تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴

DOI: 10.48303/bese.2024.2031300.1165

نوع مقاله: یادداشت فنی

ارزیابی رفتار لرزه‌ای پل بتنی با در نظر گرفتن تأثیر هندسه پایه میانی

بهزاد حاصلی (نویسنده مسئول)

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران، Std_haseli@khu.ac.ir

محمدرضا مظفرپور طارمی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

پل‌ها به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین ارکان در سیستم حمل‌ونقل به شمار می‌آیند که نقش مهمی در اقتصاد یک منطقه ایفا می‌کنند. هدف اصلی در پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار لرزه‌ای پل بتنی سه‌دهانه، با توجه به هندسه‌ی پایه میانی پل می‌باشد، لذا پس از صحت‌سنجی و اطمینان از روند مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار OpenSees، در مرحله‌ی اول پژوهش، مطلوب‌ترین مقطع هندسی پایه‌ی میانی پل شناسایی شده و در مرحله دوم پژوهش، با توجه به این نکته که احداث پل همواره به‌صورت منظم میسر نخواهد بود، تأثیر نامنظمی بر عملکرد لرزه‌ای پل مورد مطالعه، ارزیابی شده است. لذا در این مطالعه، رفتار لرزه‌ای یک نمونه پل سه‌دهانه بتنی در سه حالت مدل‌سازی پایه میانی با مقطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی در محیط نرم‌افزار OpenSees، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، مطلوب‌ترین عملکرد لرزه‌ای پل مربوط به حالتی است که در آن پایه‌های میانی پل، دارای مقطع دایره‌ای شکل بوده است. سایر نتایج این پژوهش مؤید آن است که ایجاد نامنظمی (ارتفاع نابرابر پایه‌های میانی) اثرات نامطلوبی بر عملکرد لرزه‌ای پل خواهد داشت.

واژگان کلیدی: رفتار لرزه‌ای پل، نامنظمی، شکل هندسی پایه میانی، زلزله حوزه نزدیک.

۱- مقدمه

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه پل، به ازای پارامترهای مختلف، منجر به درک بهتر از رفتار سازه و در نهایت دستیابی به طرح اقتصادی، ایمن و پایدار از این سازه خواهد شد. کشور ایران بر روی یکی از خطرپذیرترین مناطق دنیا استقرار یافته و احتمال وقوع خسارات ناشی از بارگذاری زلزله در آن به‌شدت بالاست. توجه به این نکته ضروری است که احداث پل همواره به‌صورت منظم میسر نخواهد بود. در مواقعی با توجه به محدودیت‌های اجرایی و شرایط توپوگرافی منطقه‌ی مد نظر، احداث سازه به‌صورت نامتقارن انجام خواهد شد. با توجه به اینکه هدف اصلی در پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پل سه‌دهانه‌ی بتنی با در نظر گرفتن تأثیر هندسه‌ی پایه میانی است، پس از صحت‌سنجی و اطمینان از نحوه‌ی مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار OpenSees، در مرحله‌ی اول از پژوهش حاضر، مطلوب‌ترین مقطع هندسی پایه‌ی میانی پل شناسایی شده است. به همین منظور پل سه‌دهانه بتنی در سه حالت مدل‌سازی پایه میانی با مقطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی تحلیل شده و بر اساس پاسخ‌های بررسی شده، مطلوب‌ترین سطح مقطع شناسایی شده است. در مرحله دوم از این پژوهش، بررسی تأثیر نامنظمی بر عملکرد لرزه‌ای پل مورد مطالعه ارزیابی قرار گرفته است. در این حالت ارتفاع پایه‌های میانی در سه حالت مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در مدل منظم ارتفاع پایه‌های میانی یکسان و برابر ۷/۱۳ در نظر گرفته شده است. در ادامه مدل نامنظم با درجه ۲ و ۳ به ترتیب به شرایطی اطلاق شده که در آن ارتفاع پایه‌ی میانی کوتاه‌تر به ترتیب برابر با ۳/۵۶ و ۲/۳۸ متر در نظر گرفته شده است. مطالعات نشان می‌دهد رفتار پل‌های با هندسه‌ی نامنظم (پل‌های دارای پایه‌های میانی با هندسه‌ی مختلف) در مقایسه با پل‌های منظم (پل‌های دارای پایه‌های میانی با هندسه‌ی یکسان)، در معرض رکوردهای زلزله بحرانی‌تر است

و مود غالب در رفتار این دسته از پل‌ها (پل‌های نامنظم)، مود پیچشی می‌باشد (Jara et al., 2015). در سال‌های اخیر شاهد توسعه‌ی احداث و طراحی انواع مختلف پل به‌منظور بهبود و ارتقای وضعیت حمل‌ونقل و کنترل ترافیک در اقصی نقاط کشور بوده‌ایم. در بسیاری موارد به دلیل محدودیت‌های موجود ناگزیر به احداث و طراحی پل با شکل‌های هندسی متفاوتی از پایه‌های میانی خواهیم بود. از طرفی با توجه به استقرار کشور بر روی کمربند لرزه‌ای، پتانسیل وقوع زلزله در شهرهای مختلف بسیار زیاد است. با بررسی زلزله‌های پیشین مشاهده می‌شود، پایه‌های میانی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی در سازه‌ی پل، نقش مهمی در پایداری و سلامت سازه بر عهده خواهد داشت. همان‌طور که تجربیات گذشته نشان می‌دهد، با تخریب پایه‌های میانی، پل در آستانه‌ی فروریزش و تخریب کامل قرار خواهد گرفت (Rodriguez, 2012). این موضوع با توجه به سختی جانبی کمتر پایه‌های میانی در مقایسه با عرشه و کوله‌های انتهایی، قابل توجیه است. وجود محدودیت‌های اجرایی، عوارض و موانع طبیعی و... از جمله مهم‌ترین عواملی است که موجب ایجاد بروز نامنظمی در سازه‌ای مانند پل می‌شود. نامنظمی هندسی ایجاد شده در پل می‌تواند به‌صورت دهانه با طول نابرابر، پایه میانی با ارتفاع نابرابر و مقطع متفاوت عرشه در طول پل باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، وجود نامنظمی می‌تواند پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های مختلف را دستخوش تغییر کند. ارزیابی رفتار سازه‌های مختلف در برابر بار زلزله، می‌تواند منجر به درک بهتر رفتار سازه در شرایط وقوع زلزله شده و به در نهایت دستیابی به یک طرح ایده‌آل و مهندسی را به همراه داشته باشد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- نابرابری ارتفاع پایه‌های میانی پل

یکی از مرسوم‌ترین انواع نامنظمی هندسی در میان انواع مختلف پل، نامنظمی ارتفاع پایه‌های میانی پل است. در این حالت درجه‌ی نامنظمی برابر است با نسبت ارتفاع هر ستون دلخواه به ارتفاع کوتاه‌ترین ستون. بر اساس راهنمای مشخصات آشتو که برای طراحی لرزه‌ای پل‌ها استفاده می‌شود، درصورتی‌که برخی از شرایط مربوط به تعداد دهانه‌ها، حداکثر نسبت طول دهانه‌ها و نسبت‌های سختی پایه رعایت شود، پل منظم تلقی می‌شود، به‌بیان‌دیگر برای منظمی لازم است دو رابطه (۱) و (۲) برقرار باشد. رابطه (۱) برای پایه‌های دارای چند ستون و رابطه (۲) برای پایه‌های تک‌ستونی برقرار است، درحالی‌که اگر پلی چنین الزاماتی را رعایت نکند، در دسته‌ی پل‌های نامنظم دسته‌بندی خواهد شد که در آن k_i^e سختی مؤثر کوچک‌ترین ستون و k_j^e سختی مؤثر بزرگ‌ترین ستون می‌باشد (Tehrani and Kaleybar, 2021).

