

اثر تغییرات مکانی جنبش شدید زمین و نوع ساختگاه بر عملکرد لرزه‌ای پل‌های بتنی با ارتفاع پایه متغیر

داریوش درویش پور^۱، غلامرضا نوری^{۲*}

۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

۲ دکتری، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

*r.nouri@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۲۷

چکیده

در نظر گرفتن تغییرات مکانی حرکات زمین در طراحی سازه‌ها و پل‌های طولی بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله اثر تغییرات مکانی جنبش شدید زمین و تغییر شرایط ساختگاهی بر پاسخ لرزه‌ای پل‌های بتنی با ارتفاع پایه متغیر مطالعه شده است. برای تولید شتاب‌نگاشت‌های غیریکنواخت حرکت زمین از الگوریتم شبیه‌سازی شده مبتنی بر طیف طرح با توابع فرآیند تصادفی چند متغیره نایستا و ماتریس چگالی طیفی استفاده شده است. تولید شتاب‌نگاشت‌ها با تابع هم‌دوسی شامل اثر انتشار موج و مدت زمان زمین‌لرزه که سازگار با طیف پاسخ منتخب باشد، انجام شد. پاسخ‌های لرزه‌ای پل ۵ دهانه به طول ۲۴۲/۵ متر تحت اثر تحریک یکنواخت و غیریکنواخت با تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در برنامه OpenSees مورد بررسی قرار گرفت. اثر تغییر شرایط ساختگاهی با فرض تغییر نوع خاک و سرعت ظاهری موج در زیر پایه‌های مختلف پل لحاظ شد. تغییرات نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در پایه‌های پل در حالت‌های مختلف به عنوان معیار مقایسه مطالعه شد. نتایج نشان داد، هم‌زمانی تغییرات مکانی و تغییر شرایط ساختگاهی باعث افزایش قابل توجه در پاسخ‌های پل می‌شود، به گونه‌ای که در این حالت حداکثر لنگر خمشی پایه پل تا حدود ۲/۵ برابر نیز می‌تواند افزایش یابد. همچنین مقایسه نتایج در دو حالت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت بیانگر این است که حتی در شرایط ساختگاهی یکسان، ویژگی‌های تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه می‌تواند به شدت پاسخ پل را تغییر دهد.

واژگان کلیدی: پل نامنظم، تغییرات مکانی جنبش شدید زمین، اثر ساختگاه، شبیه‌سازی مبتنی بر طیف پاسخ، تحریک یکنواخت و غیر یکنواخت

۱- مقدمه

است که سرعت انتشار امواج زمین لرزه بی‌نهایت در نظر گرفته شود. توجه به تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه و در نظر گرفتن این موضوع در طراحی سازه‌ها با فونداسیون‌های گسترده و پل‌های دهانه بلند حائز اهمیت بسیاری است. مشاهدات زمین لرزه‌های شدید گذشته نشان داده است که برای

در آنالیز دینامیکی سازه‌ها فرض معمول بر آن است که تمامی نقاط اتصال سازه با زمین، شتاب زلزله را به طور هم‌زمان و یکنواخت دریافت کنند. چنین فرضی مستلزم پذیرفتن این شرط

کوهپرنسی استاندارد معمول حتی در سازه‌های معمولی با ۳۰۰ متر طول روی شرایط خاک همسان سخت می‌تواند میزان تقاضای پارامترهای مهندسی را تا ۵۰٪ افزایش دهد. نوروززاده توچایی و همکاران (۲۰۲۰) [10] مطالعه‌ای روی پل‌های کابلی با تغییرات مکانی جنبش شدید زمین و با در نظر گرفتن آثار زلزله نزدیک گسل و ساختگاه انجام دادند. آنها مدلی از ستون پل با مقیاس ۱:۱۶ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تاثیر سختی خاک ساختگاه تابع مشخصات زمین لرزه است و پاسخ پل در خاک نرم‌تر افزایش بیشتری می‌یابد. شیراوند و پروانرو (۲۰۱۹) [11] مطالعه‌ای روی مقایسه تاثیر حالت تحریک غیریکنواخت و یکنواخت روی پل کابلی انجام دادند. نتایج بیانگر این بود که تاثیر پارامترهای نوع خاک هر پایه، سختی عرشه، لنگر عرشه و دیررفت پایه‌های سازه بسیار با اهمیت است. درایگالا و همکاران (۲۰۲۰) [12] مطالعه‌ای روی یک پل یک دهانه فلزی و یک پل کابلی ۳ دهانه با اعمال تغییرات مکانی جنبش شدید زمین انجام دادند. در پل فلزی نتایج نشان داد که بزرگترین پاسخ در حالت تحریک غیریکنواخت و در کمترین سرعت موج برشی به وجود می‌آید و در پل کابلی در حالت تحریک غیریکنواخت پاسخ دینامیکی فقط در دهانه وسط افزایش شدید پیدا می‌کند. شرسستا و همکاران (۲۰۱۷) [13] به منظور بررسی آثار تغییرات مکانی جنبش شدید زمین بر پاسخ پل از دو میز لرزان مستقل برای شبیه‌سازی حرکات غیر یکنواخت زمین استفاده کردند. نتایج نشان داد که تغییرات مکانی تصادفی زمین می‌تواند منجر به خسارت پل شوند. حتی زمانی که پریرود دهانه‌های مجاور هم به یکدیگر نزدیک باشند، خسارات ناشی از برخورد دهانه‌ها به دلیل تغییرات مکانی جنبش شدید زمین لرزه می‌تواند قابل توجه باشد. آدانور و همکاران (۲۰۱۷) [14] پاسخ پل‌های معلق ناشی از اثر تغییرات مکانی جنبش شدید زمین و تغییر ساختگاه بین نقاط تکیه‌گاه را در دو گروه به عنوان پاسخ‌های همگن و ناهمگن (نوع خاک یکسان و یا غیریکسان برای زیر پایه‌ها) و مانا و گذرا مقایسه کردند. مشاهده شد که پاسخ بدست‌آمده

