اثر انعطاف‌پذیری و رفتار خاک برپاسخ لرزه‌ای برشگیر پل‌ها

مقاله علمی – پژوهشی

افشین حفظی، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
هادی دشتی*، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
علیرضا فیوض، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج‌فارس، بوشهر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hdashti1356@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰
صفحه ۴۰۸-۳۹۳

چکیده

در چند دهه اخیر مطالعات متعددی در زمینه رفتار لرزه‌ای پل‌ها تحت اثر زلزله‌های مختلف صورت گرفته است. برشگیر پل‌ها به عنوان عناصر فیوز مانند جهت جلوگیری از در رفتگی عرشه پل از روی زیر سازه نقش مهمی را در پل‌ها ایفاء می‌نمایند. اما موضوع مهمی که در این مطالعات به آن توجه چندانی نشده است، تأثیر ساختگاه پل بر پاسخ‌های ایجاد شده در برشگیرها تحت اثر برخورد شاهتیرها به برشگیرها در زمان وقوع زلزله می‌باشد. در مطالعه حاضر پس از ساخت مدل اجزاء محدود یک پل با سایر اجزاء آن از جمله برشگیرها در شرایط واقعبینانه سه بعدی، صحت عملکرد مدل با مقایسه با نتایج معتبر مورد تأیید قرار می‌گیرد. سپس با توجه به تأثیر انعطاف پذیری خاک و رفتارهای خطی و غیرخطی خاک زیر پل، اثرات آنها در پاسخ لرزه‌ای (تحت زلزله طبس) در پل و برشگیرها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تغییرات پاسخ در پل، تحت اثر انعطاف پذیری خاک در برخی موارد تا ۳۷ در صد قابل مشاهده است، تحت اثر تغییر سختی خاک و نیز لحاظ کردن رفتار خاک بصورت واقعی تر (رفتار الاستو-پلاستیک خاک)، پاسخ در برشگیر پل تا ۱۰۰ درصد متفاوت می‌باشد. این مساله لزوم طراحی دقیق پل‌ها خصوصاً برشگیر آنها تحت زلزله‌ها و خاک‌های متفاوت و مبتنی بر واقعیت منطقه را ضروری می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش خاک–سازه، برشگیر، زلزله، سختی خاک، عددی

۱–مقدمه

پل‌ها بدلیل نقشی که در ارتباط بین نقاط مختلف با یکدیگر دارند، از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند. ایمنی و کاربرد آنها جهت امور حیاتی و اقتصادی یک کشور در هنگام وقوع حوادث غیر مترقبه نظیر زلزله، لزوم دقت در طراحی اجزاء مختلف آنها را بیشتر مشخص می‌نماید. در این میان برشگیر پل‌ها به عنوان یک عنصر سازه‌ای، جهت جلوگیری از انتقال بارهای جانبی ناشی از زلزله و در رفتگی بیش از حد شاهتیرها از روی نئوپرن‌ها بکار می‌روند. تحت تأثیر نیروهای لرزه‌ای، نیروهای ضربه‌ای و کوبشی بین اعضای اصلی سازه پل (بدلیل پاسخ عرضی شاهتیرها و حرکات جانبی و پیچشی در عرشه پل‌ها) و برشگیرها بوجود می آید که در این زمینه برشگیرها به عنوان فیوز می‌توانند عمل کرده و مانع خسارت به بخش اصلی سازه گردند. برخی پژوهشگران اثرات برشگیرها در شرایط دینامیکی را مورد تحلیل قرار دادند. مگالی و همکاران (۲۰۰۱)، در تحقیقی با انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس

مدل غیر خطی را برای برشگیرهای داخلی و خارجی موجود بر روی کوله‌ها ارزیابی کردند. نتایج بدست آمده به طور قابل ملاحظه‌ای برای ارزیابی ظرفیت و عملکرد برشگیرها پس از وقوع بارهای چرخه‌ای موثر واقع شدند. بزرگ‌زاده و همکاران (۲۰۰۶)، آرایش آرماتورهای طولی و عرضی برشگیر خارجی کوله را مورد بررسی قراردادند. نتایج بدست آمده برای ارزیابی ظرفیت و عملکرد الاستیک برشگیرها موثر واقع شدند. در مطالعه‌ای ژوئل و چوپرا(۲۰۰۸)، با مدل کردن پل در سه حالت برشگیر با رفتار خطی، برشگیر با رفتار غیر خطی و بدون برشگیر، تاثیر برشگیر بر رفتار لرزه‌ای پل واقع بر گسل را مورد بررسی قراردادند. نتایج بیانگر آن بود که پاسخ لرزه‌ای پل با برشگیرهای غیرخطی می‌تواند با پاسخ لرزه‌ای پل با برشگیرهای خطی و حالت بدون برشگیر تقریب زده شود. با این حال نادیده گرفتن برشگیرها، ارزیابی‌های محافظه کارانه‌ای از پاسخ‌های لرزه‌ای پل‌های در معرض تحرکات یکنواخت زمین خواهد داشت. سالوسن و فییل (۲۰۱۱)، اثر برشگیر با رفتارهای خطی و غیرخطی بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل خطی بطور شگفت انگیزی مشابه حالت غیرخطی ولی محافظه کارانه تر از رفتار غیر خطی بود. در تحقیقی بی و هائو (۲۰۱۵)، با مدل کردن برشگیر پل‌ها تحت بارهای لرزه‌ای، تأثیر برشگیرها در رفتار لرزه‌ای پل‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر آن بود که برشگیرها پاسخ پیچشی– جانبی پل را کاهش داده و این امر باعث اعمال نیروهای ضربه‌ای کوچک‌تر و خسارت کم‌تر به سازه پل می‌گردد. همچنین برشگیرها احتمال در رفتگی شاهتیرها از روی نئوپرن را بطور چشم‌گیری کاهش داده و عدم لحاظ نمودن برشگیرها در تحلیل و طراحی، باعث نتایج نادرست از پاسخ پل به تحریکات لرزه‌ای می‌گردد. مطالعات مختلفی بر روی رفتار سنجی پل ها در شرایط مختلف لرزه ای انجام گرفته است که در برخی از آنها رفتار پل ها با تأثیر خاک مورد توجه قرار گرفته است. یحیی‌نسب (۱۳۹۰)،اندرکنش خاک– سازه در پل‌های یکپارچه را مورد بررسی قرار داد. هدف از تحقیق آنها ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی پل‌های یکپارچه بود تا علاوه بر مدل‌سازی پل‌های یکپارچه به صورت سه بعدی، بتوان روش ساده‌تری برای مدل‌سازی این گونه پل‌ها ارائه کرد. در روش جدید ارائه شده به جای مدل‌سازی شمع‌ها و خاک اطراف شمع‌ها از فنرهای معادل شمع‌ها استفاده شد. در تحقیقی کالیستو و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای پل مسینا پرداختند، نتایج نشان‌دهنده آن بود که با لحاظ نمودن خاک به جای بستر صلب، تغییرات مکانی دائمی تحت بارهای لرزه‌ای در پل ایجاد می گردد، که لزوم پیش‌بینی آن در محاسبات و تغییر روند پاسخ‌ها و تغییر در مقادیر نیروهای طراحی را نشان می‌دهد. دهقانی و دهقانی (۱۳۹۷)، با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده بر روی پل‌های قوسی، رفتار آنها را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نشان دادند استفاده از شتاب نگاشت های هارمونیک به جای شتاب نگاشت زلزله می تواند مدت زمان انجام تحلیل را با دقت خوبی کاهش دهد. محتشمی و شوشتری (۱۳۹۳)، پاسخ لرزه‌ای پل‌های یکپارچه را در حالت اندرکنش با خاک ساختگاه و بدون اندرکنش مورد بررسی قرار دادند، نتایج عددی نشان داد که وارد کردن اندرکنش در محاسبات تاثیر قابل توجهی بر پاسخ تغییر مکانی سازه و کاهش برش پایه کل داشته و به منظور بدست آوردن برآورد واقعی از پاسخ لرزه‌ای پل‌های یکپارچه توصیه گردید که اثر اندرکنش خاک و سازه به دقت مدلسازی شده و در فرآیند تحلیل لرزه‌ای وارد گردد. در مطالعه‌ای شیرگیر و همکاران (۱۳۹۳)، به بررسی آثار اندرکنش خاک – سازه در رفتار دینامیکی پل‌های تک پایه پرداختند. به این منظور مدل تحلیلی جدیدی با الهام از پل‌های تک پایه همانند پل صدر که بر روی گروه شمع واقع شدند، ارائه گردید. با استفاده از روش‌های تحلیلی، آثار اندرکنش خاک– سازه در این نوع پل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یک رابطه تحلیلی از مدل ارائه شده استخراج شد که به پیش‌بینی فرکانس ارتعاش آزاد یک پل تک‌پایه با دقت مناسبی می‌پردازد. نتایج حاصل از تحلیل اندرکنش خاک– پایه پل واقع بر گروه شمع حاکی از آن است که این پدیده موجب افزایش پریود ارتعاش سازه می‌گردد و با افزایش تعداد شمع‌های گروه شمع، اثرات اندرکنش کاهش می‌یابد. محمدزاده (۱۳۹۵)، به تجزیه و تحلیل اندرکنش پی– خاک و سازه در رفتار لرزه‌ای پل‌ها به روش المان محدود پرداخت. بررسی اثرات اندرکنش در یک مدل واقعی، پل کابلی تبریز، به عنوان مدل اصلی این تحقیق انجام گردید و تمامی ویژگی‌های خاک و اجزای سازه طبق واقعیت محاسبه و اعمال گردید. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، جابجایی‌ها افزایش چشم‌گیری می‌یابند و عدم در نظر گرفتن این موضوع می‌تواند موجب بروز مشکلات

