@stu.qom.ac.ir



گرفت. با توجه به ضرورت و حساسیت بالای این نوع سازه و همچنین مدل سازی بهتر رفتار غیرخطی سازه، در این تحقیق از نرم افزار آباکوس جهت مدل سازی استفاده گردیده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مشخصات پل هورن

پل تاشو هورن آلمان واقع در شهر کیل ایالت شولسویک-هولستین یکی از مشهورترین و اولین مدل های پل تاشو در جهان می باشد. این پل با هزینه ۱۶ میلیون مارک آلمان در سال ۱۹۹۷ احداث گردیده است. این پل مرکز شهر کیل واقع در ساحل غربی را با گاردن کوارتر در ساحل شرقی شهر متصل می نماید. به طور معمول و عالی این پل در هر ساعت جهت عبور و تردد ترافیک دریایی باز می گردد. عملیات باز و بسته شدن پل به طور تقریبی نیازمند دو دقیقه می باشد. در شکل ۱، نمای پل در حالت باز و بسته نمایش داده شده است.

سازه پل از دو برجک عمود بر عرشه و مایل نسبت به عرشه تشکیل یافته است. عرشه پل توسط ۴ ست کابل به برجکها متصل گردیده است که دو ست اول به برجک عمود بر عرشه و دو ست دوم به برجک مایل متصل است. قطر کابل های پل ۱۰ سانتی متر بوده و از جنس پلی-اتیلن می باشد که از رشته هایی به قطر ۷ میلی متر تشکیل یافته است. عرض عرشه پل در قسمت ثابت سه متر بوده که در قسمت متحرک به ۲/۵ متر کاهش می یابد. عرشه پل از ۵ تیر طولی و ۲ تیر عرضی به مقطع IPE ۲۰ در هر سگمنت قسمت متحرک تشکیل یافته است که این تیرها به صورت اتصال تودلی در مدل سازی در نظر گرفته شده است. نمای پل، پلان پل و جزئیات عرشه و اتصالات آن در شکل ۲، نمایش داده شده است.

۲-۲- روش تحلیل

جهت مدل سازی رفتار پل، و ضرورت شبیه سازی رفتار غیرخطی مواد و همچنین تحلیل تاریخچه زمانی، از نرم افزار آباکوس در این مطالعه استفاده گردید. مطابق با نشریه ۴۶۳ [۳۶] جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی، سازه پل می بایستی تحت ۵ شتابنگاشت که همپایه سازی گردیده اند، بررسی گردد.

با نظر به موارد فوق از ۵ شتابنگاشت قوی حوزه نزدیک که در کشور ایران رخ داده است، جهت مدل سازی استفاده شده است. از معیارهای تشخیص زلزله نزدیک گسل، فاصله سایت تا کانون

این خصوصیات استخراج می گردید [۴-۲]. اکنون با ظهور ابررایانه ها و وجود نرم افزارهای متعدد با مدل سازی سازه این خصوصیات مهم دینامیکی استخراج می گردد [۵-۱۱]. در این تحقیق با کمک نرم افزار آباکوس که از روش اجزا محدود جهت تحلیلها بهره می برد، مودهای ارتعاشی و فرکانسهای متناظر با آن برای پل استخراج می گردد و در گام بعدی تحلیل تاریخچه زمانی جهت بررسی لرزه ای صورت می پذیرد.

تحقیقات متعددی توسط محققین در راستای رفتار لرزه ای سازه ها [۱۶-۱۲] و به خصوص پلها [۲۰-۱۷] صورت گرفته است. این تحقیقات به طور غالب به بررسی رفتار سازه و پاسخ آن به زلزله را می پردازد. کالوی و همکاران [۱۸] به بررسی رفتار پایه های پل توخالی ساخته شده از بتن پرداختند و عملکرد آن تحت زلزله را بررسی نمودند. در مطالعه دیگری رفتار پل راه آهنی شینکانسن در اثر زلزله های شدید بررسی شد [۲۱]. زنگ و دیماتروکوپولوس در سال ۲۰۱۶ اثرات زلزله های قوی بر روی پل قوسی شکل را مطالعه نمودند. اثرات زلزله بر روی پل های فولادی با پایه های مربعی شکل نیز توسط چندین محقق مورد بررسی قرار گرفت [۲۴-۲۲].

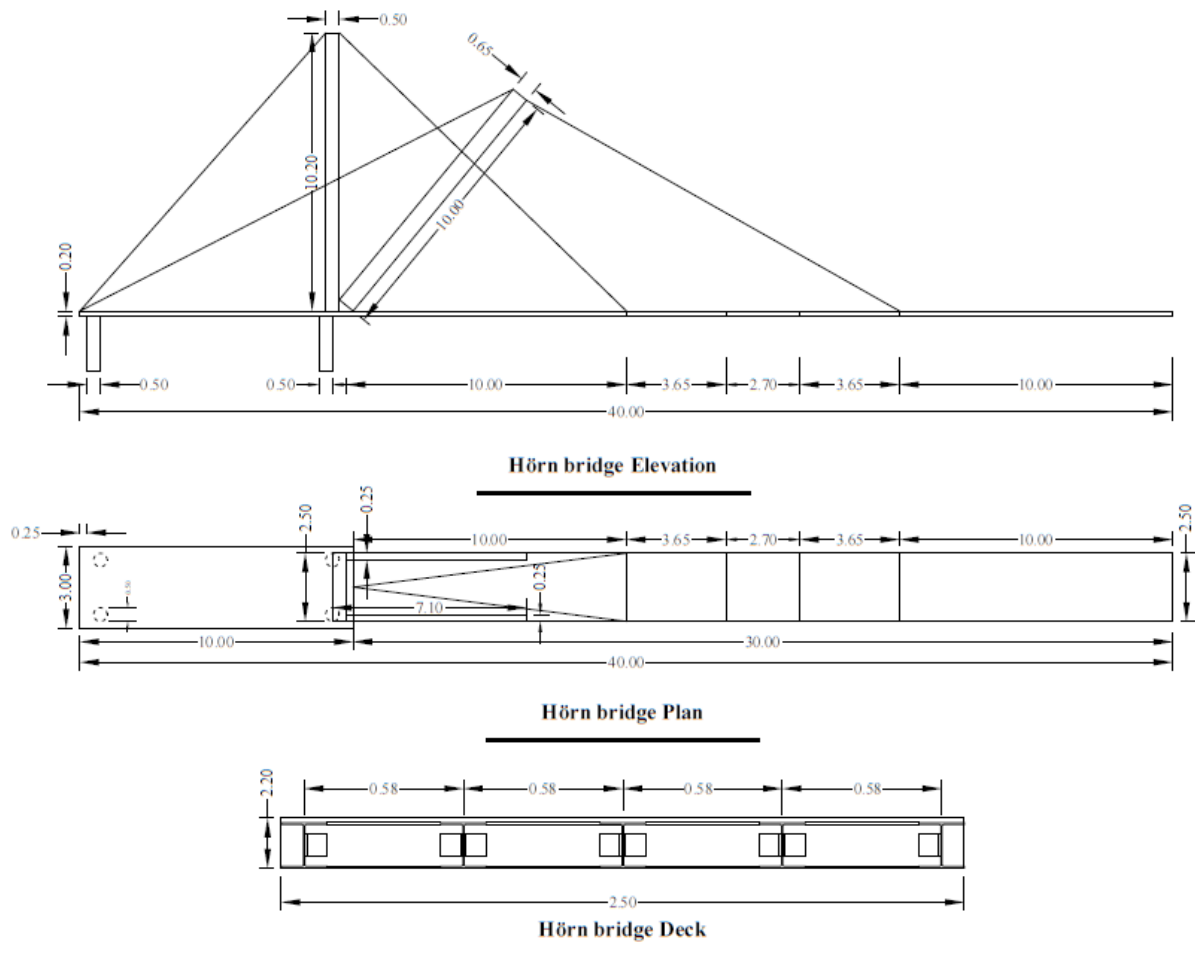
در این بین برخی محققین به طور خاص بر روی تاثیرات شتابنگاشت های حوزه نزدیک بر روی پل پرداختند [۲۸-۲۵]. در تحقیقی که توسط فان و همکاران صورت گرفت [۲۹]، به اثرات زلزله های حوزه نزدیک بر پایه های پل بتنی پرداخته شده است. در تحقیق دیگری توسط سنگوپتا و همکاران در سال ۲۰۱۶ به اثرات تخریبی زلزله های حوزه نزدیک که در دو جهت متعامد بر پایه های بتنی پل به صورت همزمان اعمال می گردد، پرداخته شد [۳۰]. همچنین تاثیرات زلزله های حوزه نزدیک بر روی پل های کابلی معلق [۳۱-۳۳] و کابلی ترکه ای [۳۴ و ۳۵] توسط برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته است.

با وجود این که تحقیقات فراوانی در راستای رفتار لرزه ای پلها صورت گرفته است، اما تاکنون هیچ اقدامی به بررسی رفتار لرزه ای پل های تاشو نشده است که بر ضرورت بررسی این موضوع بیش از پیش افزوده می شود. هدف این تحقیق بررسی رفتار و پاسخ لرزه ای پل تاشو هورن می باشد. با نظر به اینکه پل هورن آلمان از نمونه های شاخص پل تاشو می باشد و جزئیات مربوط به سایر پل های تاشو به صورت گسترده در اختیار عموم قرار ندارد و همچنین به دلیل پیشرو بودن کشور آلمان در صنعت پل سازی و ساخت سازه های سریع الاحداث و نظر به نیاز جهت امداد رسانی در به مناطق صعب العبور و دور از دسترس با توجه به توع جغرافیایی کشور، الگوی مترقی پل هورن آلمان جهت انجام مطالعات بیشتر در این تحقیق مورد استفاده قرار



شکل ۱. (الف) پل هورن آلمان در وضعیت بهره‌برداری - (ب) پل هورن آلمان در وضعیت بسته

Fig. 1. (a) The Hörn Bridge in operation condition - (b) The Hörn Bridge in closed condition



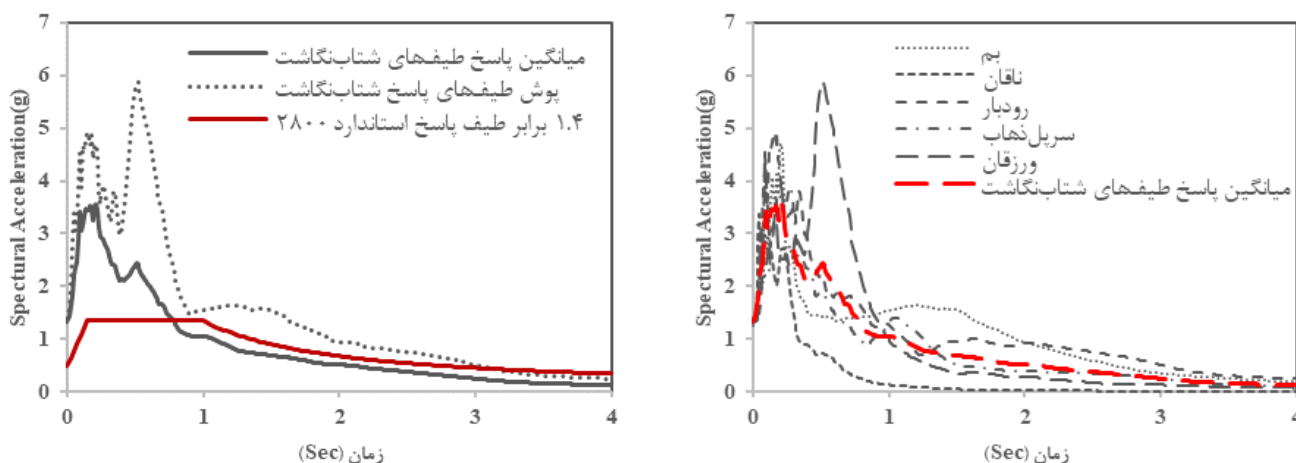
شکل ۲. جزئیات نما، پلان و عرشه پل هورن آلمان