$$\frac{k_i^e}{k_j^e} \geq 0.5 \qquad (۱)$$

$$\frac{k_i^e}{k_j^e} \geq 0.75 \qquad (۲)$$

۲-۲- سطح مقطع مختلف پایه‌های میانی پل

در بررسی رفتار لرزه‌ای یک پل مستقیم، با توجه به تفاوت سختی عرشه و پایه‌های میانی، می‌توان عرشه و روسازه‌ی پل را صلب در نظر گرفت. لذا در این حالت رفتار دینامیکی سازه تحت اعمال هر نوع بارگذاری جانبی به ارتفاع و سطح مقطع پایه‌های میانی مربوط خواهد بود. در این شرایط، پایه‌های میانی مانند فنرهای موازی عمل کرده که سختی معادل در آنها، با جمع جبری سختی خمشی تک‌تک پایه‌های میانی حاصل می‌شود. سختی خمشی در پایه‌های میانی به مدول الاستیسیته، ممان اینرسی و ارتفاع پایه‌های میانی وابستگی دارد. لذا با تغییر شکل هندسی سطح مقطع پایه‌های میانی شاهد تغییر در پارامتر ممان اینرسی مقطع شده و در نتیجه، سختی خمشی پایه‌های میانی دستخوش تغییر خواهد شد. در نتیجه، عملکرد لرزه‌ای سازه‌ی پل دچار تغییر شود. با فرض یکسان بودن مساحت سطح مقطع پایه‌های میانی در حالت‌های مختلف به کار رفته در پژوهش حاضر، می‌توان ممان اینرسی مقاطع مربعی، مستطیلی و دایره‌ای را به ترتیب به شکل روابط (۳) تا (۵) ارائه نمود. در این روابط a، طول ضلع مقطع مربعی، b و h ابعاد مقطع مستطیلی و r شعاع

مقطع دایره‌ای است.

$$I_{squ} \geq \frac{a^4}{12} \quad (۳)$$

$$I_{rec} \geq \frac{bh^2}{12} \quad (۴)$$

$$I_{cir} \geq \frac{\pi r^3}{4} \quad (۵)$$

۳- پیشینه‌ی پژوهش

جارا و همکاران (Jara et al., 2015) در سال ۲۰۱۵ میلادی در پژوهشی به بررسی عملکرد لرزه‌ای پل‌های نامنظم با دهانه‌ی متوسط پرداختند. در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر نوع خاک بر روی عملکرد سازه، اقدام به تحلیل و طراحی پل‌های نامنظم بر روی دو نوع خاک نرم و سخت شد. نامنظمی پل‌ها در این پژوهش با تغییر ارتفاع پایه‌های میانی در سه چیدمان مختلف پل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان داد، شاخص خرابی در راستای طولی و عرضی پل‌های نامنظم متفاوت از یکدیگر حاصل شده و رفتار سازه در راستای طولی بحرانی‌تر است. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد، نوع نامنظمی (نسبت ارتفاع ستون‌های میانی) به‌عنوان پارامتری مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای پل مطرح است و شاخص خرابی در پایه‌های میانی پل، در شرایطی که سازه بر روی خاک نرم مستقر باشد ۶۰ درصد بیشتر از حالتی که است که پل بر روی خاک سخت احداث شده است (در راستای طولی). این اختلاف در راستای عرضی پل کمتر از ۱۰ درصد برآورد شده است. جمای و همکاران (Djemai et al., 2019) در پژوهشی به بررسی تأثیر نوع و ارتفاع پایه‌های میانی بر عملکرد لرزه‌ای پل‌های بتن مسلح پرداختند. در این پژوهش پایه‌های میانی در دو حالت کلی مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفتند. در حالت اول پایه‌های میانی به‌صورت سه ستون دایره‌ای به‌صورت گروهی و در حالت دوم پایه میانی به شکل دیوار صلب مدل‌سازی شده‌اند. همچنین ارتفاع میانی پایه‌های میانی برابر با ۶، ۹ و ۱۲ متر در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد، مدل‌سازی پایه‌ی میانی به شکل دیوار صلب، موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای پل شده است. همچنین سایر نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، با افزایش ارتفاع پایه میانی، شاهد افزایش جابه‌جایی عرشه و افزایش نیاز لرزه‌ای در سازه خواهیم بود.

پهلوان و همکاران (Pahlavan et al., 2018) در پژوهشی به ارزیابی اثر ارتفاع ستون و تعداد دهانه بر روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های قوسی چند دهانه عرشه باکس بتن‌آرمه پرداختند. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر اختلاف ارتفاع پایه‌های پل و تعداد دهانه در رفتار لرزه‌ای پل‌های قوسی است. به همین منظور پنج پل با تعداد دهانه‌ها و ارتفاع پایه‌های متفاوت در محیط نرم‌افزار CSI Bridge مدل‌سازی شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش ارتفاع ستون‌ها و کاهش تعداد دهانه‌ها موجب افزایش تغییر مکان نسبی پل و افزایش میزان آسیب‌پذیری پل‌ها می‌شود.

سلطانیه و همکاران (Soltanieh et al., 2018) در پژوهشی به بررسی عملکرد لرزه‌ای کوله پل‌های نامنظم در ارتفاع بر اثر اعمال زلزله در راستاهای مختلف پرداختند. در این مطالعه، مدل‌های سه‌بعدی پنج پل دارای نوع و درجه‌ی نامنظمی مختلف، تحت ۲۲ جفت شتاب‌نگاشت زلزله که هرکدام در ۷ زاویه‌ی تحریکات لرزه‌ای دوران داده شده‌اند. بیش از ۱۴۵۰۰ عدد تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی برای رساندن سیستم‌های پل‌های معرفی شده به آسیب حد فروپاشی انجام شده و عملکرد اعضای مختلف پل مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد زاویه‌ی بحرانی برخورد تحریکات لرزه‌ای با تغییر مدل‌ها و حالت‌های حدی تغییر می‌کند. تأثیر تغییر زاویه‌ی اعمال شتاب‌نگاشت‌ها در هفت زاویه‌ی بررسی شده (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) برای اعضای مختلف کوله متفاوت است.

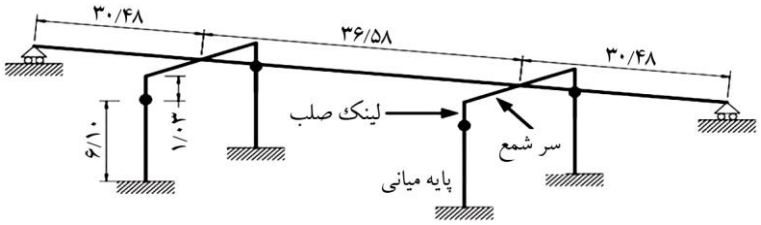
بیشترین اثرگذاری زاویه برخورد تحریکات روی تغییر شکل خاک کوله با شرایط SSI[1] (در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک) حاصل شده است. از دیگر نتایجی که با مقایسه‌ی عملکردی اعضای کوله در سطوح آسیب مختلف به‌دست‌آمده،

این است که بیشترین اختلاف بین مقادیر میانه به دلیل تغییر زاویه‌ی اعمال زلزله در شرایط لحاظ نمودن اندرکنش خاک، روی مدل‌های دارای درجه نامنظمی ۳ بیشتر است و این اختلاف در شرایط تکیه‌گاه ثابت روی درجه‌ی نامنظمی ۲، بیشتر به چشم می‌خورد. طهرانی و کلیبر (Tehrani and Kaleybar, 2021) در پژوهشی، به پیش‌بینی تقاضای لرزه‌ای پل‌های بتنی نامنظم در دهانه و ارتفاع ستون با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی و غیرخطی پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد، میانگین تقاضای لرزه‌ای دریفت غیرخطی با تحلیل تاریخچه زمانی تحت ۲۲ رکورد زلزله در جهت عرضی در ستون‌های کوتاه در پل‌های نامنظم بیشتر از تقاضای لرزه‌ای دریفت خطی آنهاست که نشان‌دهنده رفتار نامنظم‌تر پل‌ها در جهت عرضی به دلیل درجه آزادی بیشتر ستون‌ها در این راستا نسبت به راستای طولی است.