سازه‌های بزرگ مانند پل‌ها، خطوط لوله و سدها، حرکت زمین در هر تکیه‌گاه ممکن است به طور قابل توجهی از بقیه تکیه‌گاه‌ها متفاوت باشد. برای نمونه، زروا (۱۹۹۰) [1]، داوودی و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) [2, 3]، ژائو و همکاران (۲۰۱۵) [4] اثر تغییرات مکانی زمین‌لرزه را روی سازه‌های طویل بررسی کردند. همچنین در هنگام زمین‌لرزه‌هایی مانند لوماپرتیا^۲ (۱۹۸۹) و کوبه^۳ (۱۹۹۵)، واژگونی عرشه پل‌ها به دلیل حرکات متفاوت بین دهانه‌های مجاور پل مشاهده شد. برای بررسی اثر تغییرات مکانی حرکات زمین بر سازه پل‌ها، مطالعات آزمایشگاهی بر رفتار غیر خطی پل در اثر تغییرات مکانی جنبش شدید زمین با لحاظ کردن اثر ضربه توسط لی و چاوو (۲۰۱۴) بر یک پل دو دهانه صورت گرفت [5]. نتایج نشان داد که تغییرات مکانی حرکات زمین و اثر نیروی ضربه منجر به آسیب بیشتری به سازه پل می‌شود. بی و هائو (۲۰۱۲) [6] به مدل‌سازی عددی آسیب ناشی از ضربه بین شاه‌تیرها و کوله پل دو و سه دهانه با تکیه‌گاه ساده تحت اثر تغییرات مکانی حرکات زمین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد پاسخ پیچشی دهانه‌های مجاور با توجه به نامتقارنی عرشه یا تغییرات مکانی حرکات عرضی زمین در پل‌های چند تکیه‌گاهی ممکن است منجر به ضربات غیرعادی بین دهانه‌های مجاور پل شود. شرسستا و همکاران (۲۰۱۵) [7] نشان دادند که حرکات غیریکنواخت^۴ زمین در تکیه‌گاه پایه‌های پل و اندرکنش سازه-خاک تأثیر قابل توجهی بر جابه‌جایی نسبی دهانه‌های مجاور پل می‌گذارد. مطالعات آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سه بعدی برخورد پل‌ها تحت اثر تحریک غیریکنواخت در مطالعات هی و همکاران (۲۰۱۷) [8] بررسی شده است. نتایج نشان داد حرکات غیریکنواخت و دوران پی می‌تواند جابه‌جایی نسبی و پاسخ ناشی از برخورد را به طور چشم‌گیری افزایش دهد. به منظور ارزیابی اثر تغییرات مکانی جنبش زمین بر سازه‌های طولی مطالعات عددی توسط اوزچبه و همکاران (۲۰۲۰) [9] با داده‌های زمین‌لرزه Park field در شبکه شتاب‌نگاری UPSAR انجام شد. نتایج نشان داد تغییرات مکانی با استفاده از توابع

سه حالت مختلف شامل ترکیبی از اثر تغییرات مکانی و تغییر نوع ساختگاه با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین تاثیر هم‌زمانی تغییرات مکانی جنبش شدید زمین و غیریکسان بودن خاک ساختگاه پایه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای پل با تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مشخصات پل، مدل سازی و درستی آزمایشی

پل TYOH-1 یک پل پنج دهانه با طول کلی ۲۴۲/۵ متر و عرض عرشه ۱۲/۸ متر است. طول دهانه ابتدایی و انتهایی پل هر یک برابر با ۴۱/۱۴ متر و طول دهانه‌های میانی برابر با ۵۳/۳۴ متر است (شکل ۱). پل مورد مطالعه دارای چهار پایه که هر پایه شامل یک ستون دایره‌ای شکل به قطر ۲/۴۳ متر و ارتفاع ۱۹/۸۱ در پایه‌های میانی و ارتفاع ۹/۱۴ متر برای پایه‌های کناری است. مشخصات ابعادی مقاطع عرضی پل TYOH-1 در جدول و شکل (۱) نشان داده شده است [18].

۲-۱- مدل سازی اجزای سازه پل

در این مطالعه، برای مدل سازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی پل از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. پل TYOH-1 یک پل بتن مسلح که عرشه آن از مقاطع باکسی پیش ساخته و از نوع پایه‌های تک‌ستونی است.

با توجه به این که تحلیل پل به صورت دوبعدی نمی‌تواند اندرکنش بین قسمت‌های مختلف پل را به درستی مدل نماید و در نتیجه منجر به خطاهای زیادی در پاسخ دینامیکی می‌شود، بنابراین، از آنالیز سه‌بعدی برای ارزیابی رفتار پل استفاده شده است. عرشه پل روی محور پایه‌ها، بدون درز انبساط است که به صورت مقاطع مشبک مستطیلی شکل الاستیک مدل شده است. از المان‌های صلب بین عرشه و پایه‌ها استفاده شده است. در این مطالعه، رفتار عرشه پل به صورت خطی مدل شده است. برای مدل‌سازی عرشه به صورت خطی از المان خطی تیرستون استفاده شده است. برای تعریف مدل رفتاری بتن در نرم‌افزار OpenSees از مدل مصالح بتن ۰۲ (Concrete 02) و برای

برای شرایط خاک ناهمگن، مقادیر بزرگتری نسبت به شرایط خاک همگن دارند و همچنین پاسخ حالت مانا از شرایط گذرا بزرگتر است. زاناردو و همکاران (۲۰۰۲) [15] برای بررسی تاثیر تغییرات مکانی جنبش‌های شدید زمین بر پاسخ لرزه‌ای پل‌های چنددهانه مطالعه‌ای پارامتریک روی پدیده ضربه وابسته به پاسخ لرزه‌ای پل‌های چنددهانه با طراحی پایه‌های جداساز انجام دادند. نتایج حاصل از تلاش‌های داخلی در پایه‌های پل نشان داد زمانی که پدیده ضربه رخ نداده است، مقادیر پاسخ می‌تواند به اندازه ۲ برابر حالت تحریکات یکنواخت حرکات زمین افزایش یابد. لی و همکاران (۲۰۱۸) [16] در مقاله خود به این موضوع پرداختند که پل‌های عبورکننده از دریا ممکن است در طول چرخه عمر خود در معرض زلزله‌های شدید قرار گیرند. در این مقاله، عملکرد لرزه‌ای یک پل عبورکننده از دریا به طور جامع براساس تابع شکنندگی با لحاظ نمودن تحریک چند تکیه‌گاهی ارزیابی شده است. نتایج نشان داد در مقایسه با حرکات لرزه‌ای دور از ساحل، حرکات لرزه‌ای ساحلی پاسخ‌های لرزه‌ای بالاتری را بدست می‌دهد. فلامرز-شیخ آبادی و زروا (۲۰۱۷) الگوی بارگذاری جابه‌جایی تفاضلی ساده‌ای را برای در نظر گرفتن آثار تغییرات مکانی در آیین نامه‌های طراحی لرزه‌ای پیشنهاد دادند و با الگوی بارگذاری پیشنهادی یورو کد مقایسه کردند. نتایج نشان داد زمانی که پایه‌های مجاور پل در جهات مختلف حرکت می‌کنند، بارگذاری پیشنهادی یورو کد می‌تواند پاسخ‌های غیرواقعی برای حرکات تفاضلی زمین^{۱۸} ارائه نماید [17]. مطالعات نوواک و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد در نظر گرفتن تغییرات مکانی جنبش شدید زمین تاثیر مخربی بر همه پل‌های آنالیز شده دارد و پیشنهاد نمودند تغییرات مکانی جنبش شدید زمین در همه پل‌ها لحاظ شود.