Fig. 2. The Hörn bridge schematic elevation, plan, and deck sectional view

جدول ۱. اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده

Table 1. Selected ground motions details

نام زلزله	سال	ایستگاه	مخفف	طول زلزله (s)	بیشینه شتاب زمین لرزه (g)	دوره تناوب غالب (s)	
						راستای X	راستای Y
"بم - کرمان"	۱۲/۲۶/۲۰۰۳	"بم"	BAM	۶۶/۵۴	۰/۸۰۸	۰/۲۰۰	۰/۲۲۰
"ناقان - چهارمحال و بختیاری"	۰۳/۳۱/۲۰۱۶	"ناقان"	NAG	۵۱/۱۹	۰/۲۲۸	۰/۱۶۰	۰/۱۲۰
"منجیل و رودبار - گیلان"	۶/۲۰/۱۹۹۰	"آبار"	RUD	۵۳/۵	۰/۵۱۵	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
"سرپل ذهاب - کرمانشاه"	۱۱/۱۲/۲۰۱۷	"سرپل ذهاب"	SPZ	۷۴/۹۸	۰/۶۸۱	۰/۲۸۰	۰/۲۲۰
"ورزقان - آذربایجان شرقی"	۰۸/۱۱/۲۰۱۲	"سد ستارخان"	VAR	۷۱/۹۹	۰/۳۷۲	۰/۵۰۰	۰/۵۸۰



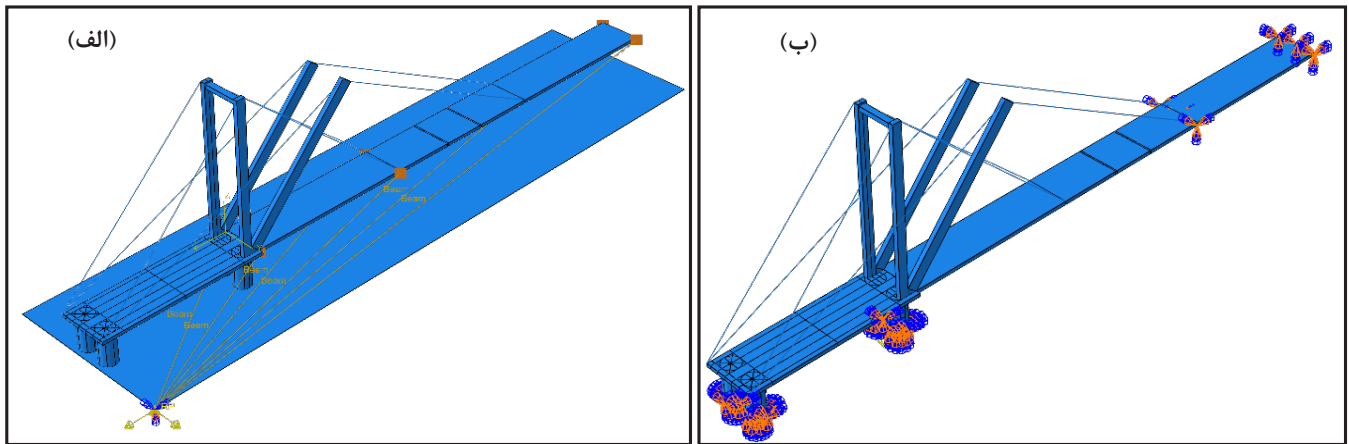
شکل ۳. (الف) طیف پاسخ زوج شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل و میانگین طیف‌های شتاب‌نگاشت - (ب) میانگین طیف‌های شتاب‌نگاشت، پوش طیف‌های شتاب‌نگاشت و ۱/۴ برابر طیف استاندارد ۲۸۰۰

Fig. 3. (a) Response spectrum for selected ground motions - (b) Envelope Response Spectrum-Standard Response Spectrum

ذکر است که طبق ضوابط نشریه، که طیف پاسخ میانگین در بازه $T = 0.2$ و $T = 1/5$ می‌بایستی بیشتر از $1/4$ برابر طیف پاسخ استاندارد باشد در غیر این صورت نیاز به اعمال ضریب اصلاح با توجه به نسبت بیشینه در بازه مذکور است. طیف پاسخ استاندارد با در نظر گرفتن میرایی 5% استخراج شده است و با توجه به نوع سازه و عدم وجود میراگر، میرایی ذاتی سازه در نرم‌افزار آباکوس به مقدار 5% اعمال گردیده است. در شکل ۳ طیف پاسخ استاندارد برای شتاب‌نگاشت‌ها و طیف پاسخ میانگین و مقایسه آن با طیف پاسخ استاندارد با اعمال ضریب نمایش داده شده است.

لرزه‌های است. به طور معمول در زلزله‌های نزدیک گسل فواصل بین ۱۵ تا ۳۰ کیلومتر به عنوان نزدیک گسل تعریف می‌گردد. اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده اعم از بیشینه شتاب زمین لرزه، تاریخ وقوع زلزله، نام ایستگاه، دوره تناوب غالب در راستای X و Y و مخفف آن‌ها که برای نام‌گذاری مدل‌ها استفاده گردیده است، در جدول ۱ نمایش داده شده است.

ضوابط تحلیل تاریخچه زمانی نشریه ۴۶۳ مطابقت بالایی با آیین‌نامه AASHTO [۳۷] داشته و از این رو شتاب‌نگاشت‌ها مطابق با نشریه ۴۶۳ هم‌پایه‌سازی گردیده و طیف پاسخ استاندارد آن رسم می‌گردد. قابل



شکل ۴. شرایط مرزی اعمال شده در نرم‌افزار آباکوس (الف) در مرحله بارگذاری ثقلی - (ب) در مرحله اعمال حرکت زمین

Fig. 4. Imposed boundary condition in ABAQUS (a) In subjection to gravity loads (b) In subjection to ground seismic movement

جهت از المان‌هایی متفاوتی جهت مَش‌بندی استفاده گردیده است. هدف از انجام این عمل ممانعت از واگرایی ناشی از حجم منفی المان‌ها، تشکیل ماتریس نرمی بی‌نهایت و تغییر شکل‌های غیرمجاز در المان‌ها می‌باشد. در جدول ۲، نوع مَش‌بندی المان‌های به کار رفته در اعضای سازه نمایش داده شده است.

طول برجک‌ها ۱۰ متر بوده و برجک اول به صورت عمود بر عرشه و برجک دوم به صورت مورب بر عرشه مستقر گردیده است. سازه پل بر روی چهار شمع به شعاع ۱ متر واقع شده‌اند و انتهای پل دارای شرایط تکیه‌گاهی به صورت مفصلی می‌باشد. چهار ست کابل در پل با شعاع ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده است که ست اول و دوم به برجک اول و ست سوم و چهارم به برجک دوم وصل شده‌اند. از این کابل‌ها جهت حرکت عرشه‌های متحرک استفاده می‌شود. عرشه پل در ابتدای دهانه ۱۰ متری دارای عرض ۳ متری و پس از ناحیه انصالی برجک‌ها، عرض عرشه به ۲/۵ متر کاهش می‌یابد. طول عرشه‌های متحرک به ترتیب ۳/۶۵، ۲/۷ و ۳/۶۵ متر است. اطلاعات هندسی پل و ابعاد آن در جدول ۳ نمایش داده شده است.

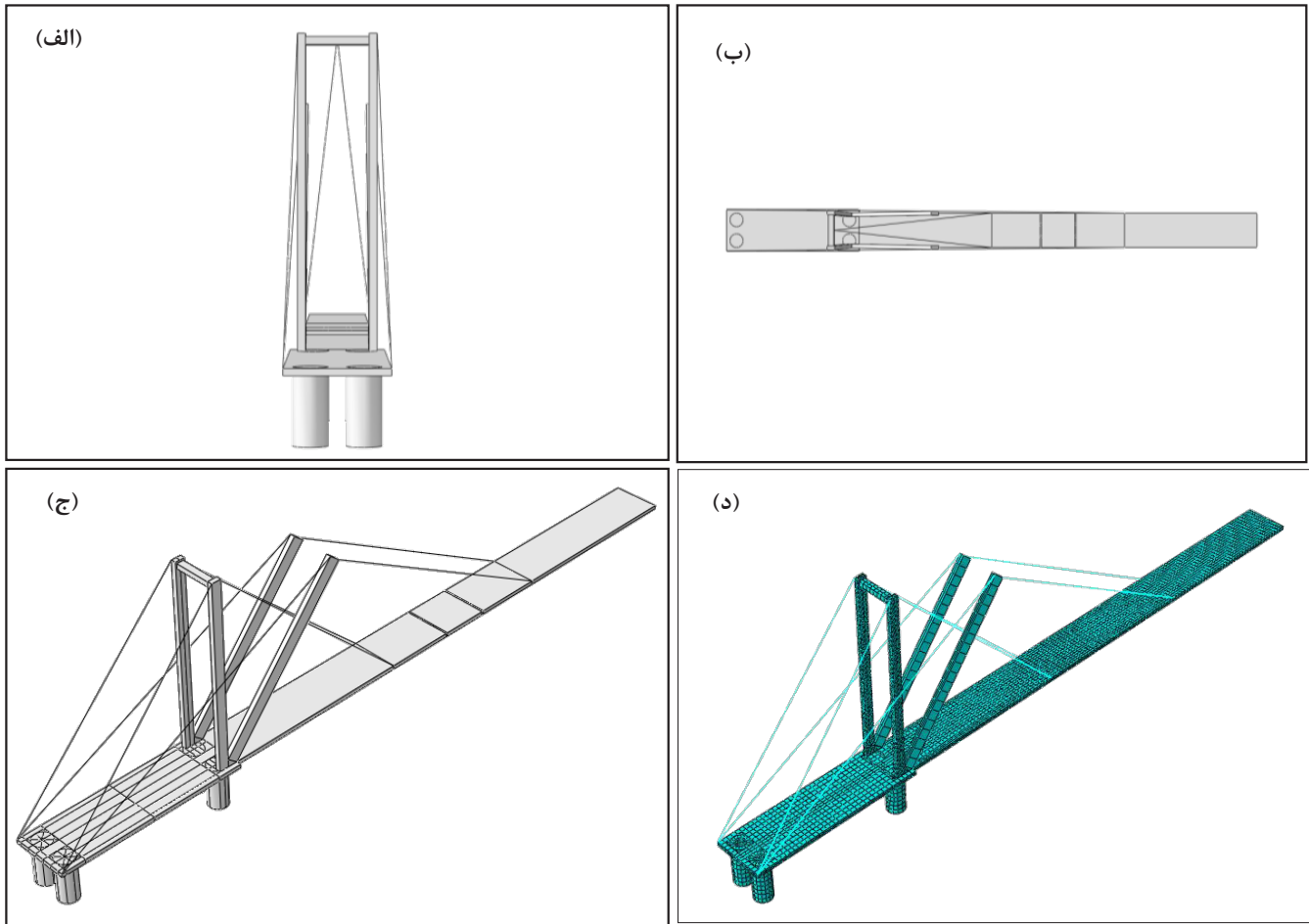
نوع فولاد انتخابی ST37 بوده و مشخصات مصالح اعمال شده در نرم‌افزار در جدول ۴ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه در تحلیل تاریخچه زمانی احتمال ورود رفتار سازه به ناحیه غیرخطی است و همچنین از طرفی کرنش‌های پسماند و پلاستیک و شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح مصرفی در افزایش دقت خروجی‌ها و نتایج به دست آمده نقش بسزایی دارد، منحنی غیرخطی رفتار تنش - کرنش فولاد ST37 در قسمت مصالح نرم‌افزار اعمال می‌گردد.