حاصلی و همکاران (Haseli et al., 2024) در پژوهشی به ارزیابی تأثیر هندسه‌ی پایه میانی بر عملکرد لرزه‌ای پل‌های بتنی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد، با تغییر هندسه پایه میانی و درجه نامنظمی، عملکرد لرزه‌ای پل به‌شدت دستخوش تغییر می‌شود. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد، تغییر سطح مقطع و ارتفاع پایه‌های میانی موجب تغییر در رفتار لرزه‌ای سازه پل می‌شود. لذا بررسی و ارزیابی تأثیر هندسه‌ی پایه‌ی میانی بر عملکرد لرزه‌ای پل، موضوع مهمی است که مستلزم انجام مطالعات جامع و کامل‌تری در این حوزه می‌باشد.

۴- معرفی مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

پل روگذر بزرگراهی مدل‌سازی شده در این پژوهش، دارای یک مسیر رفت و یک مسیر برگشت کاملاً متقارن و مشابه است و بین این دو مسیر هیچ‌گونه اتصال و قیدی وجود ندارد. طول کل پل ۹۷/۵۴ متر است. این پل دارای سه دهانه است که طول دو دهانه‌ی ابتدایی و انتهایی آن ۳۰/۴۸ متر و طول دهانه‌ی میانی آن برابر ۳۶/۵۸ متر می‌باشد. این پل بزرگراهی دارای دو پایه‌ی تکیه‌گاهی بتن مسلح برای عرشه که هر پایه دارای دو ستون می‌باشد. فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های هر پایه ۵/۶۴۱ متر بوده و ستون‌های میانی دایروی شکل هستند. قطر ستون‌ها ۱/۲۱۹ متر و ضخامت پوشش آرماتور ۵/۰۸ سانتی‌متر است. در شکل (۱) ساختار پل مورد مطالعه در پژوهش حاضر نمایش داده شده است. همچنین در جدول (۱) حالت‌های مختلف مدل‌سازی در پژوهش حاضر معرفی شده است.



شکل (۱): ساختار و هندسه‌ی پل مورد مطالعه در پژوهش حاضر.

جدول (۱): معرفی حالت‌های مختلف مورد مطالعه در پژوهش حاضر

نام مدل	ارتفاع پایه میانی P1	ارتفاع پایه میانی P2			A (متر مربع)
Bcir	۷/۱۳	۷/۱۳	شکل هندسی مقطع	دایره‌ای	۱/۱۶
Bsqu	۷/۱۳	۷/۱۳		مربعی	۱/۰۸×۱/۰۸
Brec	۷/۱۳	۷/۱۳		مستطیلی	۱/۶۶×۰/۷
BR1	۷/۱۳	۷/۱۳	درجه نامنظمی (HP1/HP2)	۱	شکل هندسی بهینه انتخاب شده
BIR2	۷/۱۳	۳/۵۶		۲	
BIR3	۷/۱۳	۲/۳۸		۳	

لازم به ذکر است، برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی در پژوهش حاضر، از شش رکورد شامل سه رکورد حوزه نزدیک و سه رکورد حوزه دور استفاده شده است.

مطابق آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله (نشریه ۴۶۳، ۲۰۰۸) به‌منظور محاسبه‌ی نیروی افقی زلزله برای پل‌های شهری، اعم از راه و راه‌آهن باید حداقل نصف بار زنده عادی منظور شود. در این بخش، به محاسبه‌ی بارهای زنده و بهره‌برداری پل مد نظر مطابق با دستورالعمل آیین‌نامه آشتو (AASHTOO, 2007) برای پل خواهیم پرداخت. مطابق آیین نامه آشتو، ویژگی طراحی کامیون عبارت است از دو محور نیرویی ۱۴۲ کیلو نیوتنی (Kip32) با فاصله متغیر ۴/۲۶۷ متر (ft14) تا ۹/۱۴۴ متر (ft30) برای دو محور عقب و ۳۵/۵۸۵ کیلونیوتنی (Kip8) برای محور جلو بافاصله‌ی ۴/۲۶۷ متر (ft14) از محور وسط کامیون است. این کامیون باید در طول پل حرکت کرده و در هر موقعیت مکانی که بیشترین عکس‌العمل قائم را برای تکیه‌گاه‌ها ایجاد کند، بار زنده تکیه‌گاه‌ها ناشی از این طرح بارگذاری به دست می‌آید.

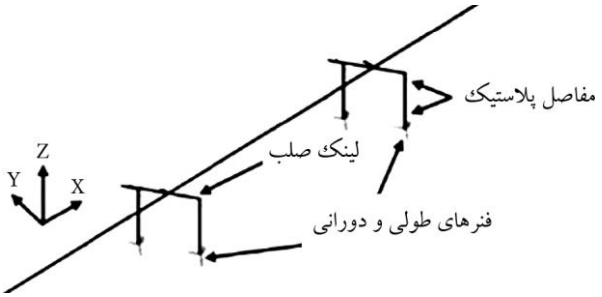
همچنین ویژگی طراحی دو بار یکسان پشت سر هم عبارت است از دو بار یکسان ۱۱۱/۲۰۶ کیلونیوتن (kip25) پشت سر هم به فاصله ۱/۲۲ متر از یکدیگر که باید در طول پل حرکت کرده و در هر موقعیت مکانی که بیشترین عکس العمل قائم برای تکیه‌گاه‌ها ایجاد شد، بار زنده‌ی تکیه‌گاه‌ها ناشی از این طرح بارگذاری به دست می‌آید.

لازم به ذکر است، در این مطالعه کوله‌ها به‌صورت بی‌نهایت صلب فرض شدند. با این فرض تمام درجات آزادی گره‌های متصل شده به کوله‌ها کاملاً مقید شدند، به‌نحوی‌که جابه‌جایی در هیچ‌یک از درجات آزادی آنها اتفاق نمی‌افتد. در مدل‌سازی ستون و سر ستون پایه‌های پل به ترتیب از المان‌های تیر- ستون غیرخطی[۲] و المان‌های تیر- ستون الاستیک[۳] با استفاده از مقاطع فایبر استفاده شده است (آیین نامه آشتو، الزام دارد که پاسخ لرزه‌ای رو سازه و زیر سازه پل به‌صورت کاملاً الاستیک باقی بماند). در این مقاطع فایبر[۴] از مصالح یک‌بعدی غیرخطی تعریف شده برای مدل‌سازی رفتار بتن محصور شده و محصور نشده و همچنین میلگردهای فولادی ستون‌ها و سرستون‌ها استفاده شده است. در این مطالعه، کل جرم سرستون به‌علاوه نصف جرم ستون‌های هر پایه به‌منظور انجام آنالیز غیرخطی و تاریخچه زمانی غیرخطی، به‌عنوان جرم زیر سازه در مدل‌سازی پایه‌ای پل لحاظ شده است. برای مدل‌سازی شاه‌تیرهای سرتاسری طولی و دال بتن آرمه قرار گرفته بر روی آنها، از یک المان تیر-ستون الاستیک استفاده شده است.

۵- صحت‌سنجی

به‌منظور اطمینان از نحوه‌ی مدل‌سازی ارائه شده در این مطالعه، سازه مورد مطالعه در مرجع (Kim et al., 2017) در محیط نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شده و صحت نحوه‌ی مدل‌سازی سازه در این پژوهش بررسی شده است. به همین منظور پریود سه مود اصلی سازه مدل شده در این پژوهش، با مقدار عددی پریود محاسبه شده توسط محققان قبلی مقایسه شده است. برای مدل‌سازی مصالح بتن محصور نشده از ماده بتن یک‌بعدی کنت- اسکات- پارت با مقاومت کششی صفر (Concrete01) که سختی آن در باربرداری و بارگذاری به‌صورت خطی افت می‌کند، استفاده شده است. برای مصالح بتن محصور شده نیز از ماده بتن یک‌بعدی (Concrete03) با مقاومت فشاری بتن محصور شده، مقاومت کششی و نرم‌شوندگی کششی غیرخطی استفاده شده است.