با توجه به اهمیت تغییرات مکانی جنبش شدید زمین و همچنین تاثیر نوع ساختگاه در پاسخ لرزه‌ای پل‌ها، در این مقاله ضمن تولید شتاب‌نگاشت‌های مبتنی بر طیف طرح، به بررسی اثر تغییرات مکانی جنبش شدید زمین با در نظر گرفتن آثار ساختگاه در یک پل پنج دهانه با طول کلی ۲۴۲/۵ متر پرداخته می‌شود. تغییرات لنگر، نیروی محوری و نیروی برشی پایه‌ها در

تولید شده در نرم افزار OpenSees با آنالیز Transient به روش ضمنی نیومارک با شتاب متوسط و الگوریتم نیوتن اصلاح شده^{۱۱} با ۸۰۰ گام زمانی $10^{-2} * 10^{-2} * 5/2$ ثانیه و با رواداری 10^{-12} ^۷، انجام شده است.

جدول ۱. مشخصات مقاطع پل TY0H-1

| Structural component | Mass density (kg/m ³) | Cross sectional area (m ²) | Moment of inertia (m ⁴) |
|----------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Girder | 2322 | 6.94 | 4.74 |
| Piers | 2322 | 4.67 | 1.74 |

Table 1. Features of TY0H-1 bridge sections

میلگرد های مقاطع بتنی از مصالح فولاد ۰۲ (Steel02) با سخت شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است. در شکل (۲) منحنی تنش-کرنش و منحنی هیستریزس مصالح Concrete02 و در جدول (۲) مقادیر پارامترهای هر دو مدل رفتاری برای فولاد و بتن ارائه شده است. بهترین حالت برای توزیع جرم بین المان های پل، آن است که جرم بر اساس طول بین المان ها توزیع شود. جرم های انتقالی در جهات طولی، عرضی و قائم بر اساس طول مؤثر آن ها به گره ها اختصاص داده شده است. برای تقریب زدن جرم توزیع شده بین المان ها با جرم متمرکز در گره ها، تعداد کافی گره در مدل تعریف شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی برای شتاب نگاشت های

شکل ۱. مشخصات پل TY0H-1 (الف) پروفیل طولی، (ب) مقطع عرضی عرشه و (ج) مقطع پایه پل (ابعاد به متر)

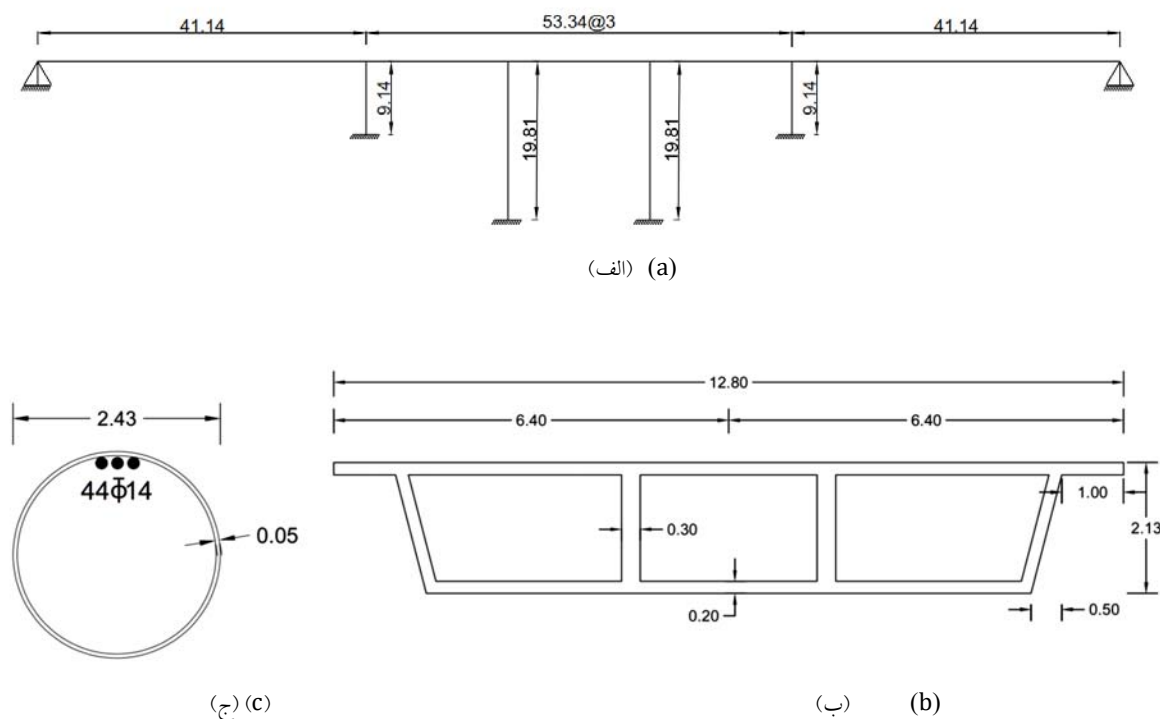


Fig. 1. Specification of TY0H-1 Bridge (a) longitudinal section (b) cross section of the deck and (c) cross section of the pier (Dimension in meters)

شکل ۲. مدل رفتاری بتن ۰۲ (الف) منحنی هیستریزس (ب) نمودار تنش-کشش

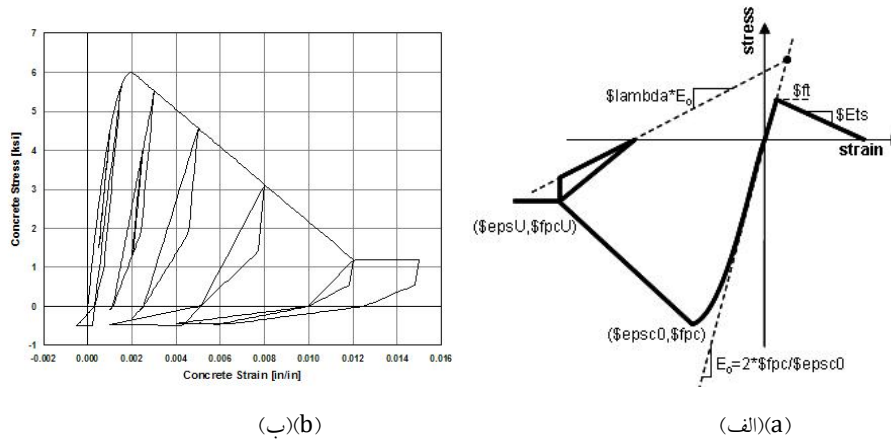


Fig. 2. Behavioral model of Concrete02 (a) hysteresis behavior (b) graph of stress-strain.