جدی تا حد تخریب سازه در برابر زلزله طرح گردد. در پژوهشی اسپیراکوس و ولاسیس (۲۰۰۲)، اثر اندرکنش خاک- سازه در پاسخ پایه‌های پل با جداساز لرزه‌ای را ارزیابی نمودند و روشی ساده برای ملاحظهٔ این اثر در طراحی اولیه پل ارائه دادند. همچنین، راه‌هایی به منظور بکارگیری مزیت‌های اندرکنش خاک - سازه برای ارتقاء سطح ایمنی و کاهش هزینه‌های طراحی پیشنهاد نمودند. از آنجایی که بسته شدن درزهای انقطاع و ایجاد ضربه در پل‌ها متأثر از جابجایی کلی عرشه در هر یک از قاب‌ها می‌باشد، در نتیجه، ملاحظهٔ این اثر در تحلیل‌های دینامیک می‌تواند نتایج دقیق‌تری برای مطالعه پدیدهٔ ضربه ارائه نماید.

در پژوهشی دزی و همکاران (۲۰۱۲)، مطالعه رفتار لرزه‌ای پای پل‌های شمع‌دار با در نظرگیری اندرکنش خاک سازه را مد نظر قرار دادند . برای بررسی اندرکنش، نوع خاک و شکل هندسی مقطع را مرحله به مرحله تغییر داده و با مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از پایه پل قرار گرفته بر خاک صلب اثر خاک بر پایه پل را لحاظ نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که در نظرگیری اندرکنش خاک سازه برای پایه‌های چاق و پایه‌های قرار گرفته بر خاک نرم الزامی است. رفتار خاک نیز در تغییر پاسخ سازه‌های تحلیل شده با اندرکنش خاک- سازه، حائز اهمیت است. رضایی تبریزی و ناطقی الهی (۱۳۸۱)، اثر اندرکنش سازه- خاک- سازه بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلند را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، با توجه به اهمیت اثر اندرکنش خاک سازه بر پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند، دو سازه ۱۵ و ۳۰ طبقه که به ترتیب در رده برج‌های متوسط و بلند قرار می‌گیرند بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و آیین‌نامه سازه‌های فولادی ایران به صورت قاب خمشی ویژه فولادی، طراحی و مورد مطالعه قرار گرفت. جهت انجام آنالیزها از دو پروفیل خاک نرم و خاک سخت استفاده شد که پروفیل خاک نرم دارای پریود دینامیکی نزدیک به پریود سازه ۱۵ طبقه و پروفیل خاک سخت، دارای پریود دینامیکی نزدیک به پریود غالب سنگ بستر می‌باشد. نتیجه جالب توجهی که از آنالیزها بدست آمد، افزایش پاسخ غیرخطی و خسارت سازه ۱۵ طبقه، در اثر حضور سازه ۳۰ طبقه مجاور، بر روی خاک نرم می‌باشد که میزان قابل توجهی دارد. صمدیان و همکاران (۱۳۸۲)، اثر اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سازه‌ها را موضوع اصلی پژوهش خود قرار دادند. بر این اساس سازه‌های با یک درجه آزادی بر روی خاکی که با طبقه بندی چهارگانه زمین در آیین نامه ۲۸۰۰ ایران مطابقت دارد انتخاب و مدل مناسب نیم فضا و المان محدود برای احتساب اندرکنش خاک وسازه در نظر گرفته شد. سپس طیف پاسخ سازه با پایه گیردار و با احتساب اندرکنش خاک و سازه در مقابل زلزله‌های طبس، ناغان و السنترو به کمک نرم افزار عددی ANSYS محاسبه شد. متعاقباً طیف‌های محاسبه شده با همدیگر و با طیف بازتاب آیین نامه ۲۸۰۰ مقایسه گردید. که بر مبنای محاسبات انجام شده می‌توان گفت که لحاظ کردن