پس از انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس صورت می‌پذیرد. جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها با ایجاد رفرنس پوینت و یک صفحه صلب جهت مدل‌سازی رفتار زمین ایجاد گردید و سپس توسط اتصال دهنده‌ها^۱ به شرایط مرزی پل اعمال گردید. انتهای شمع‌ها به و همچنین قسمت پایانی عرشه به صورت گیردار در نظر گرفته شده است که جهت اعمال حرکت زمین در مرحله بارگذاری لرزه‌ای، قید حرکتی در دو جهت متعامد x و y آزاد شده است. شرایط مرزی پل در بارگذاری ثقلی و همچنین در مرحله اعمال حرکت زمین در شکل ۴ نمایش داده شده است.

نظر به اینکه اثرات اندرکنش خاک و سازه عموماً تأثیر مثبت در محاسبه تلاش‌های داخلی سازه دارد، بدترین شرایط خاک جهت تحلیل و بررسی ارزیابی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه دقت نتایج و خروجی‌ها به اندازه مَش‌بندی‌ها بستگی زیادی دارد در این تحقیق از اندازه ۰/۲۵ متری به صورت کلی برای مَش‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به آنالیز حساسیت^۲ صورت گرفته تحت بارگذاری ثقلی پل، همگرایی لازم در خروجی‌ها رخ پذیرفته است که با در نظر گرفتن کاهش غیرمحسوس اختلاف در ابعاد مَش‌بندی کوچک‌تر، ابعاد مذکور به عنوان ابعاد بهینه در نظر گرفته شده است. با این وجود در پایه‌ها به دلیل شکل دایره‌ای آن از مَش‌بندی ریزتر استفاده گردید. در شکل ۵ مدل تهیه شده در صفحه‌های XY، YZ، سه بعدی و مَش‌بندی آن نمایش داده شده است.

هندسه سازه پل متشکل از اعضای سازه‌ای مختلف می‌باشد و بدین

- 1 Connector
- 2 sensitivity analysis



شکل ۵. مدل‌سازی صورت گرفته در آباکوس (الف) در صفحه yz - (ب) در صفحه xy - (ج) سه بعدی - (د) مش بندی ایجاد شده

Fig. 5. Developed model in ABAQUS (a) XY plane (b) XZ plane (c) Perspective view (d) Meshed model

جدول ۲. نوع مش بندی المان‌ها

Table 2. Mesh Element Type

مقطع	شکل مش	نوع مش
عرشه	Linear hexahedron	C3D8R
برجک عمود	Quadratic tetrahedron	C3D10
برجک مورب	Linear hexahedron	C3D8R
کابل	Linear line	B31
شمع	Linear hexahedron	C3D8R

جدول ۳. اطلاعات هندسی پل

Table 3. Geometric dimension of the bridge

مقطع	طول (متر)	عرض / قطر (متر)	عمق (متر)
طول پل	۴۰	۲/۵	۰/۲
دهانه متحرک اول	۳/۶۵	۲/۵	۰/۲
دهانه متحرک دوم	۲/۷	۲/۵	۰/۲
دهانه متحرک سوم	۳/۶۵	۲/۵	۰/۲
برجک مورب	۱۰	۰/۶۵	۰/۲۵
برجک عمود	۱۰	۰/۵	۰/۲۵
شمع	۲۲	۱	-
ست اول کابل	۱۳/۴۶	۰/۱	-
ست دوم کابل	۱۴/۵۴	۰/۱	-
ست سوم کابل	۱۷/۸۲	۰/۱	-
ست چهارم کابل	۱۵/۶۸	۰/۱	-

جدول ۴. مشخصات مصالح

Table 4. Material characteristics

مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	ضریب پواسون	کرنش نهایی (%)
۲۱۰	۲۴۰	۳۷۰	۰/۳	۲۵

و فرکانس متناظر با مود اول به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸ هرتز و ۱/۰۰۲ ثانیه است. در شکل ۷، ۴ مود اول ارتعاشی پل نمایش داده شده است. در جدول ۵، ۴ مود اول، فرکانس و دوره تناوب متناظر آن نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، اختلاف فرکانس در مودهای ارتعاشی بالاتر کمتر بوده و بیانگر مشارکت کمتر مودهای بالاتر در رفتار دینامیکی و پاسخ لرزه‌ای پل می‌باشد.

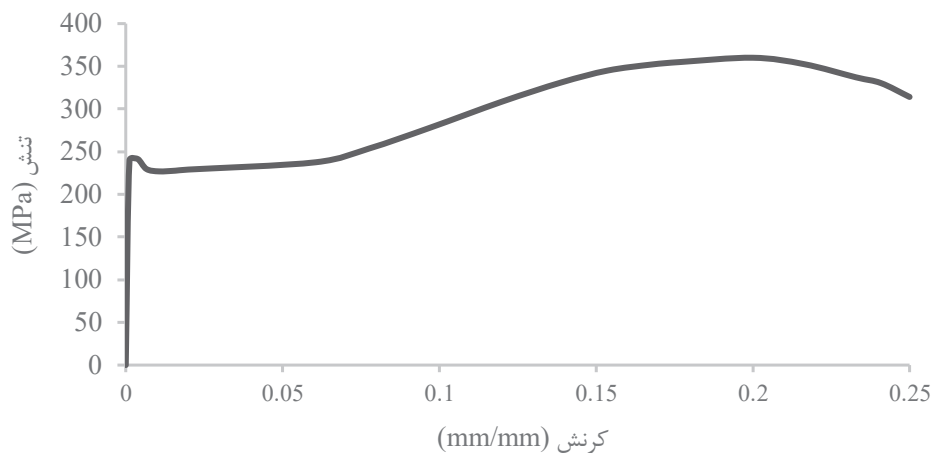
در هر تحقیقی یکی از ملزومات روش تحقیق صحت‌سنجی می‌باشد. در این تحقیق جهت صحت‌سنجی سه مود ارتعاشی اول به دست آمده از مدل‌سازی اجزاء محدود با سه مود ارتعاشی دریافت شده از طراحان مقایسه گردید. اختلاف مودهای اول تا سوم به ترتیب برابر با ۰/۲/۳۵٪، ۰/۲/۹۱٪ و ۰/۲/۶۷٪ به دست آمده است که حاکی از مقدار قابل قبول است.

در منحنی تنش - کرنش فولاد، پس از تسلیم، سخت شوندگی کرنشی روی می‌دهد که در نرم‌افزار کرنش و تنش متناظر با نقاط مقاومت تسلیم، ناحیه سخت شوندگی و مقاومت نهایی اعمال گردیده است. منحنی تنش - کرنش فولاد ST37 اعمال شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۶ نمایش داده شده است.

۳- نتایج و بحث

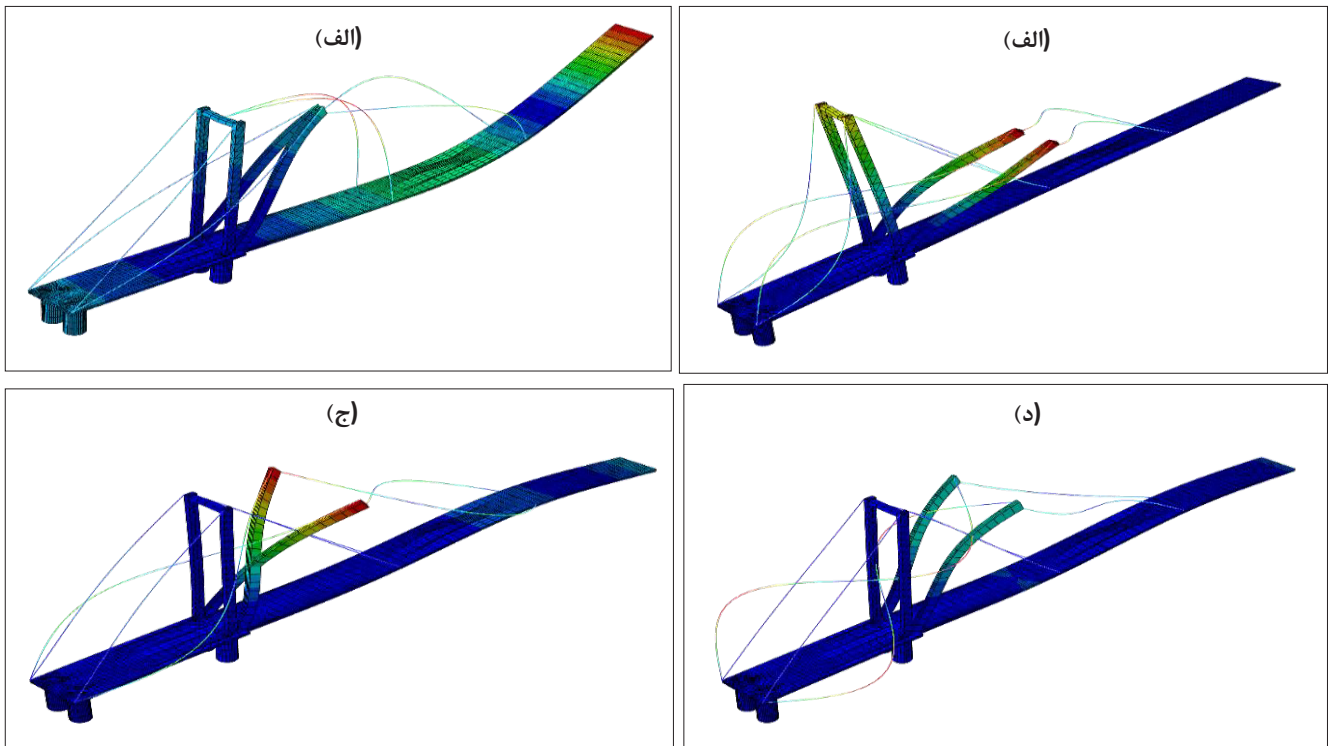
جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی، ابتدا دوره تناوب و فرکانس‌های پل جهت استخراج طیف پاسخ محاسبه می‌گردد. مود اول ارتعاشی پل در راستای طولی بوده و به صورت متقارن می‌باشد و مود دوم در راستای عرضی و مودهای سوم و چهارم به ترتیب طولی نامتقارن و پیچشی است. دوره تناوب