جدول ۲. مشخصات مصالح و پارامترهای مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای بتن ۰۲ (Concrete 02) و فولاد ۰۲ (Steel02)

| | | Steel 02 |
|-----------|------------------------|--|
| Parameter | Value | Explanation |
| Fy | MPa 460 | Steel yield stress |
| Es | 20*10 ³ MPa | modulus of steel |
| Bs | 0.01 | strain-hardening ratio |
| R0 | 18 | control the transition from elastic to plastic branches |
| cR1 | 0.925 | control the transition from elastic to plastic branches |
| cR2 | 0.15 | control the transition from elastic to plastic |
| | | Concrete 02 |
| fc | MPa 27.6 | Concrete Compressive Strength |
| nu | 0.2 | |
| Kfc | 1.3 | ratio of confined to unconfined concrete strength |
| Kres | 0.2 | ratio of residual/ultimate to maximum stress |
| fc1C | [Kfc*fc] | confined concrete (Mander model), maximum stress |
| eps1C | [2.*fc1C/Ec] | strain at maximum stress |
| fc2C | [Kres*fc1C] | ultimate stress |
| lambda | 0.1 | ratio between unloading slope at eps2 and unconfined concrete |
| fc1U | fc | Unconfined concrete (Todeschini parabolic model), maximum stress |
| eps1U | 0.003 | strain at maximum strength of unconfined concrete |
| fc2U | [Kres*fc1U] | ultimate stress |
| eps2U | -0.01 | strain at ultimate stress |
| ftC | [-0.14*fc1C] | tensile strength +tension |
| ftU | [-0.14*fc1U] | tensile strength +tension |
| Ets | [ftU/0.002] | tension softening stiffness |

Table 2. Specifications of materials and parameters of the behavioral model for Concrete 02 & Steel02

استفاده شده است. برای مدل کردن ستون‌ها با المان‌های غیر الاستیک، کل طول ستون غیرالاستیک و مستعد تشکیل مفصل پلاستیک در نظر گرفته شده است.

پایه‌های پل، مؤلفه‌های زیر سازه‌ای هستند که به عنوان تکیه‌گاه‌های میانی برای عرشه پل در جهت افقی و قائم عمل می‌کنند. برای مدل کردن ستون‌های پایه در نرم‌افزار OpenSees از المان‌های سه‌بعدی غیر الاستیک تیر-ستون

۲-۲- درستی آزمایشی مدل و تحلیل دینامیکی غیرخطی پل

به منظور درستی آزمایشی مدل‌سازی پل مورد استفاده در این مطالعه، تحلیل استاتیکی و دینامیکی روی پل TY0H-1 انجام گرفته است. پریود اصلی پل در دو جهت طولی و عرضی به دست آمده از مدل‌سازی این مقاله به ترتیب $1/43$ و $1/72$ ثانیه است که با مقدار گزارش شده در مطالعه شینوزاکا و همکاران که به ترتیب $1/42$ و $1/71$ است [18]، اختلاف بسیار کمی دارد. در مطالعه شینوزاکا و همکاران برای مقایسه اثر تغییرات مکانی جنبش شدید زمین ضریب (ρ) برابر با نسبت بیشترین پاسخ در حالت تحریک غیریکنواخت به بیشترین پاسخ در حالت تحریک یکنواخت که از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی بدست می‌آید، تعریف شده است (رابطه ۱).

$$\rho = \frac{\text{حداکثر مقدار پاسخ محاسبه شده در حالت حرکات غیر یکنواخت}}{\text{حداکثر مقدار پاسخ محاسبه شده در حالت حرکات یکنواخت}} \quad (1)$$

اگر مقدار ρ بزرگ‌تر از یک باشد نشان‌دهنده آن است که مقدار پاسخ محاسبه شده در حالت حرکات ورودی تحریک غیریکنواخت بیشتر از حالت ورودی تحریک یکنواخت می‌باشد. ضریب (ρ) برای لنگر خمشی پایه‌ها که از تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل می‌شود در مقاله حاضر برابر با $1/154$ بدست آمد که با مقدار ارائه شده ($1/116$) در مرجع [18] اختلاف اندکی دارد. بطور نمونه تفاوت لنگر خمشی به دست آمده در پایه شماره ۴ در دو حالت تحریک یکنواخت و تحریک غیریکنواخت در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی جنبش شدید زمین سازگار با طیف پاسخ

آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای معمولاً طیف طرح را تابعی از شرایط لرزه‌خیزی و ساختگاه ارائه می‌دهند. در این مطالعه از الگوریتم شبیه‌سازی شده مبتنی بر طیف طرح برای تولید تاریخچه‌های زمانی سازگار با طیف پاسخ تابع همدوسی و توابع مدول استفاده شده است [19]. این روش برگرفته از

الگوریتم پیشنهاد شده توسط شینوزوکا و دئوداتیس (۱۹۸۸) [20]، لی و کریم (۱۹۹۱) [21] است.

شکل ۳. لنگر خمشی ناشی از تحریک یکنواخت و غیریکنواخت در پایه شماره ۴

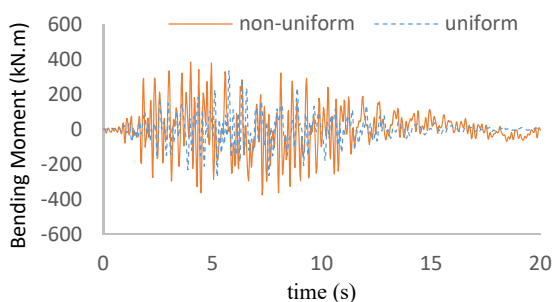


Fig. 3. Bending moment in pier No. 4 under uniform and non-uniform excitations

با توجه به روش پیشنهادی، تاریخچه‌های زمانی شتاب در n نقطه روی سطح زمین در نظر گرفته شده‌اند، تا یک فرآیند برداری تصادفی نایستای n متغیره، ایجاد شود. در نتیجه، یک طیف پاسخ شتاب هدف $j = 1, 2, \dots, n$ ، $RSA_j(\omega)$ برای n نقطه در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، توابع کوهیرنسی $\Gamma_{jk}(\omega)$ ، $j, k = 1, 2, \dots, n$ ، $j \neq k$ بین هر دو نقطه تعیین و توابع مدول $A_j(t)$ ، $j = 1, 2, \dots, n$ در هر نقطه اختصاص داده شده است. روش پیشنهادی دئوداتیس (۱۹۹۶) [19] ارتقا توابع چگالی طیفی توان فرآیندهای برداری است که به تولید تاریخچه‌های زمانی ایستا جدید با توجه به ماتریس چگالی طیفی توان ارتقا یافته منجر می‌شود. پس از حاصل ضرب آن‌ها در توابع پوش مناسب تاریخچه‌های زمانی نایستا تولید خواهد شد. این روش ارتقا تا زمان سازگاری تاریخچه‌های زمانی شبیه‌سازی شده با طیف پاسخ مورد نظر چندین بار تکرار خواهد شد. در بیشتر موارد کمتر از ۱۰ تکرار برای یک همگرایی دقیق در هر فرکانس مورد نیاز است.