به‌منظور مدل‌سازی رفتار میلگردهای فولادی مصالح بتن‌آرمه از ماده فولادی یک‌بعدی دو خطی (Steel01) با سخت‌شوندگی سینماتیک و سخت‌شوندگی ایزوتروپیک اختیاری استفاده شده است. مسلماً هرچه اختلاف مقادیر عددی یاد شده کمتر باشد، دقت و سلامت مدل‌سازی محرزتر خواهد بود. در شکل (۲) پل مدل شده توسط کیم و همکاران نمایش داده شده است. پریود اصلی سازه بر اساس مطالعات آنها برابر با ۰/۳۵۱۵ ثانیه است. پارامتر یاد شده بر اساس مطالعات و مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق برابر با ۰/۳۶۹۱ ثانیه است.



شکل (۲): پل مدل شده توسط کیم و همکاران.

جدول (۲): مقایسه پریود به‌منظور صحت‌سنجی.

اختلاف نتایج محققین با پژوهش حاضر (٪)	پریود اصلی (T)	مطالعات محققان
۴/۷	۰/۳۵۱۵	کیم و همکاران (Kim et al., 2017)
۳/۴	۰/۳۵۶۵	حاصلی و نوری (Haseli & Nouri, 2016)
-	۰/۳۶۹۱	نتیجه پژوهش حاضر

مطالعات حاصلی و همکاران (Haseli et al., 2024) نیز نشان می‌دهد، پریود مود اصلی این نمونه پل (پل مورد مطالعه جهت صحت‌سنجی) برابر با ۰/۳۵۶۵ ثانیه حاصل شده است. مطابق با جدول (۲) مشاهده می‌شود اختلاف پاسخ‌ها ۳/۴ تا ۴/۷ درصد می‌باشد. این اختلاف ناچیز قابل‌چشم‌پوشی بوده و نشان از دقت بالای نحوه‌ی مدل‌سازی در این مطالعه دارد.

لازم به ذکر است، برای مدل‌سازی ستون، از المان‌های تیر ستون غیرخطی و برای مدل‌سازی روسازه، از المان تیر ستون خطی استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی عرشه از المان صلب نیز استفاده شده است. در تمام سرستون‌ها از مفاصل پلاستیک و در تکیه‌گاه‌ها از فنرهای دورانی و انتقالی استفاده شده است. صلبیت کوله‌ها بی‌نهایت در نظر گرفته شده است.

۶- معرفی رکوردهای زلزله

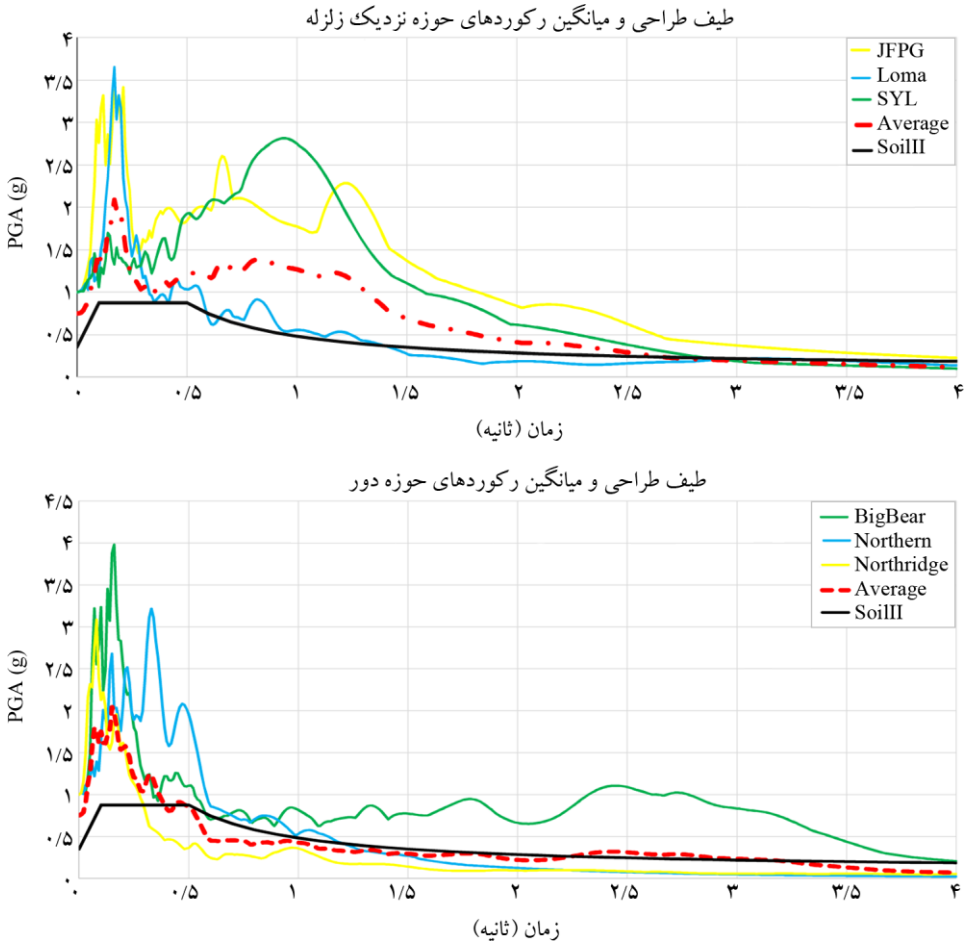
خاک ساختگاه پل موردمطالعه در این تحقیق، خاک نوع ۲ آیین نامه ۲۸۰۰ ایران فرض شده است. به این منظور، در انتخاب شتاب‌نگاشت‌های زلزله سعی شد این شتاب‌نگاشت‌ها تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل فرضی احداث پل موردمطالعه در زلزله باشد. برای نیل به این هدف، دو دسته سه‌تایی زوج شتاب‌نگاشت متعلق به مؤلفه‌های افقی سه زلزله مختلف حوزه نزدیک[۵] و سه زلزله مربوط به حوزه دور[۶] با ویژگی‌های مشابه، انتخاب شده است.

به‌منظور انتخاب شتاب‌نگاشت‌های زلزله جهت تحلیل سازه پل، پالس‌های موجود در مؤلفه‌های سرعت و جابه‌جایی رکوردهای زلزله به‌صورت چشمی با یکدیگر مقایسه شدند و رکوردهایی که تعداد پالس‌های بیشتر و قوی‌تری داشتند، انتخاب شدند. این نگاشت‌های زلزله از پایگاه اطلاعات زلزله PEER دریافت شد.

درمجموع سه رکورد زلزله حوزه نزدیک و سه رکورد حوزه دور انتخاب شد که مشخصات آنها در جدول (۳) ارائه‌شده است. در شکل (۳) طیف طرح و طیف میانگین دسته رکورد حوزه نزدیک و دور ارائه شده است.

جدول (۳): مشخصات رکوردهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر

	رکورد زلزله	بزرگای زلزله	PGA	VS(30)	سال وقوع
حوزه دور	Big Bear	۴/۷	۰/۵۳۱	۴۵۱/۲	۱۹۹۲
	Northern	۵/۷	۰/۵۶۱	۶۲۲/۳۱	۱۹۴۱
	Northridge	۶/۷	۰/۴۶۳	۵۲۵/۷۹	۱۹۹۴
حوزه نزدیک	Northridge-JFPG	۶/۷	۰/۴۱۶	۵۲۵/۷۹	۱۹۹۴
	Loma Prieta	۶/۹۳	۰/۳۱۶	۳۸۰/۸۹	۱۹۸۹
	Northridge –Syl	۶/۹۳	۰/۴۴۰	۳۷۰/۵۲	۱۹۹۴



شکل (۳): طیف طراحی و طیف میانگین رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور.