انعطاف‌پذیری خاک زیر شالوده در پاسخ دینامیکی سازه‌ها تأثیر داشته و این تأثیر، متأثر از نوع خاک و زمان تناوب سازه است. قاسم‌وتر و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی اثر رفتار غیرخطی خاک و اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق سیستم خاک و سازه درنظر گرفته شده شامل سازه بلند فولادی با دو نوع سیستم جانبی متداول بادبندی و قاب خمشی است که بر روی خاک لایه‌ای قرار گرفته بر بستر سنگی در نظر گرفته شد. تحلیل اندرکنش دینامیکی خاک و سازه برای ترکیب‌های مختلف سازه، ساختگاه و پارامترهای لرزه‌ای متفاوت با استفاده از روش زیر سازه انجام شد. مدل سازه‌ای استفاده شده در تحلیل‌ها، شامل یک قاب دوبعدی ۲۰ طبقه با پی سطحی است که سیستم مقاوم جانبی آن به دو صورت متداول، قاب خمشی و بادبندی درنظر گرفته شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها روند تغییرات بزرگنمایی پاسخ سازه‌ای نسبت به پارامترهای حاکم بر مسأله از قبیل سختی نسبی سازه و خاک و همچنین سطح شتاب ورودی، برآورد گردید. صالحی (۱۳۸٤)، روشی را برای محاسبه سختی دینامیکی کوله‌های پل‌ها ارائه کرد و اهمیت تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی پارامترهای دینامیکی پل‌های پس کشیده جعبه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. تأثیر انعطاف‌پذیری خاک بر روی شکل‌پذیری پایه‌های پل نیز از دیگر بخش‌هایی بود که در این مطالعه به آن پرداخته شد. نتایج مطالعه پارامتریک بر روی یک کوله نشیمن دار با ابعاد ثابت نشان دادند که ضرایب سختی و میرایی کوله به طور قابل ملاحظه‌ای وابسته به شرایط خاک زیر پی‌ها و پشت دیوار کوله بود و ضمن آن که فرکانس تحریک نقش مهمی در مقادیر این پارامترها به خصوص میرایی سیستم کوله داشتند. فیض‌اله‌زاده خویی و موحدی‌فر (۱۳۹٦)، اثر سختی خاک بر عملکرد لرزه‌ای پل‌های یکپارچه را مورد بررسی قرار دادند. به این منظور، مدل‌های غیر

خطی سازه‌ای پل یکپارچه دو دهانه با چهار نوع سختی خاک متفاوت (متراکم، نیمه متراکم، متوسط، غیر متراکم) ساخته شد. در مدل‌های غیرخطی سازه‌ای، اندرکنش غیرخطی خاک و سازه که در برگیرنده اثرات حرکت میدان آزاد زمین است در نظر گرفته شد. سپس، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از یک مجموعه از حرکات زمین با شدت‌های مختلف اجرا می‌شود. نتایج تحلیل نشان داد که سختی خاک اثرات قابل توجهی بر عملکرد لرزه‌ای پل‌های یکپارچه مخصوصا در زمین لرزه‌های با شدت بالا دارد.

با توجه به اهمیت رفتار خاک در پاسخ سازه ها، در پژوهش حاضر، تأثیر انعطاف پذیری و تغییر در رفتار خاک بر رفتار پل و برشگیر آنها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک – سازه در شرایط سه بعدی مورد ارزیابی قرار می گیرد. جهت اطمینان از صحت عملکرد مدلسازی عددی انجام شده، بعد از مقایسه مدل ساخته شده با یک مدل معتبر پیشرفته، و تأیید مدلسازی، اثر شرایط انعطاف پذیری خاک و تغییر الگوی رفتاری خاک بر پاسخ پل و برشگیر آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