منحنی تنش- کرنش فولاد - ST37



شکل ۶. منحنی تنش-کرنش فولاد - ST37

Fig. 6. Stress - strain curve



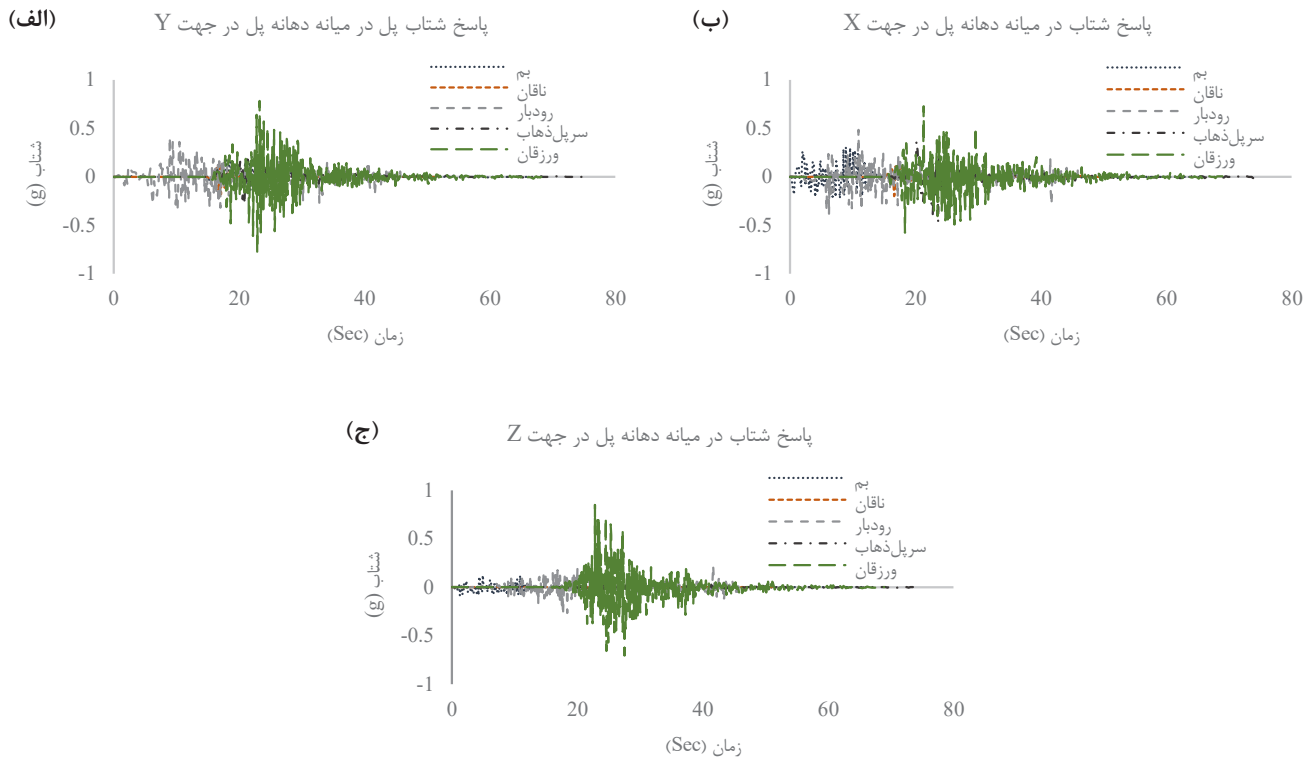
شکل ۷. (الف) مود ارتعاشی اول - (ب) مود ارتعاشی دوم - (ج) مود ارتعاشی سوم - (د) مود ارتعاشی چهارم

Fig. 7. (a) First vibration mode (b) second vibration mode (c) third vibration mode (d) fourth vibration mode

جدول ۵. فرکانس و دوره تناوب متناظر برای ۴ مود اول ارتعاشی.

Table 5. Corresponding period and frequency for first four vibration mode

مود ارتعاشی	دوره تناوب (ثانیه)	فرکانس (هرتز)
I	۱/۰۰۲	۰/۹۹۸
II	۰/۵۹۳	۱/۶۸۶
III	۰/۴۹۳	۲/۰۲۶
IV	۰/۳۷۵	۲/۶۶۹



شکل ۸. پاسخ شتاب در میانه دهانه پل در جهت X- (ب) پاسخ شتاب در میانه دهانه پل در جهت Y- (ج) پاسخ شتاب در میانه دهانه پل در جهت Z

Fig. 8. Mid span acceleration response in (a) X direction (b) Y direction (c) Z direction

تحریکات زمین در دو جهت افقی بر ایجاد ارتعاش در جهت قائم است که منجر به شتاب قابل توجهی در راستای قائم می‌گردد. بیشینه پاسخ شتاب در دو جهت X و Y در رکورد ورزقان بیش از دیگر رکوردها بوده و به ترتیب در راستای X و Y برابر با $0/۷۲۹ g$ و $0/۷۸۳ g$ است و بیشینه پاسخ شتاب در رکورد ناقلان از دیگر رکوردها کمتر بوده و به ترتیب در راستای X و Y برابر با $0/۲۰۰ g$ و $0/۱۷۹ g$ است.

۳-۱- پاسخ شتاب
رکوردهای شتاب در دو جهت متعامد افقی X و Y به صورت همزمان به پایه‌های پل اعمال گردیده است و پاسخ شتاب در میانه دهانه متحرک پل در دو جهت متعامد افقی و قائم در شکل ۸ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که راستای X در جهت طولی و امتداد دهانه پل و راستای Y به صورت افقی و عمود بر عرشه در نظر گرفته شده است. اشکال بیانگر اثرگذاری



شکل ۹. مقایسه بیشینه شتاب پاسخ و میانگین بیشینه شتابها در وسط دهانه - (الف) در راستای X - (ب) در راستای Y - (ج) در راستای Z

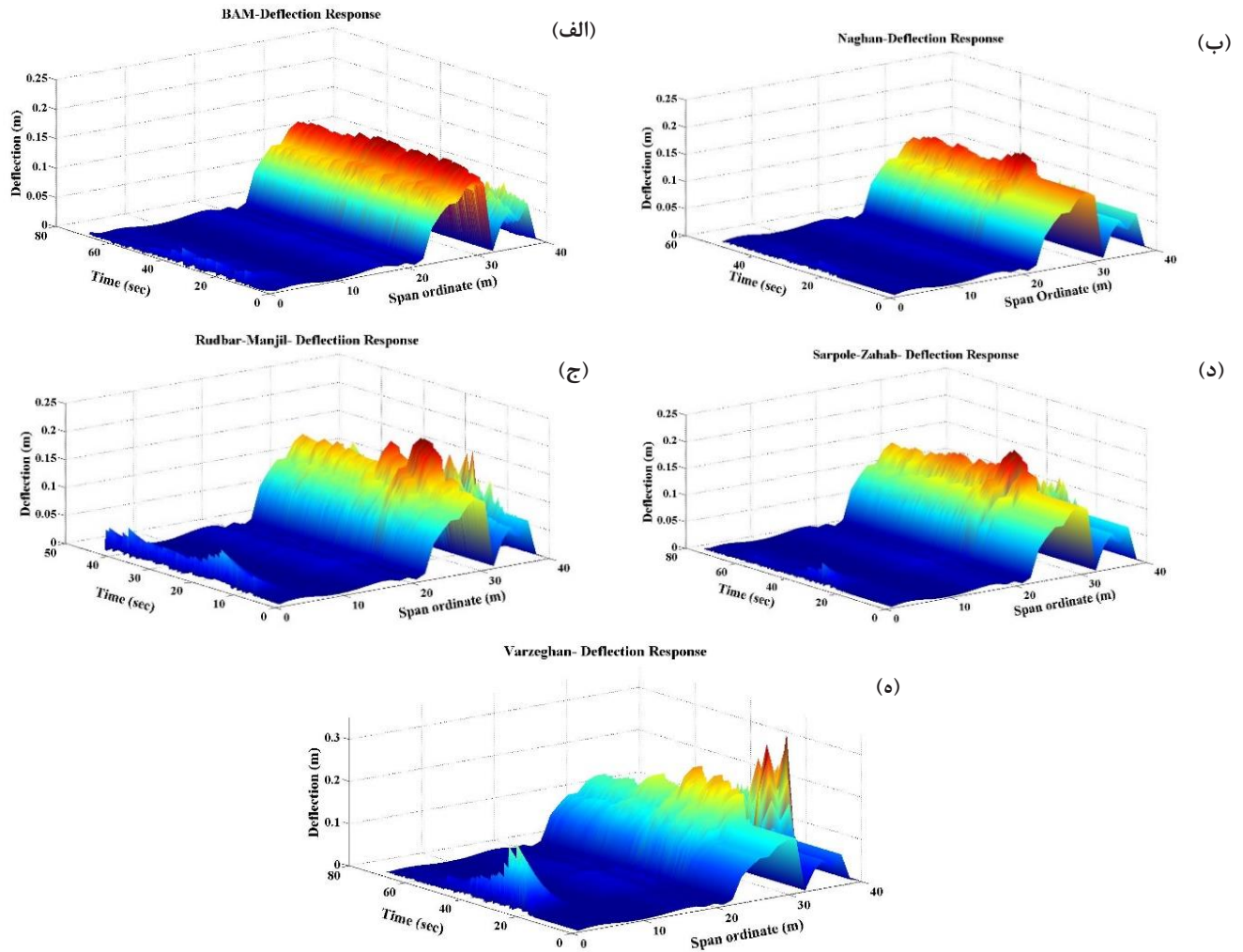
Fig. 9. Comparison of maximum acceleration response and average of maximum acceleration response in (a) X direction (b) Y direction (c) Z direction

۳-۲- تغییر شکل‌های قائم در پل

تحریک زمین در جهت X و Y منجر به ارتعاش پل در جهت قائم می‌گردد و به طبع آن منجر به تغییر شکل‌های قائم در پل می‌گردد. در شکل ۱۰، رویه تغییر شکل برای پنج شتاب‌نگاشت مورد نظر ترسیم شده است که محورهای آن طول پل، زمان و تغییر شکل است که با کمک آن می‌توان تغییر شکل را به صورت سه بعدی در زمان و در نقطه مورد نظر در طول دهانه استخراج کرد.

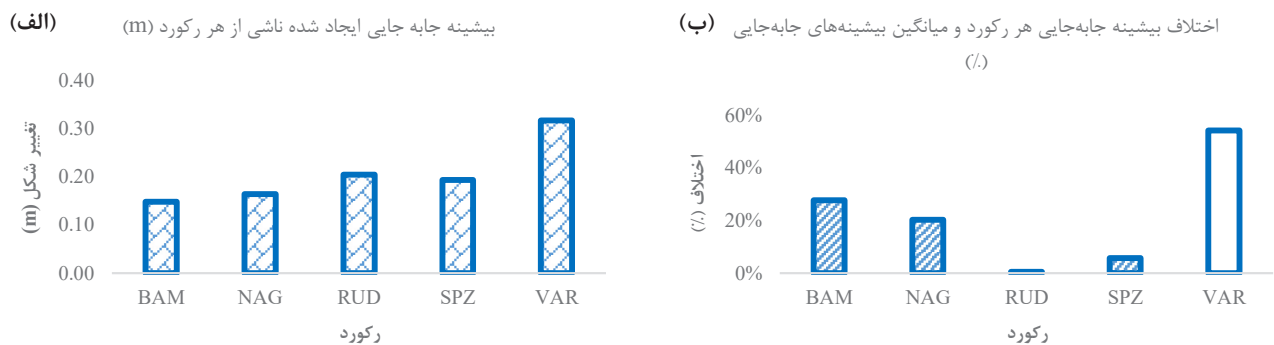
بیشینه جابه‌جایی ایجاد شده در طول پل ناشی از هر رکورد استخراج شده و با یکدیگر مقایسه شده است. رویه‌ها بیانگر نیروی فشاری قابل توجهی در انتهای پل است. بدین منظور بیشینه جابه‌جایی ایجاد شده برای هر رکورد و همچنین مقایسه آن‌ها در شکل ۱۱ آورده شده است. شکل‌ها بیانگر این می‌باشند که بیشینه جابه‌جایی در راستای قائم، در رکورد ورزقان از دیگر رکوردها بیشتر است. بیشترین و کمترین مقدار بیشینه جابه‌جایی در