در این مطالعه تاریخچه زمانی شتاب و جابه‌جایی در محل تکیه‌گاه‌های پل مورد بررسی با استفاده از برنامه‌نویسی الگوریتم مورد اشاره [19] در محیط متلب سازگار با طیف طرح آیین‌نامه یوروکد ۸ (۲۰۰۳) تولید شدند. تاریخچه‌های

با توجه به اینکه در این مقاله مقایسه اثر اعمال و عدم اعمال تغییرات مکانی جنبش شدید زمین در پاسخ‌های لرزه‌ای به صورت نسبت پاسخ‌ها بررسی خواهد شد و کفایت طراحی لرزه‌ای پل TYOH-1 مورد نظر نیست، پس اختلاف در طیف طراحی اولیه و طیف مورد استفاده در تولید شتاب‌نگاشت‌ها خللی در روند مطالعات ایجاد نخواهد کرد.

شکل ۶. طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های تولید شده مبتنی بر خاک یوروکد A و مقایسه با طیف آیین‌نامه یوروکد

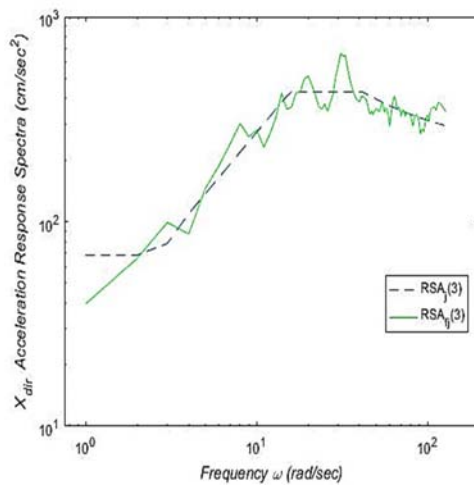


Fig. 6. The spectrum produced for soil type A compared with the Euro code design spectrum

۴- تحلیل پل برای ارزیابی اثر تغییرات مکانی جنبش‌های شدید زمین و تغییر ساختگاه

در این مطالعه، برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای پل مورد نظر سه حالت متفاوت در نظر گرفته شده است. در حالت اول فرض شده است تکیه‌گاه‌های پل TYOH-1 همگی در شرایط ساختگاهی یکسان با خاک نوع A و سرعت ظاهری انتشار موج ۲۰۰۰ متر بر ثانیه قرار گرفته باشند و پاسخ پل در دو حالت، با و بدون در نظر گرفتن تغییرات مکانی جنبش‌های شدید زمین با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در حالت دوم فرض شده است تکیه‌گاه‌های پل TYOH-1 در شرایط محلی خاک متفاوت قرار گرفته باشند. به این صورت که دو پایه وسطی که ارتفاع بلندتری دارند در خاک نوع D و

زمانی شتاب در شش نقطه روی سطح زمین که پیکربندی آن در شکل (۴) نشان داده شده است، تولید شد.

شکل ۴. پیکربندی نقاط منطبق بر پایه‌های پل در روی سطح زمین و در امتداد خط اصلی انتشار موج

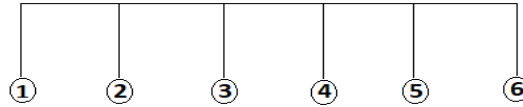


Fig. 4. Configure points compatible with bridge piers on the ground along the main wave propagation line

به منظور بررسی و درستی آزمایشی الگوریتم نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب و شتاب‌نگاشت‌های تولید شده، سازگاری بین هر یک از طیف آیین‌نامه‌ای خاک‌های نوع A و D و طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های تولید شده بررسی شد. به‌عنوان نمونه برای نقاط ۳ و ۶ به ترتیب برای خاک نوع A و D در شکل‌های (۵) و (۶) این هماهنگی نشان داده شده است. خاک نوع A خاک سخت با $V_s > 800 \text{ m/s}$ و خاک نوع D خاک سست‌تر و بدون چسبندگی زیاد با $V_s < 180 \text{ m/s}$ است. هماهنگی قابل قبولی بین طیف آیین‌نامه‌ای و طیف پاسخ مشاهده می‌شود.

شکل ۵. طیف تولید شده برای خاک نوع D یوروکد و مقایسه با طیف آیین‌نامه یوروکد

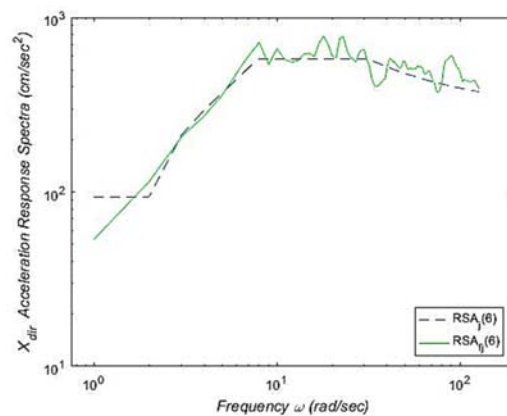


Fig. 5. The spectrum produced for soil type D compared with the Euro code design spectrum

است. نتایج نشان داد که در همه پایه‌ها با اعمال تحریک غیریکنواخت، نیروی برشی در راستای محور طولی نسبت به حالت تحریک یکنواخت افزایش می‌یابد با این تفاوت که اعمال تحریک غیریکنواخت تاثیر بیشتری روی دو پایه کناری نسبت به دو پایه وسطی دارد.

مشاهده شد که تاثیر تحریک غیریکنواخت روی نیروی برشی ایجاد شده در راستای محور عرضی بیشتر از حالت تحریک یکنواخت است. این نسبت در پایه‌های شماره ۱ الی ۴ به ترتیب برابر ۱,۴۴ و ۱,۹ و ۱,۷۵ و ۱,۱۹ است. براساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که در پایه‌های کناری با اعمال تحریک غیریکنواخت به پایه‌های پل، لنگر خمشی در راستای محور طولی نسبت به حالت تحریک یکنواخت افزایش می‌یابد، به صورتی که نسبت به دست آمده در پایه‌های شماره ۱ و ۴ به ترتیب برابر ۲,۲ و ۱,۵۵ است.

همچنین مشاهده شد که در پایه‌های وسطی که ارتفاع بیشتری داشته‌اند تاثیر تحریک غیریکنواخت بسیار جزئی است و نسبت به دست آمده برابر یک است.

۴-۲- حالت دوم: مشخصات خاک متفاوت در محل

پایه‌ها و تحریک تکیه‌گاهی غیر یکنواخت

در پایه‌های شماره ۲ و ۳ (پایه‌های وسطی) که در خاک نرم‌تر واقع شده‌اند، نیروی محوری ایجاد شده نسبت به زمانی که تمام پایه‌ها در یک نوع خاک باشند، مقادیر بالاتری دارد. افزایش نیروی محوری در بعضی موارد تا ۳ برابر به دست آمده است. به طور نمونه تغییرات نیروی محوری پایه شماره ۳ در شکل (۷) نشان داده شده است.