۷- تحلیل نتایج

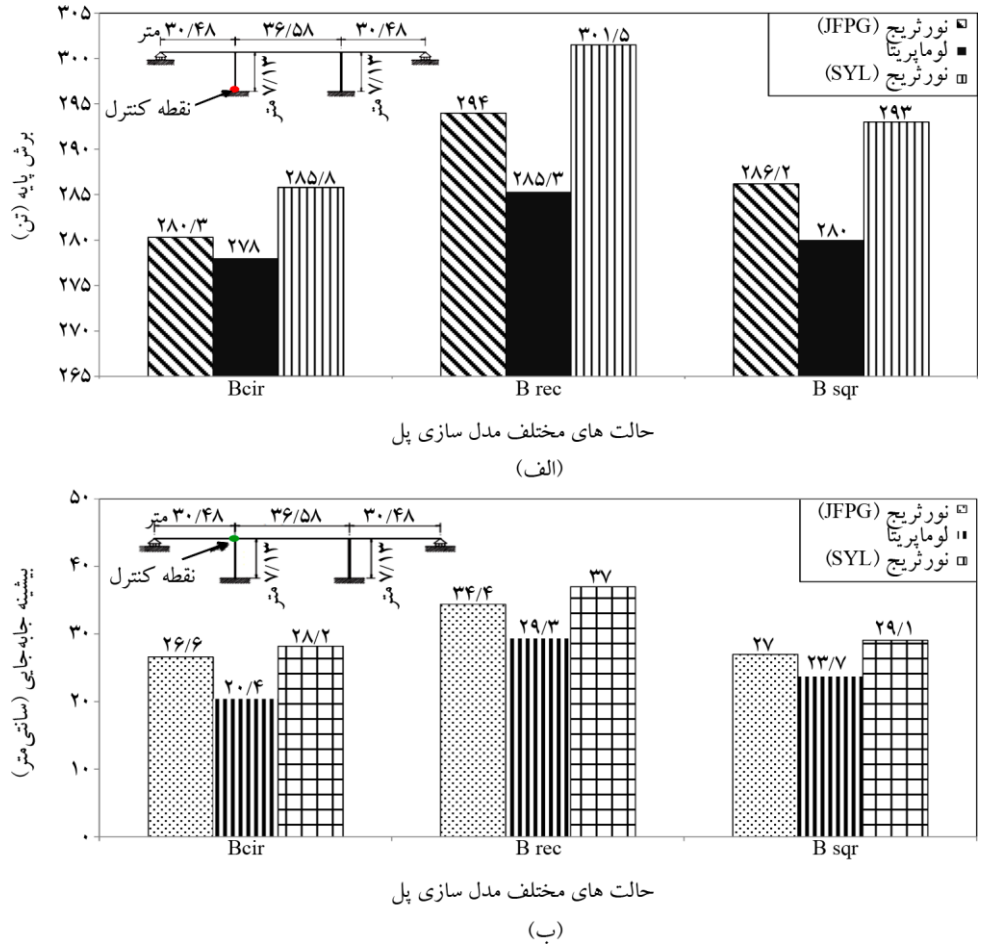
لازم به ذکر است، با توجه به تعداد بالای نتایج به‌دست‌آمده از شش رکورد زلزله، نتایج به ازای رکوردهای حوزه نزدیک نمایش داده شده است. توجه به این نکته ضروری است که سازه پل، تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک در مقایسه با رکوردهای حوزه دور، رفتار بحرانی‌تری از خود نشان می‌دهد. علت این موضوع، انطباق محور دپریودیک پل بر نواحی پردامنه رکوردهای حوزه نزدیک در طیف فوریه است. لذا نتایج بررسی شده، تنها برای رکوردهای حوزه نزدیک، ارائه شده است. اولین پاسخ بررسی شده در پژوهش حاضر، برش پایه‌ی ثبت شده در پایه‌های میانی است. با توجه به تقارن هندسی پل و نبود هیچ نوع نامنظمی در ساختار پل، پاسخ‌های ثبت شده در هر یک از پایه‌های میانی برابر و یکسان است. لذا نتایج بررسی شده مربوط به تک‌ستون از پایه میانی سمت چپ پل می‌باشد.

در شکل (۴-الف) برش پایه‌ی ثبت شده در نقطه‌ی کنترلی به ازای سه حالت مختلف مدل‌سازی پل (پل با مقطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی) تحت اثر سه رکورد مورد مطالعه در پژوهش حاضر، نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، با تغییر سطح مقطع پایه‌های میانی از حالت دایره به مربع، شاهد افزایش ۲/۴۶ درصدی برش پایه در ستون خواهیم بود. این روند افزایشی در ازای تبدیل سطح مقطع دایره‌ای به سطح مقطع مستطیلی برابر با ۵/۲۱ درصد حاصل شده است. هرچه برش پایه‌ی ثبت شده در سازه، کمتر باشد، سازه در هنگام وقوع زلزله، در معرض آسیب کمتری قرار دارد و پتانسیل آسیب‌پذیری کمتری در مقابل بار جانبی خواهد داشت. بر این اساس در بین سه مدل بررسی شده، می‌توان مطلوب‌ترین شکل هندسی پایه‌ی میانی پل را حالت دایره‌ای در نظر گرفت. دیگر پاسخ مورد بررسی در پژوهش حاضر، بیشینه جابه‌جایی عرشه در

محل اتصال به پایه‌ی میانی پل سه‌دهانه است. معیار تعیین مطلوب‌ترین حالت مدل‌سازی، کمینه شدن مقدار عددی جابه‌جایی ثبت شده در نقطه‌ی کنترلی می‌باشد.

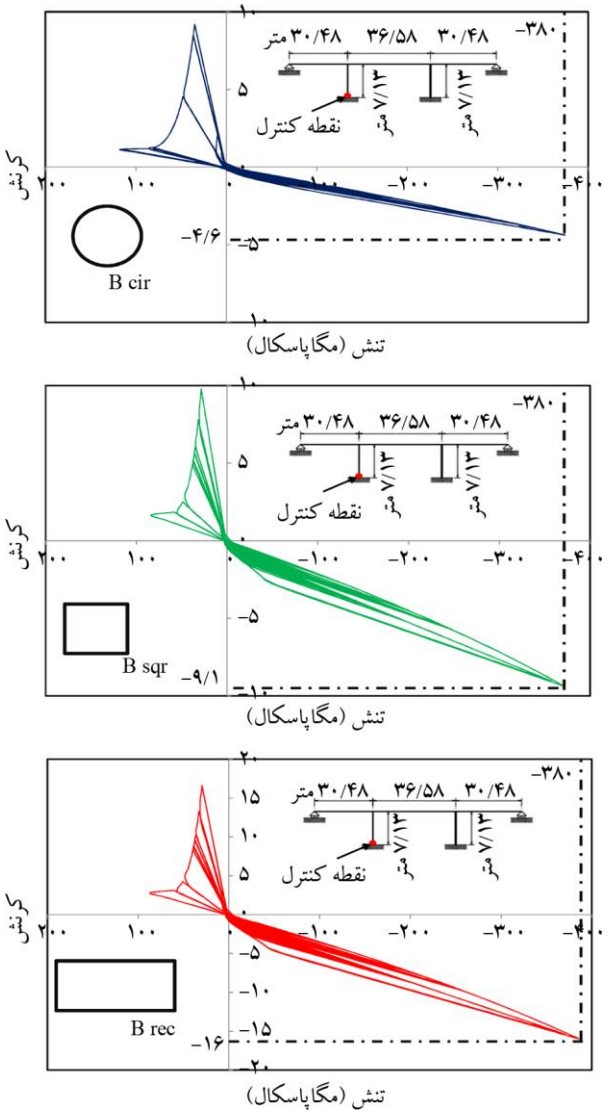
در شکل (۴-ب) بیشینه جابه‌جایی ثبت شده به ازای سه حالت مختلف مدل‌سازی و به ازای سه رکورد مختلف زلزله نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، بیشترین پاسخ‌ها به ازای اعمال رکورد زلزله‌ی سیلمار حاصل شده است. مشاهده می‌شود، بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل‌سازی پل با پایه‌ی میانی دایره‌ای شکل، برابر با ۲۸/۲ سانتی‌متر ثبت شده است. درحالی‌که بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل‌سازی پایه میانی به‌صورت مربع و مستطیل به ترتیب برابر با ۲۹/۱ و ۳۷ سانتی‌متر حاصل شده است. با توجه به اینکه کمترین مقدار عددی جابه‌جایی، به ازای مدل‌سازی پل با پایه‌ی میانی دایره‌ای شکل حاصل شده است، لذا بر اساس معیار جابه‌جایی، می‌توان مطلوب‌ترین شکل هندسی مقطع تخصیص‌یافته به پایه‌ی میانی را، مقطع دایره‌ای در نظر گرفت. با تغییر سطح مقطع دایره‌ای به مقطع مربعی در پل سه‌دهانه‌ی مورد مطالعه، بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در پایه‌ی میانی ۳/۱ درصد افزایش یافته است. همچنین با تغییر سطح مقطع پایه‌های میانی از حالت دایره به حالت مستطیل، شاهد افزایش ۲۳/۸ درصدی جابه‌جایی پایه‌ی میانی خواهیم بود.