پاسخ شتاب در راستای افقی از لحظه اعمال زلزله نمایان گردیده و دارای مقدار قابل ملاحظه‌ای است، این در حالی است که پاسخ شتاب در راستای قائم در بیشینه شتاب رکورد تشدید شده و به مقدار چشمگیری می‌رسد. بیشترین مقدار بیشینه پاسخ شتاب در راستای قائم همانند راستای افقی در زلزله ورزقان صورت پذیرفته و برابر با $0.849g$ و کمترین مقدار بیشینه پاسخ شتاب در زلزله ناقان رخ داده و مقدار آن برابر با $0.35g$ است. با توجه به اینکه دوره تناوب غالب رکورد ورزقان به دوره تناوب سازه پل و علی‌الخصوص دوره تناوب مودهای دوم، سوم و چهارم بسیار نزدیک می‌باشد، ارتعاش سازه تشدید یافته و منجر به ارتعاش چشمگیر در راستاهای افقی و قائم گردیده است. در شکل ۹، مقادیر بیشینه پاسخ و مقایسه بیشینه پاسخ با مقدار میانگین بیشینه پاسخ به صورت ستونی نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که جهت نمایش بهتر، مقادیر منفی به صورت ستون‌های هاشور خورده نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. (الف) - رویه تغییر شکل قائم پل در طول زلزله بام - (ب) - رویه تغییر شکل قائم پل در طول زلزله نغان - (ج) - رویه تغییر شکل قائم پل در طول زلزله رودبار و منجیل - (د) - رویه تغییر شکل قائم پل در طول زلزله سرپل ذهاب - (ه) - رویه تغییر شکل قائم پل در طول زلزله ورزقان

Fig. 10. Vertical displacement curve at (a) BAM earthquake (b) NAGHAN earthquake (c) RUDBAR & MANJIL earthquake (d) SARPOLE ZAHAB earthquake (e) VARZEGHAN earthquake



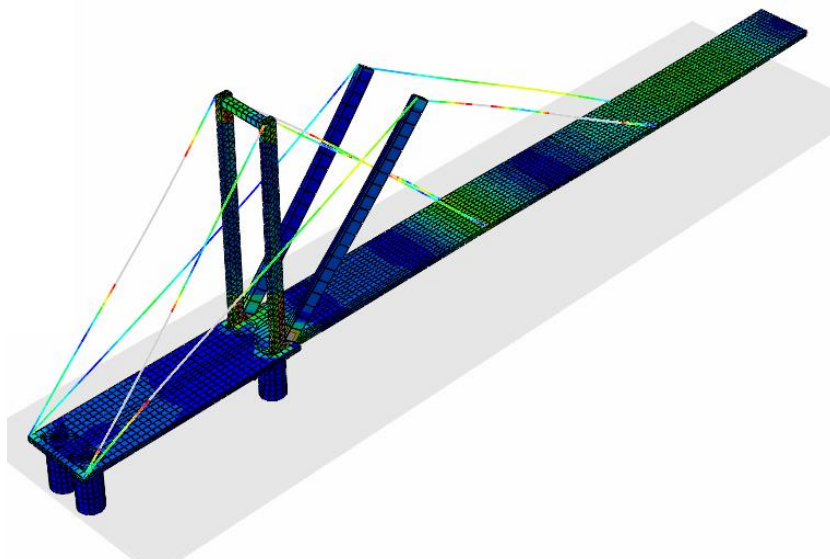
شکل ۱۱. (الف) بیشینه جابه‌جایی ایجاد شده ناشی از هر رکورد و میانگین بیشینه‌های جابه‌جایی

Fig. 11. (a) Maximum vertical displacement at each earthquake (b) comparison of maximum occurred vertical displacement with mean of maximum vertical displacements at earthquakes

جدول ۶. مقایسه تغییر شکل بیشینه و میانگین تغییر شکل بیشینه

Table 6. Maximum displacement and comparison of maximum displacement with mean of maximum vertical displacements

رکورد	تغییر شکل بیشینه (m)	اختلاف تغییر شکل بیشینه با میانگین تغییر شکل بیشینه (%)
BAM	۰/۱۴۸	٪-۲۷/۷۴
NAG	۰/۱۶۴	٪-۲۰/۳۱
RUD	۰/۲۰۴	٪-۰/۵۱
SPZ	۰/۱۹۴	٪-۵/۷۴
VAR	۰/۳۱۷	٪۵۴/۳۱



شکل ۱۲. کانتور تنش در زلزله ورزقان

Fig. 12. Stress contour at Varzeghan record

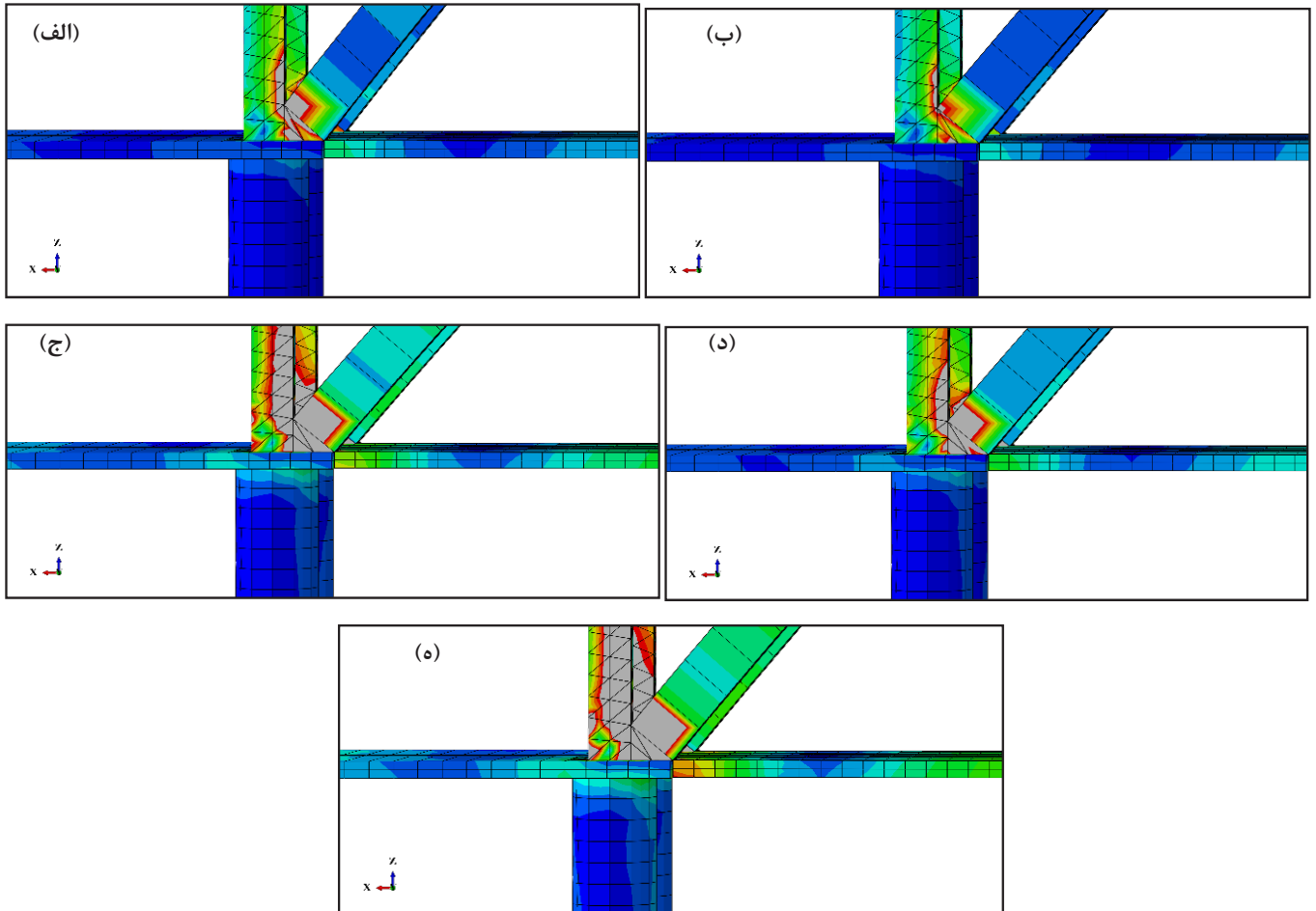
رکوردهای زلزله و همچنین اختلاف تغییر شکل بیشینه با میانگین تغییر شکل بیشینه در جدول ۶ به نمایش درآمده است.

۳-۳- کانتور تنش

کانتور تنش برای پل در اثر زلزله ورزقان شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با کمک کانتور تنش، می‌توان ناحیه‌هایی از پل که دارای تنش بیش از تنش تسلیم هستند شناسایی کرد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود ناحیه اتصال برجک‌ها به عرشه در برابر زلزله ضعیف‌تر بوده و مفصل پلاستیک تشکیل یافته است.

رکورد ورزقان و بم صورت می‌پذیرد و به ترتیب برابر با ۰/۳۱۷ و ۰/۱۴۸ متر است. اختلاف بیشینه جابه‌جایی قائم همه زلزله‌ها به غیر از زلزله ورزقان کمتر از میانگین مقادیر بیشینه ۵ رکورد انتخابی است که حاکی از اختلاف چشمگیر بیشینه جابه‌جایی زلزله ورزقان با بیشینه جابه‌جایی زلزله‌های دیگر است.

مقدار اختلاف بیشینه جابه‌جایی در زلزله بم با مقدار میانگین تغییر شکل بیشینه برابر با ٪-۲۷/۷۴ است و مقدار مذکور در زلزله ورزقان برابر با ٪۵۴/۳۱ می‌باشد. همچنین بیشینه جابه‌جایی در زلزله ورزقان ٪۱۱۴/۱۹ از مقدار بیشینه جابه‌جایی در زلزله بم بیشتر می‌باشد. جابه‌جایی ناشی از



شکل ۱۳. کانتور تنش در ناحیه اتصال برجک‌ها به عرشه در زلزله (الف) - بم - (ب) - ناقان - (ج) رودبار و منجیل - (د) سرپل ذهاب - (ه) - ورزقان