در پایه‌های شماره ۱ و ۲ بیشینه نیروی برشی ایجاد شده در راستای محور طولی در حالت شرایط خاک متغیر نسبت به حالت خاک یکسان به ترتیب برابر ۱,۳۲ و ۱,۴۵، و در پایه‌های شماره ۳ و ۴ این نسبت برابر ۰,۸۶ است. بدین معنی که در حالت خاک یکسان نیروی برشی ایجاد شده در راستای محور طولی در دو پایه ۳ و ۴ بزرگتر است. نمودار تغییرات نیروی برشی پایه شماره ۳ برای این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است.

سرعت ظاهری انتشار موج ۱۰۰۰ متر بر ثانیه باشد و دو پایه کناری که ارتفاع کوتاه‌تری دارند دارای خاک نوع A و سرعت ظاهری انتشار موج ۲۰۰۰ متر بر ثانیه باشد.

در حالت سوم فرض شده است تکیه‌گاه‌های پل TYOH-1 در شرایط محلی خاک متفاوت قرار گرفته باشند و شتاب زمین برای همه پایه‌ها یکسان باشد.

جدول ۳. حالت‌های مختلف مدل‌سازی پل TYOH-1

| Analysis Cases | Pier 1 | Pier 2 | Pier 3 | Pier 4 |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Case 1 Non-uniform and uniform excitation | Soil type A = $2000V_s$ m/s | Soil type A = $2000V_s$ m/s | Soil type A = V_s 2000 m/s | Soil type A = $2000V_s$ m/s |
| Case 2 Non-uniform excitation with different soils | Soil type A = $2000V_s$ m/s | Soil type D = $1000V_s$ m/s | Soil type D = $1000V_s$ m/s | Soil type A = $2000V_s$ m/s |
| Case 3 uniform excitation with different soils | Soil type A = $2000V_s$ m/s | Soil type D = $1000V_s$ m/s | Soil type D = $1000V_s$ m/s | Soil type A = $2000V_s$ m/s |

Table 3. Different cases of analysis for TYOH-1 Bridge

جدول (۳) خلاصه فرضیات حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در هر یک از حالت‌های فوق، عملکرد لرزه‌ای پل TYOH-1 مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی پاسخ‌های به دست آمده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی در دو حالت آثار تحریک یکنواخت و غیریکنواخت جنبش‌های شدید زمین می‌توان از نسبت بیان شده در رابطه ۱ استفاده کرد. جدول (۴) خلاصه نسبت پاسخ تلاش‌های داخلی برای سه حالت ذکر شده را نشان می‌دهد.

۴-۱- حالت اول: مشخصات خاک یکسان در محل

پایه‌ها با تحریک تکیه‌گاهی یکنواخت

نسبت بیشینه نیروی محوری ایجاد شده در حالت تحریک غیر یکنواخت نسبت به تحریک یکنواخت در پایه‌های شماره ۱ و ۴ به ترتیب برابر با ۲,۲۹ و ۱,۶۵ و در دو پایه وسطی یکسان

راستای طولی در هر دو حالت خاک یکسان و خاک متغیر، یکسان است و تفاوت محسوسی با یکدیگر ندارند.

بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که در دو پایه وسطی که در خاک نرم تر قرار گرفته اند، بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در راستای محور طولی با تحریک یکنواخت و خاک متغیر نسبت به زمانی که خاک همه پایه ها یکسان باشد، برابر است و در دو پایه ۱ و ۴ لنگر خمشی ایجاد شده در حالت خاک متغیر بیشتر از حالت خاک یکسان است و تقریباً ۱,۶ برابر شده است. نتایج نشان داد که در همه پایه های پل لنگر خمشی ایجاد شده در راستای محور عرضی در دو حالت خاک متغیر و خاک یکسان با یکدیگر تفاوت دارند و بیشترین حالت خاک متغیر به خاک یکسان در پایه های ۱ الی ۴ به ترتیب برابر ۱,۲۶ و ۱,۱۸ و ۱,۱۸ و ۱,۳ است.

بر اساس نتایج، در همه پایه های پل، لنگر خمشی در راستای محور طولی در حالت خاک متغیر نسبت به حالت خاک یکسان افزایش می یابد. همچنین مشاهده شد که در پایه های وسطی که در خاک نرم تر قرار داشته اند لنگر خمشی ایجاد شده، مقادیر بزرگتری دارد و تا ۳ برابر افزایش پیدا کرده است. به طور نمونه تغییرات لنگر خمشی پایه شماره ۳ در شکل (۹) نشان داده شده است.

۳-۴- حالت سوم: مشخصات خاک متفاوت در محل پایه ها با تحریک تکیه گاهی یکنواخت

در پایه شماره ۱ و ۴ که در خاک های سفت تر قرار دارند، تغییر مشخصات خاک در مقایسه با حالت خاک یکسان برای همه پایه ها، باعث افزایش ۱,۶ برابری نیروی محوری می شود. بر اساس نتایج در همه پایه ها نیروی برشی ایجاد شده در

شکل ۷. تغییرات نیروی محوری پایه پل با در نظر گرفتن اثر ساختمان در حالت دوم

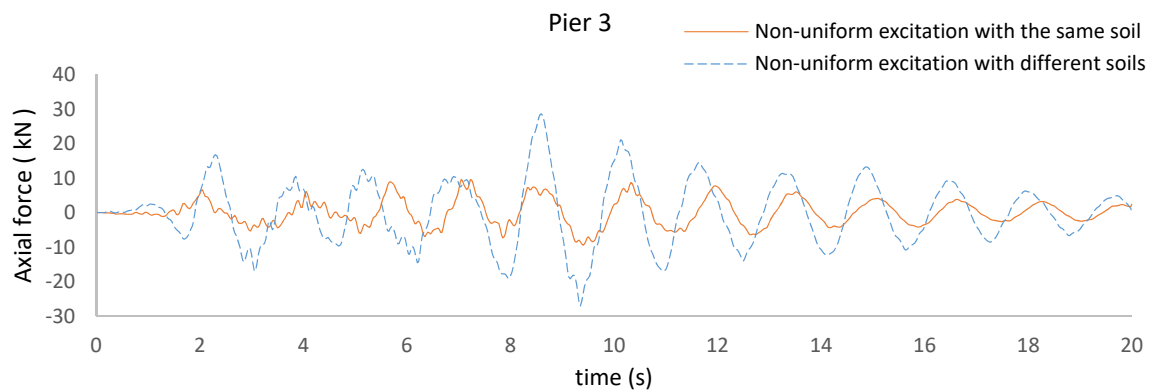


Fig. 7. Variation of pier axial force with site effect consideration

جدول ۴. نسبت حداکثر پاسخ پایه ها برای سه حالت تحلیل

| Maximum of ratios | Axial force | | | | Shear force along the transverse axis | | | |
|---|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
| | Pier 4 | Pier 3 | Pier 2 | Pier 1 | Pier 4 | Pier 3 | Pier 2 | Pier 1 |
| Non-uniform and uniform excitation | 1.63 | 0.94 | 1.05 | 2.29 | 1.96 | 1.75 | 1.9 | 1.44 |
| Non-uniform excitation with different soils | 1.55 | 2.96 | 3.04 | 1.17 | 0.95 | 2.27 | 2.01 | 0.79 |
| uniform excitation with different soils | 1.64 | 0.94 | 0.94 | 1.64 | 1.05 | 1.2 | 0.99 | 0.93 |
| Maximum of ratios | Bending moment along the longitudinal axis | | | | Bending moment along the transverse axis | | | |