علت این موضوع با توجه به تقارن تمام محورها در خصوص مقطع دایره‌ای و تقارن محور طولی و عرضی در خصوص مقطع مربعی توجیه نمود. در خصوص مقطع مستطیلی ممان اینرسی حول محور طولی قابل توجه و حول محور عرضی بسیار ناچیز است. لذا بیشترین جابه‌جایی ثبت شده در پل، به ازای شرایطی حاصل شده که در آن، پایه‌ی میانی پل، به‌صورت مستطیلی مدل‌سازی شده است.



شکل (۴): (الف) بررسی تأثیر شکل هندسی مقطع پایه میانی بر برش پایه و (ب) بررسی تأثیر شکل هندسی مقطع پایه میانی بر بیشینه جابه‌جایی عرشه.

سومین پاسخ مورد بررسی در پژوهش حاضر، منحنی تنش کرنش ایجاد شده در پایه‌ی میانی پل مورد مطالعه است. مطلوب‌ترین حالت در منحنی تنش کرنش، به ازای شرایطی حاصل می‌شود که بیشترین تنش اعمالی، منجر به کمترین کرنش در ساختار سازه شود. به‌بیان‌دیگر، هرچه گستردگی منحنی تنش-کرنش در راستای محور طولی حاصل شود، شرایط پایداری سازه بالاتر است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بیشینه پاسخ سازه در میان سه رکورد اعمالی، مربوط به رکورد زلزله‌ی نورثریج ایستگاه سیلمار خواهد بود. لذا در ادامه منحنی تنش-کرنش به ترتیب برای سه حالت مدل‌سازی پل با پایه‌ی میانی دایره‌ای، مربعی و مستطیلی در شکل (۵) به ازای اعمال رکورد سیلمار ارائه شده است. با توجه به اینکه بتن در فشار عمل می‌کند، در منحنی تنش کرنش ربع چهارم مورد توجه خواهد بود. مشاهده می‌شود، در این منحنی، به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکال، حداکثر کرنش ثبت شده در پایه‌ی میانی با مقطع دایره‌ای برابر با ۴/۶ میلی‌متر حاصل شده است؛ درحالی‌که در منحنی ظرفیت مربوط به پل مدل شده با پایه‌ی میانی مربعی شکل، به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکال، بیشینه کرنش ثبت شده در پایه میانی برابر با ۹/۱ میلی‌متر حاصل شده است. همچنین بر اساس منحنی تنش کرنش مربوط به پل مدل شده با پایه‌ی میانی مستطیلی، به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکالی، حداکثر کرنش ثبت شده در پایه‌ی ستون برابر با ۱۶ میلی‌متر حاصل شده است. هرچه کرنش ثبت شده به ازای تنش اعمالی به پل، مقدار عددی بیشتری باشد، احتمال وقوع آسیب در پایه‌ی میانی پل، بالاتر خواهد بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، با تغییر سطح مقطع پایه‌های میانی از حالت دایره به مربع، حداکثر کرنش ثبت شده در سازه را ۴۹/۴ درصد افزایش داده است. همچنین با تغییر سطح مقطع پایه‌های میانی از حالت دایره به مستطیل، بیشینه کرنش ثبت شده در پایه‌ی میانی پل، ۷۱/۲۵ درصد افزایش یافته است. لذا بر اساس معیار منحنی تنش-کرنش، مطلوب‌ترین شکل سطح مقطع پایه میانی در پل سه‌دهانه‌ی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، مقطع دایره‌ای می‌باشد.



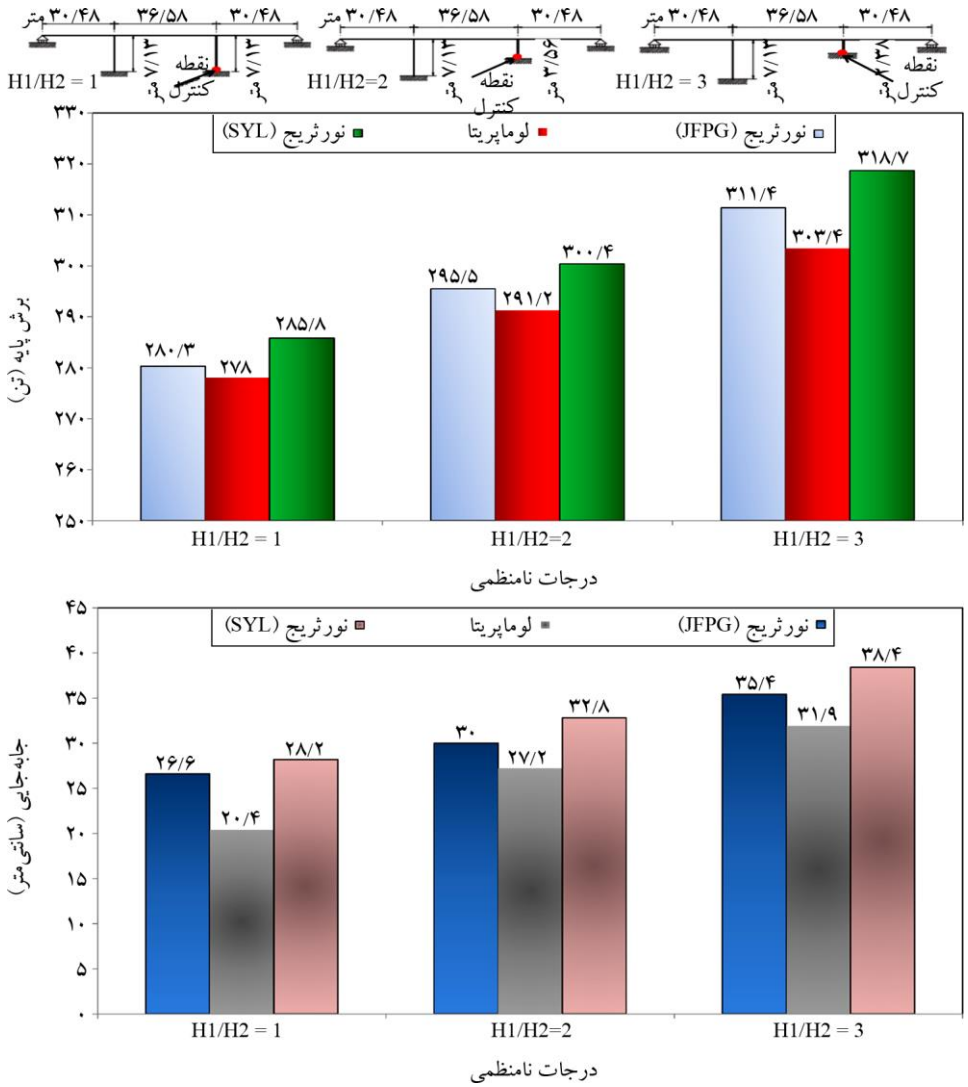
شکل (۵): منحنی تنش-کرنش پایه‌ی میانی پل مدل شده با مقاطع مختلف تحت اثر رکورد زلزله سیلمار.