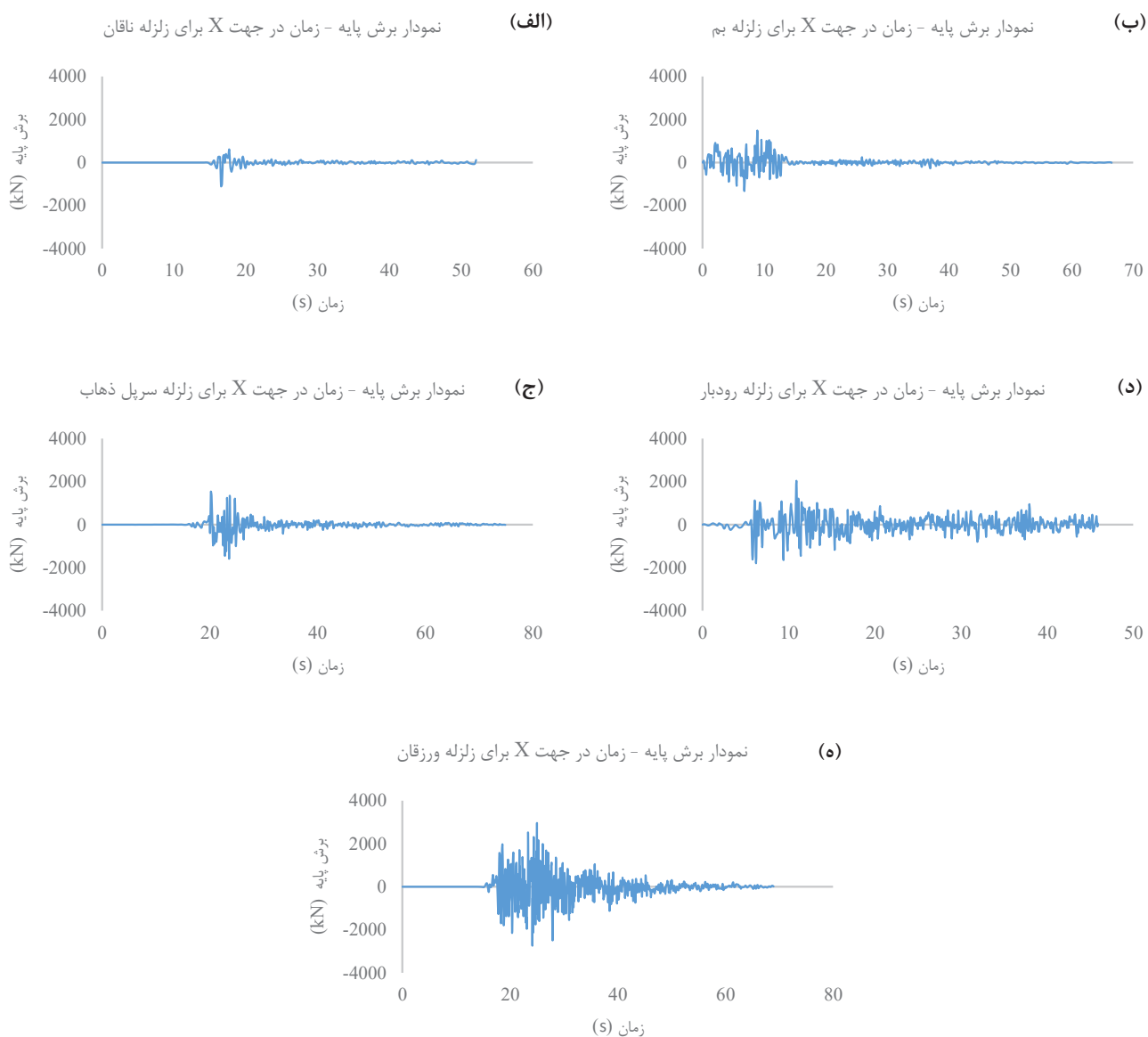
Fig. 13. Stress Contour at connection zone (a) Bam - (b) Naghan - (c) Rudbar-Manjil - (d) Sarpole-Zahab - (e) Varzeghan

۳-۴- برش پایه

پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی، برش پایه در اثر شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک استخراج گردید. نمودار برش پایه-زمان به دست آمده در شکل ۱۴ برای جهت X نمایش داده شده است.

بیشترین و کمترین مقدار بیشینه برش پایه در شتاب‌نگاشت ورزقان و ناقان رخ می‌دهد به طوری که بیشینه برش پایه در رکورد ورزقان ۲/۶۹۸ برابر بیشینه برش پایه در رکورد ناقان می‌باشد. این اختلاف قابل توجه با نظر به اینکه همپایه‌سازی در رکوردها صورت گرفته است، ناشی از اثرات محتوایی حوزه نزدیک بر سازه پل است. بیشترین و کمترین برش پایه به

در ناحیه اتصالی برجک‌ها به عرشه، در رکورد ورزقان در مقایسه با دیگر شتاب‌نگاشت‌ها، سطح بیشتری تسلیم شده و به کرنش پلاستیک رسیده است. نحوه گسترش سطح تسلیم در راستای محور برجک‌ها و به صورت طولی بوده است. تنش‌های قسمت عریض‌تر عرشه در محدوده الاستیک بوده و تنش‌های ایجاد شده در شمع‌ها نیز از مقدار 100 Mpa تجاوز نمی‌کند. کاهش عرض عرشه منجر به افزایش تنش در عرشه در قسمت ابتدایی آن می‌گردد با این وجود هیچ سطحی از عرشه به نقطه تسلیم نمی‌رسد. کانتور تنش برای ناحیه اتصال برای شتاب‌نگاشت‌های مختلف در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

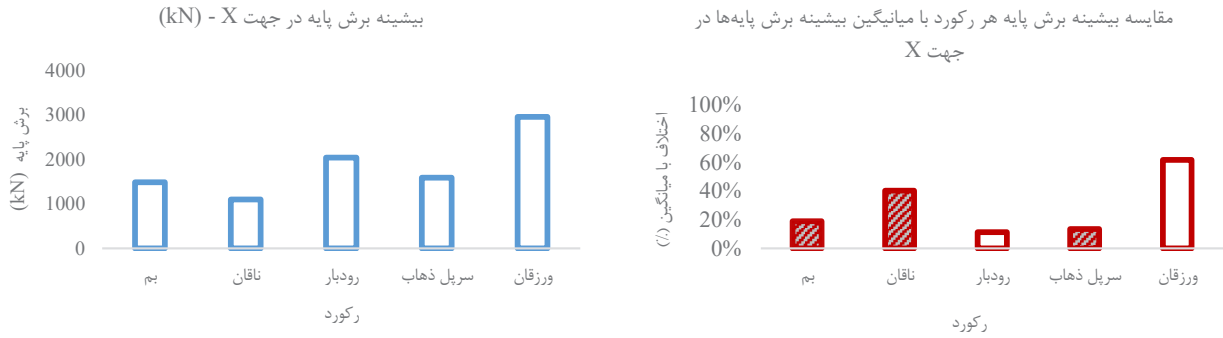


شکل ۱۴. نمودار برش پایه - زمان در جهت X - (الف) - بم - (ب) ناقان - (ج) رودبار - (د) سرپل ذهاب - (ه) ورزقان

Fig. 14. Base Shear - Time graph in X-Direction (a) Bam - (b) Naghan - (c) Rudbar-Manjil - (d) Sarpole-Zahab - (e) Varzeghan

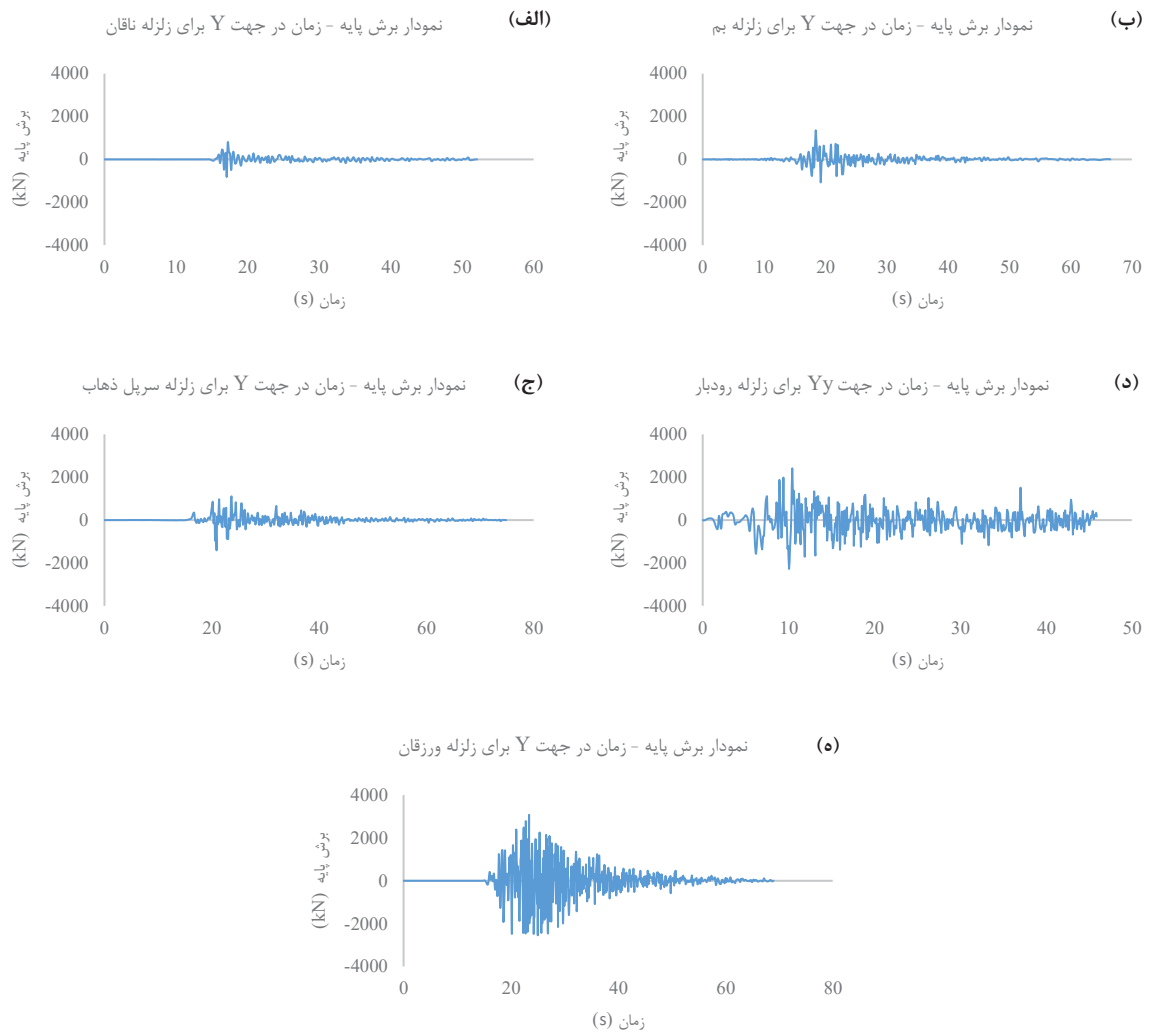
پایه به ترتیب در شتاب‌نگاشت‌های ورزقان و ناقان رخ می‌دهد و نسبت بیشترین به کمترین برابر با $3/742$ است و مقدار عددی آن به ترتیب برابر با $3075/87$ kN و $821/95$ kN است. در شکل ۱۷ مقایسه مقادیر میانگین بیشترین برش پایه‌ها در جهت Y با یکدیگر به صورت ستونی نمایش داده شده است.

ترتیب برابر با $2963/43$ kN و $1098/42$ kN است. مقدار میانگین برش پایه و همچنین مقایسه آن به صورت ستونی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در شکل ۱۶ نمودار برش پایه-زمان در جهت Y نمایش داده شده است. همانند برش پایه در جهت X، بیشترین و کمترین مقدار بیشینه برش



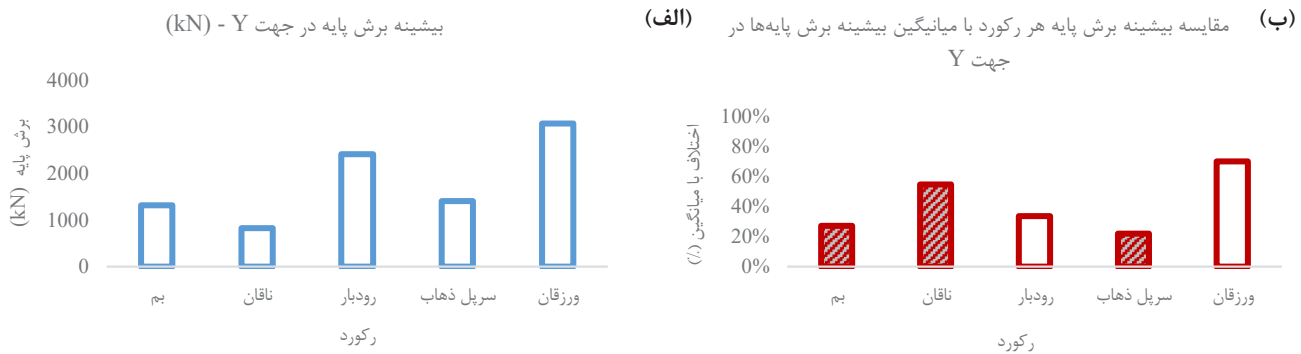
شکل ۱۵. (الف) - مقدار بیشینه برش پایه در جهت X - (ب) - مقایسه بیشینه برش پایه هر رکورد با میانگین بیشینه برش پایه‌ها در جهت X