| | Pier 1 | Pier 1 | Pier 1 | Pier 1 | Pier 4 | Pier 3 | Pier 2 | Pier 1 |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Non-uniform and uniform excitation | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 1.47 | 1.57 | 1.69 | 1.61 |
| Non-uniform excitation with different soils | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2.5 | 2.26 | 1.53 | 2.21 |
| uniform excitation with different soils | 1.59 | 1.59 | 1.59 | 1.59 | 1.26 | 1.17 | 1.17 | 1.26 |
| Maximum of ratios | Shear force along the longitudinal axis | | | | | | | |
| | Pier 4 | Pier 3 | Pier 2 | Pier 1 | | | | |
| Non-uniform and uniform excitation | 2.26 | 1.54 | 1.32 | 1.66 | | | | |
| Non-uniform excitation with different soils | 0.83 | 0.86 | 1.45 | 1.32 | | | | |
| uniform excitation with different soils | 1.06 | 0.98 | 1.02 | 1.04 | | | | |

Table 4. Maximum ratio of pier responses for all three cases of analysis

شکل ۸. تغییرات نیروی برشی در راستای محور طولی پایه با در نظر گرفتن اثر ساختگاه در حالت دوم

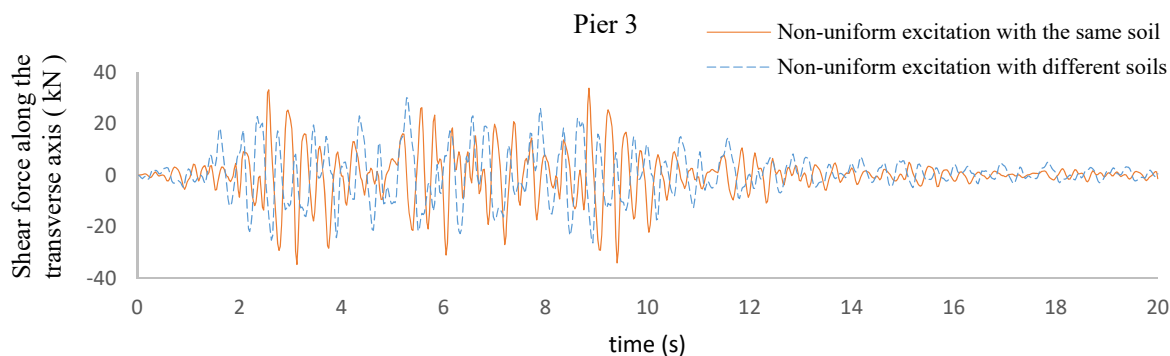


Fig. 8. Variation of pier shear force along the longitudinal axis considering the site effect

شکل ۹. تغییرات لنگر خمشی پایه پل در راستای محور طولی با در نظر گرفتن اثر ساختگاه در حالت دوم

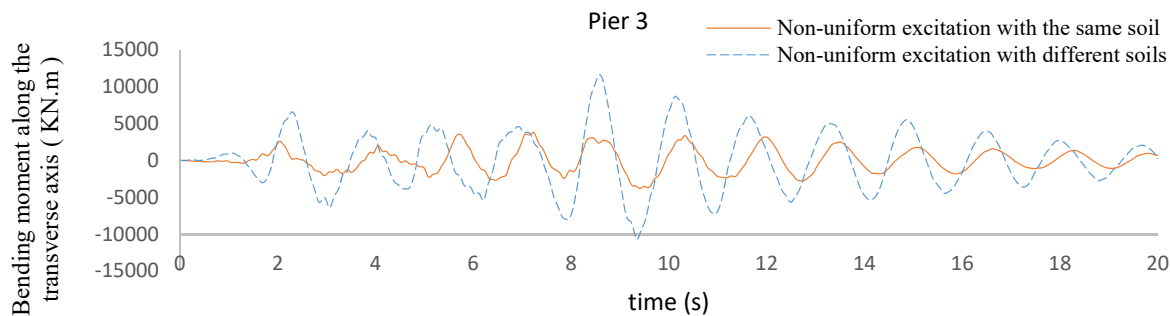


Fig. 9. Variation of bending moment of bridge pier along the longitudinal axis with considering the site effect

2. Davoodi M., Razmkhah A. 2012 Considering the effects of svegm on dynamic stress-strain distribution of embankment dams. *civil eng infrastructures*, 45(5),529-541.
3. Davoodi M., Jafari M. 2013 Effect of Multi-Support Excitation on Seismic Response of Embankment Dams. *Int. J. Civ. Eng*,11(1 B),19-28.
4. Zhao B., Wang Y., Chen Z., Shi Y., Jiang Y. 2015 Research on the random seismic response analysis for multi-and large-span structures to multi-support excitations *Earthq. Eng*, 14(3),527-538.
5. Li B., Chouw N. 2014 Experimental investigation of inelastic bridge response under spatially varying excitations with pounding. *Eng Struct*, 79,106-116.
6. Bi K., Hao H. 2012 Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions. *Probabilistic Eng Mech*, 29,92-104.
7. Shrestha B., Hao H., Bi K. 2015 Seismic response analysis of multiple-frame bridges with unseating restrainers considering ground motion spatial variation and SSL. *Adv Struct Eng*, 18(6),873-891.
8. Shrestha B., Hao H., Bi K-M. 2017 Experimental and three-dimensional finite element method studies on pounding responses of bridge structures subjected to spatially varying ground motions. *Adv Struct Eng*, 20(1), 105-124.
9. Özcebe AG., Smerzini C., Bhanu V. 2018 Insights into the Effect of Spatial Variability of Recorded Earthquake Ground Motion on the Response of a Bridge Structure. *J Earthq Eng*, 24(6),920-946.
10. Tochaei EN., Taylor T., Ansari F. 2020 Effects of near-field ground motions and soil-structure interaction on dynamic response of a cable-stayed bridge. *Soil Dyn Earthq Eng*, 133,106-115.
11. Shiravand MR., Parvanehro P. 2019 Spatial variation of seismic ground motion effects on nonlinear responses of cable stayed bridges considering different soil types. *Soil Dyn Earthq Eng*, 119,104-117.
12. Drygala IJ., Dulinska JM., Polak MA. 2020 Seismic assessment of footbridges under spatial variation of earthquake ground motion (SVEGM): Experimental testing and finite element analyses,20(4).
13. Shrestha B., Hao H., Bi KM. 2017 Large-scale testing of bridge system with unseating mitigation devices under spatially varying ground motions. *Mech Struct Mater Adv Challenges - Proc 24th Australas Conf Mech Struct Mater*, ACMSM24,627-632.
14. Adanur S., Altunışık AC., Soyuk K., Dumanoğlu AA. 2017 Stationary and transient responses of suspension bridges to spatially varying ground motions including site response effect. *Adv Steel Constr*, 13(4),378-398.