۲- بررسی نحوه مدلسازی

یکی از روش های مهم حل مسائل مهندسی روش‌های عددی است . در این روش با کاهش هزینه و زمان نسبت به روش‌های دیگر قادر به حل مسائل پیچیده می‌باشیم. با توجه به گسترش علوم مهندسی و جهت برآورد واقع‌بینانه از رفتار سازه‌ها در شرایط مختلف، استفاده از ابزار تحلیل عددی روز به روز گسترش و مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به مساله بررسی تغییر رفتار خاک بر پاسخ لرزه‌ای برشگیر پل‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور، وضعیت سازه پل و در نهایت برشگیر را تحت تأثیر رفتار یک خاک غیرچسبنده بصورت الاستیک و در شرایط مختلف انعطاف پذیری (E،E ۰/۵ و ۱/۵E) با رفتار غیر الاستیک (جدول۱)، تحت زلزله طبس مقایسه، و مقادیر کرنش، تنش، برش پایه و شتاب به عنوان خروجی، مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهد گرفت. مشخصات خاک غیر چسبنده و بتن براساس مطالعه رابطی و بازیار (۲۰۱۶) به ترتیب مطابق جداول ۲ و۳ درنظر گرفته شده است. رفتار مکانیکی بخش خاک به صورت الاستیک و غیر الاستیک با استفاده از مدل موهر–کولمب در نظر گرفته شده است.

جدول۱. معرفی حالات مختلف مورد بررسی

حالت	مدل رفتاری و سختی خاک
۱	خاک الاستیک با سختی E
۲	خاک الاستیک با سختی 0.5E
۳	خاک الاستیک با سختی 1.5E
٤	خاک با مدل رفتاری الاستو- پلاستیک (موهر–کلمب) با سختیE

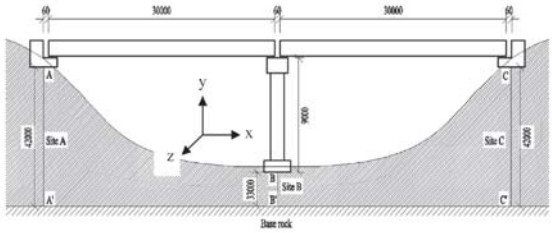
جدول۲. معرفی مشخصات مصالح خاک(رابطی و بازیار ۲۰۱٦)

نوع خاک	$\gamma(kg/m^3)$	E(MPa)	ν	C(Pa)	φ
غیرچسبنده	۱٦۷۲	۹۵۰۰۰۰۰۰	۰/۳۰	۰	۳۰

جدول۳. معرفی حالات و مشخصات مصالح بتن سازه (رابطی و بازیار ۲۰۱۶)

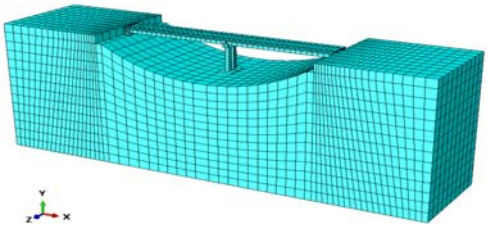
وزن مخصوص (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	v	(K_c)	(e)
۲۴۰۰	۰/۰۰۱	۰/۶۶۶	۰/۱۰
مدول الاستیسیته (پاسکال)	D.Angle	ضریب پوآسون	f_{bo}/f_{co}
۳۵۳۵۵۳۳۹۰۶۰۰	°۳۰/۵	۰/۲۰	۱/۱۶

مشخصات هندسی و مکانیکی پایه پل‌ها و خاک اطراف آن مطابق مطالعه بی و هائو (۲۰۱۵)، که در صحت سنجی استفاده شده در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ مشخصات هندسی مدل مورد بررسی نشان داده شده است.

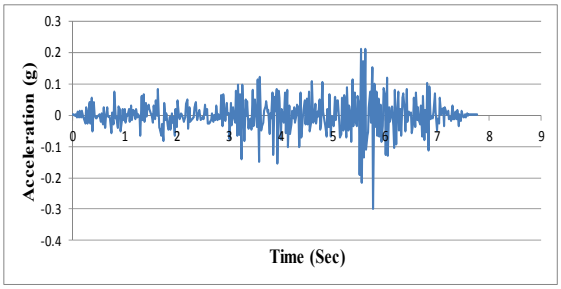


شکل۱. مشخصات هندسی مدل مورد بررسی بی و هائو (۲۰۱۵)

مش بندی مدل اجزای محدود مدل با انجام آنالیزهای مختلف به گونه‌ای انتخاب شده که کمترین تغییر در خروجی با تغییر در مش ایجاد گردد (شکل ۲).