پس از بررسی تأثیر هندسه‌ی سطح مقطع پایه‌های میانی پل بر روی عملکرد لرزه‌ای و تعیین سطح مقطع دایره‌ای شکل به‌عنوان مطلوب‌ترین پل شکل هندسی پایه‌های میانی، به بررسی تأثیر نامنظمی بر عملکرد لرزه‌ای پل خواهیم پرداخت. بر اساس شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، بیشینه برش پایه‌ی ثبت شده در پایه‌ی میانی پل (نقطه کنترلی نمایش داده شده) در حالت منظم (در این حالت ارتفاع هر دو پایه برابر با ۷/۱۳ متر است) برابر با ۲۸۵/۸ تن حاصل شده است؛ درحالی‌که بیشینه برش پایه ثبت شده به ازای درجات نامنظمی ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۰۰/۴ و ۳۱۸/۷ تن حاصل شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با

ایجاد نامنظمی در پل، شاهد افزایش برش پایه‌ی ثبت شده در پایه میانی پل خواهیم بود. لذا بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود با افزایش درجه نامنظمی از ۱ به ۲، برش پایه ۴/۸۶ درصد افزایش یافته است. همچنین با افزایش درجه نامنظمی از ۱ به ۳، افزایش برش پایه برابر با ۱۰/۳۳ درصد حاصل شده است. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده، ملاحظه می‌شود، با ایجاد نامنظمی و افزایش درجه نامنظمی در پایه‌های میانی پل، شاهد افزایش تقاضای لرزه‌ای در سازه خواهیم بود.

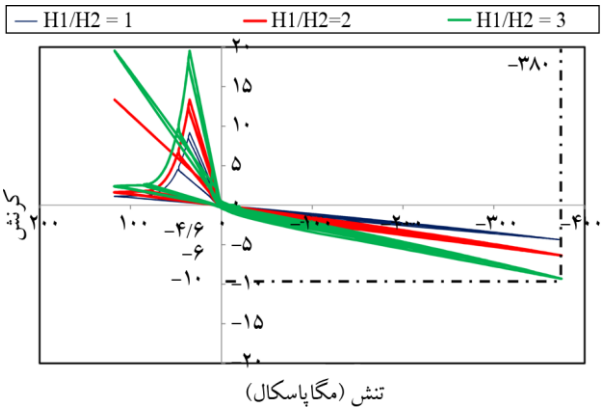
شکل (۶-ب) نشان می‌دهد، بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل‌سازی پل به‌صورت منظم، برابر با ۲۸/۲ سانتی‌متر حاصل شده است. درحالی‌که بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل با درجات نامنظمی ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۲/۸ و ۳۸/۴ سانتی‌متر حاصل شده است. بر اساس معیار جابه‌جایی، می‌توان مطلوب‌ترین حالت مدل‌سازی پل را می‌توان حالت منظم معرفی نمود.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، با افزایش درجه‌ی نامنظمی، شاهد افزایش مقدار عددی جابه‌جایی ثبت شده در نقاط کنترلی خواهیم بود. به‌نحوی‌که با ایجاد نامنظمی درجه ۲ در مقایسه با مدل منظم، جابه‌جایی ثبت شده در پایه‌ی میانی پل،۱۴ درصد افزایش یافته است. همچنین با تغییر درجه‌ی نامنظمی از ۱ به ۳، شاهد افزایش ۲۶/۶ درصدی بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در پایه‌ی میانی خواهیم بود.



شکل (۶): (الف) بررسی تأثیر نامنظمی بر پاسخ برش پایه و (ب) بررسی تأثیر نامنظمی بر پاسخ جابه‌جایی.

بر اساس شکل (۷) مشاهده می‌شود، به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکال، حداکثر کرنش ثبت شده در پایه‌ی میانی در حالت مدل‌سازی پل به‌صورت منظم برابر با ۴/۶ میلی‌متر حاصل شده است. به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکال، بیشینه کرنش ثبت شده در پایه میانی مربوط به مدل‌های با درجه نامنظمی ۲ و ۳، به ترتیب برابر با ۶ و ۱۰ میلی‌متر حاصل شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش درجه نامنظمی از ۱ به ۲، کرنش ثبت شده در نقطه‌ی کنترلی، ۲۳/۳ درصد افزایش یافته است. این روند افزایشی با تبدیل درجه‌ی نامنظمی از ۱ به ۳، برابر با ۵۴ درصد حاصل شده است.



شکل (۷): بررسی تأثیر نامنظمی بر پاسخ منحنی تنش-کرنش.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین عملکرد لرزه‌ای پل، مربوط به پل منظم (ارتفاع برابر پایه‌های میانی) و مدل‌سازی شده با پایه‌های میانی دارای مقطع دایره‌ای شکل است. سایر نتایج این پژوهش، به شرح زیر قابل بیان است:

بیشینه برش پایه‌ی ثبت شده در پایه‌ی میانی پل به ازای سطح مقطع دایره‌ای برابر با ۲۸۵/۸ تن حاصل شده است. همچنین بیشینه برش پایه ثبت شده به ازای سطح مقطع هندسی مربعی و مستطیلی به ترتیب برابر با ۲۹۳ و ۳۰۱/۵ تن حاصل شده است. با تغییر سطح مقطع پایه های میانی از حالت دایره به مربع، شاهد افزایش ۲/۴۶ درصدی برش پایه در ستون خواهیم بود. این روند افزایشی در ازای تبدیل سطح مقطع دایره‌ای به سطح مقطع مستطیلی برابر با ۵/۲۱ درصد حاصل شده است. لذا بر اساس معیار برش پایه، مطلوب ترین شکل هندسی پایه‌ی میانی پل، مقطع دایره‌ای می‌باشد.

در منحنی تنش-کرنش، به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکال، حداکثر کرنش ثبت شده در پایه‌ی میانی با مقطع دایره‌ای برابر با ۴/۶ میلی‌متر حاصل شده است. درحالی که در منحنی ظرفیت مربوط به پل مدل شده با پایه‌ی میانی مربعی شکل، به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکال، بیشینه کرنش ثبت شده در پایه میانی برابر با ۹/۱ میلی‌متر حاصل شده است. همچنین بر اساس منحنی تنش کرنش مربوط به پل مدل شده با پایه‌ی میانی مستطیلی، به ازای تنش ۳۸۰ مگاپاسکالی، حداکثر کرنش ثبت شده در پایه‌ی ستون برابر با ۱۶ میلی متر حاصل شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، به ازای اعمال یک تنش ثابت (۳۸۰ مگاپاسکال)، کمترین کرنش در حالت مدل‌سازی پل با سطح مقطع دایره‌ای حاصل شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، با تغییر سطح مقطع پایه‌های میانی از حالت دایره به مربع، حداکثر کرنش ثبت شده در سازه را ۴۹/۴ درصد افزایش داده است. همچنین با تغییر سطح مقطع پایه‌های میانی از حالت دایره به مستطیل، بیشینه کرنش ثبت شده در پایه ی میانی پل، ۷۱/۲۵ درصد افزایش یافته است. لذا بر اساس معیار منحنی تنش-کرنش، مطلوب ترین شکل سطح مقطع پایه میانی در پل سه‌دهانه‌ی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، مقطع دایره‌ای می‌باشد.

بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل‌سازی پل با پایه‌ی میانی دایره‌ای شکل، برابر با ۲۸/۲ سانتی متر ثبت شده است. درحالی که بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل‌سازی پایه میانی به‌صورت مربع و مستطیل به ترتیب برابر با ۲۹/۱ و ۳۷ سانتی‌متر حاصل شده است. بر اساس معیار جابه‌جایی، می‌توان مطلوب ترین شکل هندسی مقطع تخصیص‌یافته به پایه‌ی میانی را، مقطع دایره‌ای در نظر گرفت. با تغییر سطح مقطع دایره‌ای به مقطع مربعی در پل سه‌دهانه‌ی مورد مطالعه، بیشینه جابه‌جایی

ثبت شده در پایه‌ی میانی ۳/۱ درصد افزایش یافته است. همچنین با تغییر سطح مقطع پایه های میانی از حالت دایره به حالت مستطیل، شاهد افزایش ۲۳/۸ درصدی جابه جایی پایه ی میانی خواهیم بود.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، بیشینه برش پایه‌ی ثبت شده در پایه‌ی میانی پل در حالت منظم برابر با ۲۸۵/۸ تن حاصل شده است. درحالی‌که بیشینه برش پایه ثبت شده به ازای درجات نامنظمی ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۰۰/۴ و ۳۱۸/۷ تن حاصل شده است. لذا می توان نتیجه گرفت، با ایجاد نامنظمی در پل، شاهد افزایش برش پایه ی ثبت شده در پایه میانی پل خواهیم بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می شود با افزایش درجه نامنظمی از ۱ به ۲، برش پایه ۴/۸۶ درصد افزایش یافته است. همچنین با افزایش درجه نامنظمی از ۱ به ۳، افزایش برش پایه برابر با ۱۰/۳۳ درصد حاصل شده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ملاحظه می‌شود، کمترین مقدار عددی برش پایه در حالت منظم (نسبت ارتفاع پایه‌های میانی) و بیشترین مقدار برش پایه در حالت نامنظم با درجه نامنظمی ۳ حاصل شده است. به‌بیان‌دیگر، با ایجاد نامنظمی و افزایش درجه نامنظمی در پایه‌های میانی پل، شاهد افزایش تقاضای لرزه‌ای در سازه خواهیم بود.

به ازای یک مقدار تنش ثابت (۳۸۰ مگاپاسکال)، کمترین کرنش در حالت پل منظم ایجاد شده است و با افزایش درجه‌ی نامنظمی، شاهد افزایش کرنش ثبت شده در پایه میانی پل خواهیم بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش درجه نامنظمی از ۱ به ۲، کرنش ثبت شده در نقطه‌ی کنترلی،۲۳/۳ درصد افزایش یافته است. این روند افزایشی با تبدیل درجه‌ی نامنظمی از ۱ به ۳، برابر با ۵۴ درصد حاصل شده است.

بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل‌سازی پل به‌صورت منظم، برابر با ۲۸/۲ سانتی‌متر حاصل شده است. درحالی‌که بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در حالت مدل با درجات نامنظمی ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۲/۸ و ۳۸/۴ سانتی‌متر حاصل شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، با افزایش درجه‌ی نامنظمی، شاهد افزایش مقدار عددی جابه‌جایی ثبت شده در نقاط کنترلی خواهیم بود؛ به‌نحوی‌که با ایجاد نامنظمی درجه ۲ در مقایسه با مدل منظم، جابه‌جایی ثبت شده در پایه‌ی میانی پل،۱۴ درصد افزایش یافته است. همچنین با تغییر درجه‌ی نامنظمی از ۱ به ۳، شاهد افزایش ۲۶/۶ درصدی بیشینه جابه‌جایی ثبت شده در پایه‌ی میانی خواهیم بود.

مراجع

References

Djemai, M. C., Bensaibi, M., & Halfaya, F. (2019). The effect of type and height of piers on the seismic behavior of reinforced concrete bridges. *International Journal of Engineering Research in Africa*.

Haseli, B., & Nouri, G. H. (2016). *The Effect of Abutment Modelling on Seismic Response of Bridges*. Master's Thesis, Kharazmi University.

Haseli, B., Mozaffarpour, M., Toderosta, M., Ansari, M. H., Heydarnejad, F., & Barjesteh, A. (2024). Evaluation of the effect of the middle pier geometry on the seismic performance of concrete bridges. *Ninth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*.

Imbsen, R. A., & Imbsen Consulting. (2007). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. Subcommittee for Seismic Effects on Bridges.

Jara, J. M., Reynoso, J. R., Olmos, B. A., & Jara, M. (2015). Expected seismic performance of irregular medium-span simply supported bridges on soft and hard soils. *Engineering Structures*, *98*, 174-185.

Kim, S. J., Holub, C. J., & Elnashai, A. S. (2011). Analytical assessment of the effect of vertical earthquake motion on RC bridge piers. *Journal of Structural Engineering*.

Office of Deputy for Strategic Supervision Bureau of Technical Execution System. (2008). *Road and Railway Bridges Seismic Resistant Design Code (No. 463)* (in Persian).

Pahlavan, H., Nasei, A., Rafiei, S., & Baghery, H. (2018). Seismic vulnerability assessment of horizontally curved multi frame RC box girder bridges considering the effect of column heights and span

numbers. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *50*(3), 529-542 (in Persian).

Rodriguez, O. (2012). *Bridge Design for Earthquake Fault Crossings: Synthesis of Design Issues and Strategies*. California Polytechnic State University.

Soltanieh, S., Memarpour, M. M., & Kilanehei, F. (2018). Seismic performance assessment of abutment in bridges with altitudinal irregularity subjected to ground motion directionality effects. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, *4*(2), 93-114 (in Persian).

Tehrani, P., & Kaleybar, R. (2021). Investigating seismic behavior of horizontally curved RC bridges with different types of irregularity in comparison with equivalent straight bridges. *Structures*, *33*, 2570-2586.

واژه‌نامه

۱- اندرکنش خاک و سازه	Soil-Structure Interaction (SSI)
۲- المان تیرستون غیرخطی	Nonlinear Beam-Column Element
۳- المان تیر ستون الاستیک	Elastic Beam-Column Element
۴- مقطع فایبر	Fiber Section
۵- رکورد حوزه نزدیک	Near-Field Record
۶- رکورد حوزه دور	Far-Field Record

Evaluation of the Seismic Behavior of a Concrete Bridge Considering the Influence of the Intermediate Pier Geometry

Behzad Haseli[1*] and Mohammadreza Mozaffarpour Taromi[2]

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Earthquake Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran, *Corresponding Author, email: Std_haseli@khu.ac.ir
2. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Bridges are among the most critical components of transportation infrastructure, playing a vital role in a region's economy. Given that bridges are one of the most vulnerable engineering structures, their safety and serviceability are considered to be some of the most challenging issues in the engineering communities of Iran and the world. With population growth and urbanization in recent years, there has been an increase in vehicle usage and traffic volume. Consequently, there is a significant need to construct bridges under various conditions to meet population demands and facilitate vehicle movement and traffic. Therefore, evaluating the seismic behavior of this structure under various parameters leads to a better understanding of its performance and ultimately enables the achievement of an economical, safe, and stable design for this structure. Iran is situated on one of the world's most high-risk zones, and the probability of earthquake-induced damage is extremely high. It is essential to note that bridge construction is not always feasible in a regular configuration. Sometimes, due to executive constraints and the topographic conditions of the target area, the structure must be built asymmetrically. The main objective of the present study was to investigate the influence of the intermediate pier's geometry on the seismic performance of a three-span concrete bridge. After validating and ensuring the accuracy of the modeling procedure in the OpenSees software environment, the first phase of the research identified the most favorable geometric cross-section for the intermediate pier. For this purpose, the three-span concrete bridge was analyzed with three intermediate pier cross-sections: circular, square, and rectangular. Based on the examined responses, the most favorable cross-section was identified. In the second phase of the research, the effect of the irregularity on the seismic performance of the studied bridge was evaluated. In this phase, the heights of the intermediate piers were examined and assessed in three different configurations. In the regular model, the intermediate pier heights were considered equal at 7.13 m. Subsequently, the irregular models of degrees 2 and 3 referred to conditions where the shorter intermediate pier height was considered to be 3.56 m and 2.38 m, respectively. The results of this study indicate that, based on each of the responses—base shear, stress-strain curve, and deck displacement—the most favorable cross-section for modeling the intermediate bridge piers is the circular one. Furthermore, the results show that with an increase in the degree of irregularity, the seismic demand of the bridge increases, and the seismic performance of the bridge in the irregular state decreases compared to the regular state. Specifically, with an increase in the degree of irregularity (from 1 to 3), the base shear, strain, and maximum bridge displacement increased by 10.33%, 54%, and 26.6%, respectively. Thus, the results of this study demonstrate that the most favorable seismic performance of the bridge is related to the regular bridge (with equal pier heights) modeled with intermediate piers having a circular cross-section.

Keywords: Seismic Performance of Bridges, Geometric Irregularity, Intermediate Pier, Cross-Section, Concrete Bridge, OpenSees.