Fig. 15. (a) Base Shear Maxima (kN) in X-Direction - (b) Comparison between Max Base Shear and Mean of Max Base Shears in X-Direction (%)



شکل ۱۶. نمودار برش پایه - زمان در جهت Y - (الف) - بم - (ب) - ناقان - (ج) - رودبار - (د) - سرپل ذهاب - (ه) - ورزقان

16. Base Shear – Time graph in Y-Direction (a) Bam - (b) Naghan - (c) Rudbar-Manjil - (d) Sarpole-Zahab - (e) Varzegan



شکل ۱۷. (الف) - مقدار بیشینه برش پایه در جهت Y - (ب) - مقایسه بیشینه برش پایه هر رکورد با میانگین بیشینه برش پایه‌ها در جهت Y
 Fig. 17. (a) Base Shear Maxima (kN) in X-Direction - (b) Comparison between Max Base Shear and Mean of Max Base Shears in Y-Direction (%)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار لرزه‌ای پل متحرک تاشو هورن واقع در شهر کیل کشور آلمان با انجام تحلیل تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار گرفت. جهت انجام این تحلیل ۵ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک از زلزله‌های قوی رخ داده در کشور ایران انتخاب و پس از همپایه‌سازی مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و نشریه ۴۶۳، تحلیل تاریخچه زمانی صورت گرفت. اثرات رکوردهای حوزه نزدیک به صورت ضربه‌ای در محتوای رکوردهای حوزه نزدیک موجود بوده و این اثرات در نتایج مستخرج از مدل‌سازی نماینگر است. به نحوی که پس از همپایه‌سازی رکوردها مقدار عددی در نتایج تغییر شکل، پاسخ شتاب، برش پایه و دررفت برجک‌ها به طور معنی‌داری برای رکورد ورزقان بیشتر بوده است.

- در ابتدا، جهت همپایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها برای تحلیل تاریخچه زمانی، تحلیل مودال صورت پذیرفت. با کمک تحلیل مودال، شکل موده‌های ارتعاشی، فرکانس و دوره تناوب ارتعاش سازه پل استخراج شده است. اختلاف فرکانس و دوره تناوب موده‌های بالاتر با مود اول قابل توجه بوده که حاکی از مشارکت بالای مود اول در رفتار دینامیکی پل است. فرکانس و دوره تناوب مود اول به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸ هرتز و ۱/۰۰۲ ثانیه است.

- بیشترین مقدار بیشینه‌ی تغییر شکل قائم رخ داده در تحلیل تاریخچه زمانی، در رکورد ورزقان رخ می‌دهد که از کمترین مقدار بیشینه‌ی تغییر شکل که در رکورد Bem رخ می‌دهد، ۱۱۴/۱۹٪ بیشتر بوده و از میانگین بیشینه تغییر شکل‌ها، ۵۴/۳۱٪ بیشتر است.

- پاسخ شتاب پل در میانه دهانه پل محاسبه و استخراج گردید

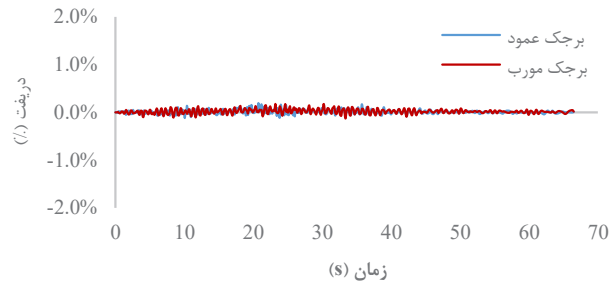
۳-۵- دررفت برجک‌ها

دررفت برجک‌ها اطلاعاتی درباره میزان تغییر شکل در راستای زلزله نسبت به محل اثر زلزله نشان می‌دهد. جهت دستیابی به دررفت میانگین جابه‌جایی سر برجک‌ها محاسبه و استخراج گردید و در نهایت با توجه به زمان نمودار زمان-دررفت برجک‌ها ترسیم گردید. بیشترین مقدار بیشینه دررفت برجک‌ها در راستای X در زلزله ورزقان صورت داده و به ترتیب برای زلزله رودبار و Bem که کمترین مقدار بیشینه دررفت رخ می‌پذیرد، به ترتیب برابر با ۰/۱۲۵٪ و ۰/۱۷۷٪ بوده است. در شکل ۱۸ دررفت برجک‌ها در راستای X نمایش داده شده است.

دررفت برجک‌ها در راستای Y در زلزله ورزقان دارای بیشترین مقدار بیشینه بوده و به ترتیب برای برجک عمود و مورب برابر با ۱/۷۹۰٪ و ۹/۷۳۹٪ هست. کمترین مقدار بیشینه دررفت برجک‌ها در زلزله ناقان صورت گرفته و مقادیر آن برای برجک عمود و مورب به ترتیب برابر با ۰/۶۰۳٪ و ۱/۵۹۹٪ هست. نکته قابل تامل، دررفت چشمگیر برجک‌ها در راستای Y نسبت به راستای X است. دررفت برجک در راستای Y در رکورد ورزقان برای برجک مورب به مقدار بحرانی رسیده و منجر به تشکیل مفاصل پلاستیک در ناحیه اتصالی می‌گردد که در کانتور تنش‌ها این امر نیز مشاهده گردیده است. همچنین دررفت بیشینه برجک عمود در راستای Y ۱/۷۳ برابر دررفت بیشینه در راستای X بوده و این مقدار برای برجک مورب برابر با ۴/۶۴ است. در شکل ۱۹ دررفت برجک‌ها در راستای Y نمایش داده شده است.

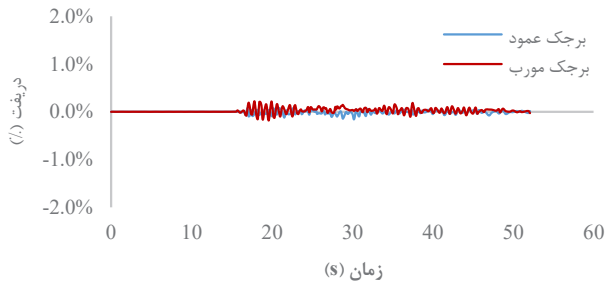
(الف) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله بم در راستای X

(ب)



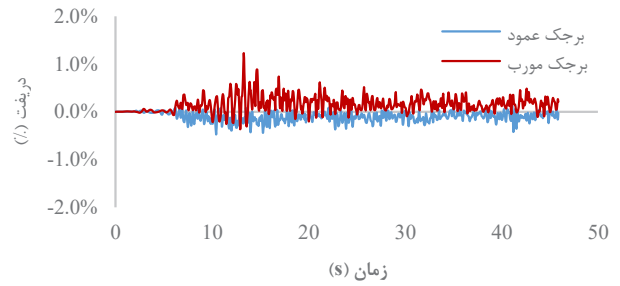
(ج) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله ناقاتان در راستای X

(ج)

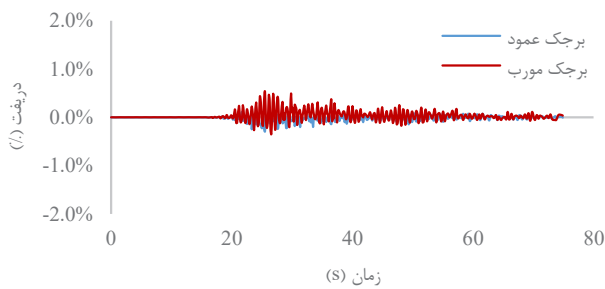


(د) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله رودبار در راستای X

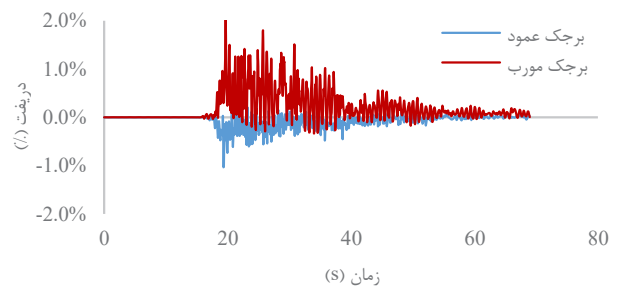
(د)



(ه) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله سرپل ذهاب در راستای X



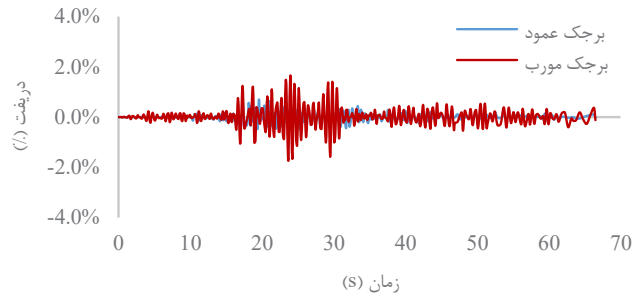
(و) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله ورزقان در راستای X



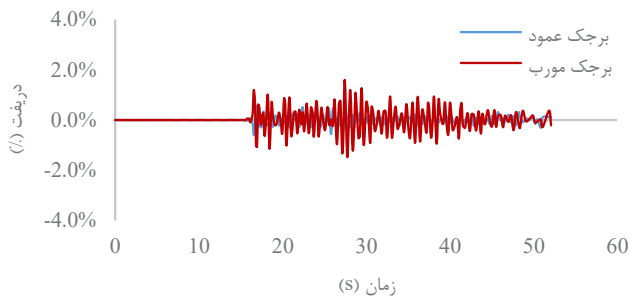
شکل ۱۸. نمودار دریفت - زمان برجک‌ها در جهت X - (الف) - بم - (ب) ناقاتان - (ج) رودبار - (د) سرپل ذهاب - (ه) ورزقان

Fig.18. Drift - Time graph in X-Direction (a) Bam - (b) Naqan - (c) Rudbar-Manjil - (d) Sarpol-e-Zahab - (e) Varzeghan

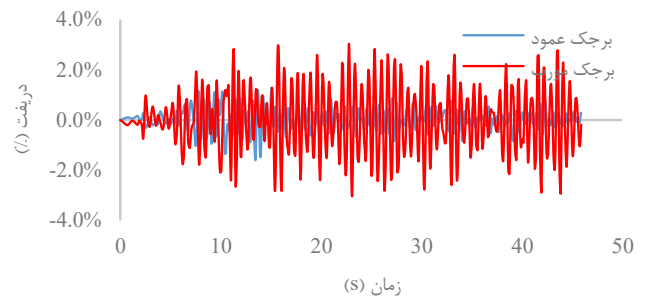
(ب) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله بیم در راستای Y (الف)



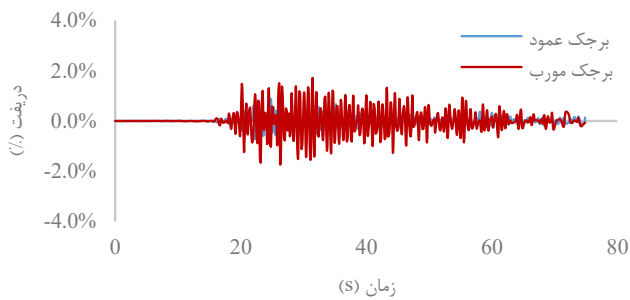
(ج) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله ناقان در راستای Y



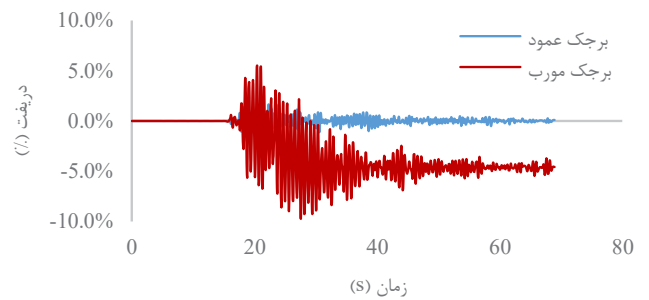
(د) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله رودبار در راستای Y



دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله سرپل ذهاب در راستای Y



(ه) دریفت برجک‌ها-زمان در زلزله ورزقان در راستای Y



شکل ۱۹. نمودار دریفت زمان برجک‌ها در جهت Y - (الف) - بیم - (ب) ناقان - (ج) رودبار - (د) سرپل ذهاب - (ه) ورزقان

Fig. 19. Towers Drift – Time graph in Y-Direction (a) Bam - (b) Naghan - (c) Rudbar-Manjil - (d) Sarpoole-Zahab - (e) Varzeghan

برجک مورب، برابر با ۴/۶۱ است. همچنین شایان ذکر است که در سطحی از ناحیه اتصالی برجک‌ها به عرشه، مفصل پلاستیک تشکیل یافته است. این سطح در رکورد ورزقان نسبت به دیگر شتاب‌نگاشت‌ها بیشتر بوده و سطح تسلیم شده به صورت طولی و در راستای محور برجک‌ها گسترش یافته است.