۵- نتیجه گیری

در نظر گرفتن تغییرات مکانی حرکات زمین در طراحی سازه و پل‌های طولی بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله پاسخ لرزه‌ای پل‌های طولی تحت اثر مؤلفه‌های افقی با لحاظ نمودن تغییرات مکانی جنبش شدید زمین در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخیچه زمانی، تغییرات قابل توجه پاسخ‌ها با در نظر گرفتن تغییرات مکانی جنبش‌های شدید زمین را نشان می‌دهد. براساس نتایج: بیشینه لنگر خمشی در راستای محور عرضی در حالتی که نوع خاک زیر پایه‌های پل متغیر باشد و تغییرات مکانی نیز در تحلیل‌ها لحاظ شود؛ در مقایسه با حالتی خاک زیر پایه از یک جنس باشد، به حدود ۲٫۵ برابر افزایش پیدا کرد که نشان از اهمیت دخالت دادن شرایط ساختگاهی پایه‌ها و در نظر گرفتن اثر تغییرات مکانی جنبش شدید زمین است.

در صورت همزمانی تغییر نوع خاک ساختگاه و اثر تغییرات مکانی نیروی محوری پایه‌های کوتاه تا حدود ۳ برابر نیز افزایش می‌یابد.

نیروی برشی در پایه‌ها در حالتی است که تغییرات مکانی جنبش شدید زمین و شرایط ساختگاهی غیر یکسان برای تکیه‌گاه‌ها لحاظ شده باشد، در پایه‌های کوتاه تا ۲ برابر افزایش داشت.

نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد اثر هم‌زمانی تغییرات جنبش شدید زمین و تغییر نوع ساختگاه پایه‌های پل می‌تواند پاسخ‌ها را افزایش دهد. بدیهی است برای میزان افزایش پاسخ‌ها با لحاظ نمودن اثر تغییرات مکانی، یک مقدار ثابت نمی‌توان پیشنهاد نمود، اما آنچه این نتایج نشان داد، این است که در طراحی لرزه‌ای پل‌ها، آثار تغییرات مکانی و تغییر نوع خاک می‌بایست لحاظ شود و عدم در نظرگیری آن‌ها می‌تواند در زمان وقوع زمین‌لرزه خسارت‌بار است.

۶- مراجع

1. Zerva A. 1990 Response of multi-span beams to spatially incoherent seismic ground motions. *Earthq Eng Struct Dyn*, 19(6), 819-832.

Structures - MCEER: Earthquake Engineering to Extreme Events - University at Buffalo.

19. Deodatis G. 1996 Non-stationary stochastic vector processes: Seismic ground motion applications. Probabilistic Eng Mech, 11(3),149-167.

20. Shinozuka M., Deodatis G. 1998 Stochastic process models for earthquake ground motion. Probabilistic Eng Mech,3(3),114-123.

21. Li Y., Kareem. 1991 A Simulation of Multivariate Nonstationary Random Processes by FFT. J Eng Mech,117(5),1037-1058.

15. Zanardo G., Hao H., Modena C. 2002 Seismic response of multi-span simply supported bridges to a spatially varying earthquake ground motion. Earthq Eng Struct Dyn,31(6),1325-1345.

16. Li N., Hao H., Bi K., Chen B. 2018 Seismic fragility analyses of sea-crossing cable-stayed bridges subjected to multi-support ground motions on offshore site. Eng. Struct, 165, 441-456.

17. Sheikhabadi F., Zerva A. 2017 Simplified Displacement Loading Patterns for Incorporation of Spatially Variable Ground Motions in Bridge Seismic Design Codes J. Bridg Eng,22(6).

18. Shinozuka M., Saxena V., Deodatis G. 2000 Effect of Spatial Variation of Ground Motion on Highway

Seismic response of non-uniform column heights bridge under spatial variation of ground motion and local soil condition

Dariush Darvishpour¹, Gholamreza Nouri^{2*}

1 M.Sc., Faculty of Engineering, University of Kharazmi

2 Ph.D., Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Kharazmi

*r.nouri@khu.ac.ir

Abstract

It is vital to consider the spatial variations of ground motions in the design of extended structures and long bridges. In this paper, the effect of spatial variations of ground motions and local site conditions on the response of non-uniform column heights bridge is studied. To generate non-uniform accelerometers of ground motion, a simulated algorithm based on the spectrum design with unstable multivariate random process functions and a spectral density matrix is used. Accelerometers were generated with a coherence function including the effect of wave propagation and the duration of the earthquake that is consistent with the selected response spectrum. In addition, the simulation is performed in 800 time intervals with a time step of 0.025 seconds. The maximum ground acceleration is assumed 0.35 g. The response of the bridge with a length of about 242.5 m with 5 spans under the effect of uniform and non-uniform accelerometers was investigated by nonlinear time history analysis in OpenSees program. The local site effect was assumed by changing soil type (soil under the two piers is softer than the other piers) and apparent wave velocity under different bridge piers. The apparent velocity of the wave propagation of the soft soil assumed 1000 m/s and for the hard soil 2000 m/s. To verify the acceleration of the generated accelerograms, the generated spectrum is compared with the Eurocode design spectrum, and to validate the analysis performed on the bridge, the ratio of M/M_y calculated and compared with ratio that calculated by Shinozaka and Deodatis. In this paper variations of axial force, shear force and bending moments in bridge piers in different positions were studied as comparison criteria. The results showed that the simultaneity of spatial variations of ground motions and changes in the soil conditions causes a significant increase in the bridge response. Comparison of the results in the two input cases of uniform and non-uniform spatial variations of ground motions shows that the properties of spatial variations of earthquake motions can affect the response of the bridge. The results are compared based on the ratio of the maximum stress created at the base in the non-uniform excitation state to the maximum created in the uniform excitation state or the ratio of the maximum stress created at the base in the variable soil to the same soil. Based on the presented results, it was observed that the maximum bending moments in variable soil conditions can be increased to about 2.5 times to the maximum created in the same soil condition in the piers and also the maximum axial force created in the two shorter piers in the non-uniform excitation state is up to 2 times larger than in the uniform excitation state, and if the effect of different soils is applied to the two middle piers, the axial force in the middle two piers can be increased up to 3 times. Based on the obtained results, it is observed that the maximum shear force created in the direction of the transverse axis in the two middle piers occurred in a situation where non-uniform excitation coincides with the change of soil conditions under the piers and the bending moment in the direction of the transverse axis in the piers in this case has increased up to 120%.

Keywords: long bridge, spatial variations, site effect, spectral based simulation, uniform and non-uniform excitation