منابع

- [1] J. Brownjohn, F. Magalhaes, E. Caetano, A. Cunha, Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge, *Engineering Structures*, 32(8) (2010) 2003-2018.
- [2] D.J. Ewins, *Modal testing: theory, practice and application*, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] W. Heylen, S. Lammens, P. Sas, *Modal analysis theory and testing*, Katholieke Universiteit Leuven Leuven, Belgium, 1997.
- [4] J.M. Silva, N.M. Maia, J. Silva, *Theoretical and experimental modal analysis*, Mechanical engineering research studies, (1997).
- [5] G.H. James, T.G. Carne, J.P. Lauffer, The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures, *Modal Analysis-the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 10(4) (1995) 260.
- [6] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, *Smart materials and structures*, 10(3) (2001) 441.
- [7] B. Peeters, F. Vanhollenbeke, H. Van der Auweraer, *Operational PolyMAX for estimating the dynamic properties of a stadium structure during a football game*, in: *Proceedings of the IMAC*, 2005.
- [8] J. Lardies, S. Gouttebroze, Identification of modal parameters using the wavelet transform, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(11) (2002) 2263-2283.
- [9] L. Hermans, H. Van der Auweraer, *Modal testing and analysis of structures under operational conditions:*

که بیانگر ایجاد ارتعاش قابل توجه در راستای قائم توسط تحریکات زمین در راستای افقی بود. حداکثر بیشینه پاسخ شتاب در همه راستاها مربوط به شتاب‌نگاشت ورزقان و حداقل بیشینه آن مربوط به شتاب‌نگاشت ناقان بود. نسبت حداکثر به حداقل مقدار بیشینه پاسخ شتاب در راستای X، Y و Z به ترتیب ۳/۶۴۵، ۴/۳۷۴ و ۲۴/۲۵۷ است. مقدار قابل توجه نسبت در راستای Z بیانگر تشدید ارتعاش در زلزله ورزقان در راستای قائم است. نسبت بیشینه پاسخ شتاب در راستای Z به بیشینه پاسخ شتاب در راستای X و Y به ترتیب برابر با ۱/۱۶۴ و ۱/۰۸۴ است. همچنین به نظر می‌رسد، با توجه به اینکه دوره تناوب غالب رکورد ورزقان به دوره تناوب پل نزدیک می‌باشد، پدیده تشدید در زلزله ورزقان رخ داده است.

- مقدار حداکثر و حداقل بیشینه برش پایه رخ داده در دو جهت متعامد افقی در رکوردها به طور تقریبی یکسان بوده و حاکی از جذب انرژی و رفتار متقارن سازه پل است. حداکثر مقدار بیشینه برش پایه در دو جهت X و Y در رکورد ورزقان رخ داده و به ترتیب برابر با ۲۹۶۳/۴۳ kN و ۳۰۷۵/۸۷ بوده و این مقادیر برای حداقل مقدار بیشینه برش پایه که در زلزله ناقان رخ می‌دهد به ترتیب برابر با ۱۰۹۸/۴۲ kN و ۸۲۱/۹۵ kN است. نسبت حداکثر به حداقل مقدار بیشینه برش پایه در جهت X با ۲/۶۹۸ برابر بوده و این مقدار در جهت Y برابر با ۳/۷۴۲ است.

- دریافت سازه در راستای Y به طور قابل توجهی بیشتر بوده که منجر به آسیب در ناحیه اتصالی و پای برجک‌ها می‌گردد، همچنین دریافت برجک‌های مورب در تمامی رکوردها متناظر نسبت به دریافت برجک‌ها عمود بر عرشه بیشتر بوده که به دلیل عدم وجود تیر اتصالی در برجک مورب و انتهای آزاد آن است. بیشترین مقدار بیشینه دریافت برجک عمود در راستای X از کمترین مقدار دریافت بیشینه دریافت برجک ۸۲۷/۲٪ بیشتر بوده و این مقدار برای جهت Y با ۲۹۶/۸۴۹٪ برابر است. مقادیر مذکور برای برجک مورب در دو راستای X و Y به ترتیب با ۱۱۸۵/۳۱۱٪ و ۶۰۹/۰۶۸٪ برابر است. لازم به ذکر است که جابه‌جایی پسماند به مقدار ۰/۰۰۲ و ۰/۳۵ سانتی‌متر در ناحیه اتصالی برجک‌ها به عرشه شده به ترتیب در راستای طول دهانه پل و عمود بر عرشه پل ایجاد گردیده است.

- برخلاف برش پایه و دریافت برجک عمود، مقدار دریافت برجک مورب در دو راستای متعامد افقی تفاوت فاحشی داشته که ناشی از ساختار متفاوت برجک مورب و عدم وجود تیر اتصالی در انتهای برجک مورب است. این موهوم سبب شده است که نسبت بیشینه برش پایه‌ها در دو جهت متعامد افقی برابر ۱/۰۳۸ بوده و نسبت بیشینه دریافت‌ها در دو جهت متعامد برای

- [20] H. Iemura, M.H. Pradono, Passive and semi-active seismic response control of a cable-stayed bridge, *Journal of Structural Control*, 9(3) (2002) 189-204.
- [21] X. He, M. Kawatani, T. Hayashikawa, T. Matsumoto, Numerical analysis on seismic response of Shinkansen bridge-train interaction system under moderate earthquakes, *Earthquake engineering and engineering vibration*, 10(1) (2011) 85-97.
- [22] E. WATANABE, K. SUGIURA, W.O. OYAWA, Effects of multi-directional displacement paths on the cyclic behaviour of rectangular hollow steel columns, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2000(647) (2000) 79-95.
- [23] J. Dang, T. Aoki, Bidirectional loading hybrid tests of square cross-sections of steel bridge piers, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(8) (2013) 1111-1130.
- [24] Y. Luo, H. Li, D. Li, D. Ding, Experimental study on seismic behavior of eccentrically constant-compressed steel box column under cyclically lateral loading, *Journal of Tongji University. Natural Science*, 40(3) (2012) 344-352.
- [25] N. Chouh, H. Hao, Significance of SSI and nonuniform near-fault ground motions in bridge response I: Effect on response with conventional expansion joint, *Engineering Structures*, 30(1) (2008) 141-153.
- [26] J. Shen, M.-H. Tsai, K.-C. Chang, G.C. Lee, Performance of a seismically isolated bridge under near-fault earthquake ground motions, *Journal of Structural Engineering*, 130(6) (2004) 861-868.
- [27] A.M. Billah, M.S. Alam, M.R. Bhuiyan, Fragility analysis of retrofitted multicolumn bridge bent subjected to near-fault and far-field ground motion, *Journal of Bridge Engineering*, 18(10) (2013) 992-1004.
- [28] M.H. Jónsson, B. Bessason, E. Haflidason, Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(6) (2010) 447-455.
- [29] V. Phan, M.S. Saiidi, J. Anderson, H. Ghasemi, Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge industrial applications, *Mechanical systems and signal processing*, 13(2) (1999) 193-216.
- [10] J. Fan, Z. Zhang, H. Hua, Data processing in subspace identification and modal parameter identification of an arch bridge, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(4) (2007) 1674-1689.
- [11] E. Reynders, R. Pintelon, G. De Roeck, Uncertainty bounds on modal parameters obtained from stochastic subspace identification, *Mechanical systems and signal processing*, 22(4) (2008) 948-969.
- [12] R. Tremblay, Inelastic seismic response of steel bracing members, *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5-8) (2002) 665-701.
- [13] T. Kobori, M. Takahashi, T. Nasu, N. Niwa, K. Ogasawara, Seismic response controlled structure with active variable stiffness system, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(11) (1993) 925-941.
- [14] D. Konstantinidis, N. Makris, Seismic response analysis of multidrum classical columns, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(10) (2005) 1243-1270.
- [15] M. Saiidi, M.A. Sozen, Simple and complex models for nonlinear seismic response of reinforced concrete structures, *University of Illinois Engineering Experiment Station. College of ...*, 1979.
- [16] W.B. Joyner, A method for calculating nonlinear seismic response in two dimensions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5) (1975) 1337-1357.
- [17] A. Aviram, K.R. Mackie, B. Stojadinovic, Effect of abutment modeling on the seismic response of bridge structures, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 7(4) (2008) 395-402.
- [18] G.M. Calvi, A. Pavese, A. Rasulo, D. Bolognini, Experimental and numerical studies on the seismic response of RC hollow bridge piers, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3(3) (2005) 267-297.
- [19] A. Elgamal, L. Yan, Z. Yang, J.P. Conte, Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system, *Journal of structural engineering*, 134(7) (2008) 1165-1176.

- ground motion, Engineering Failure Analysis, 115 (2020) 104615.
- [34] H. Karaca, K. Soyulok, Effects of near-fault and far-fault ground motions on cable-stayed bridges, Disaster Science and Engineering, 4(1) (2018) 12-21.
- [35] K. Soyulok, H. Karaca, Near-fault and far-fault ground motion effects on cable-supported bridges, Procedia engineering, 199 (2017) 3077-3082.
- [36] B.a.H.R.C. (BHRC), Iranian Road and Railway Bridges Seismic Resistant Design Code”, Iranian Management Organization, in, Ministry of Roads and Transportation, Tehran, 1387 (2008).
- [37] T.O.S.o. Bridges, AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, AASHTO, 2011.
- columns, Journal of structural engineering, 133(7) (2007) 982-989.
- [30] A. Sengupta, L. Quadery, S. Sarkar, R. Roy, Influence of bidirectional near-fault excitations on RC bridge piers, Journal of Bridge Engineering, 21(7) (2016) 04016034.
- [31] Ö. Çavdar, Probabilistic sensitivity analysis of suspension bridges to near-fault ground motion, (2013).
- [32] S. Adanur, A.C. Altunişik, A. Bayraktar, M. Akköse, Comparison of near-fault and far-fault ground motion effects on geometrically nonlinear earthquake behavior of suspension bridges, Natural hazards, 64(1) (2012) 593-614.
- [33] S.-x. Zheng, X.-h. Shi, H.-y. Jia, C.-h. Zhao, H.-l. Qu, X.-l. Shi, Seismic response analysis of long-span and asymmetrical suspension bridges subjected to near-fault

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. H. Taghavi Parsa , A. Ahani , Evaluation of near-fault ground motions on seismic behavior of the movable folding bridges , Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3967-3988.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20930.7588