شکل۲. نمایش مش‌بندی یکی از مدل‌های مورد بررسی



شکل۳. تاریخچه شتاب زلزله طبس

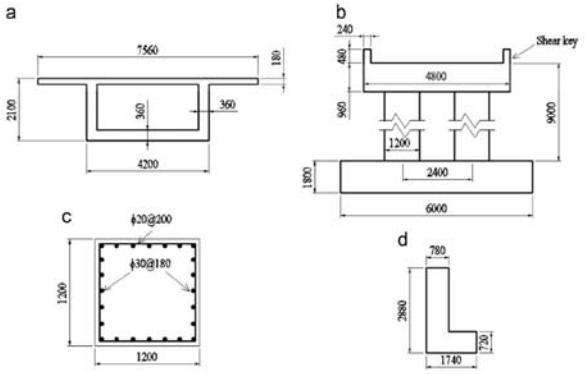
(پایگاه دریافت اطلاعات زلزله و شتاب نگاشت PEER،2018)

۲-۲-بارگذاری

به منظور اعمال موج زلزله، از تاریخچه شتاب زلزله طبس استفاده گردیده و به مدل اجزای محدود مورد مطالعه اعمال می‌گردد (شکل ۳).

۲-۳-صحت سنجی مدل

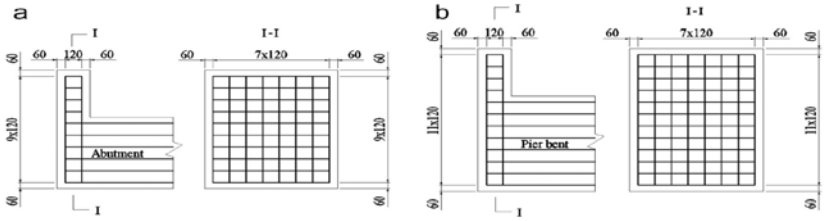
جهت تأیید صحت عملکرد مدل ساخته شده در نرم افرار آباکوس، می‌بایست داده‌های حل عددی را با داده‌های موجود از آزمایش‌های تجربی با داده‌های حل عددی انجام شده مرتبط با موضوع تحقیق مقایسه نماییم. در صورت تطابق داده‌ها می‌توان ادعا کرد که روش عددی اتخاذ شده مناسب می‌باشد. پس از ارائهٔ توضیحات لازم پیرامون روش اجزای محدود مورد استفاده در شبیه‌سازی مدل‌های مورد بررسی، در این بخش به بررسی صحت آن پرداخته خواهد شد. در این مطالعه از نتایج تحقیق بی و هائو (۲۰۱۵)، به منظور اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بکاربرده شده، استفاده گردید. در مطالعه اشاره شده به ارزیابی محاسباتی برش‌گیر پل تحت بار لرزه‌ای پرداخته شده است. مشخصات هندسی و جزئیات پل مورد بررسی در شکل‌های ٤ و ٥ ارائه شده است.



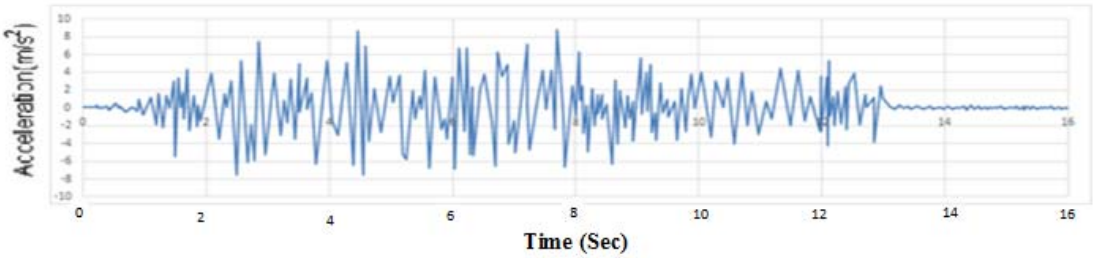
شکل٤. مقاطع پل (a) مقطع شاهتیر، (b) مقطع اسکله مرکزی، (c) مقطع ستون پل (d) مقطع کوله‌ها (بی و هائو، ۲۰۱۵)

لازم به توضیح است که ارتفاع برش‌گیرها برابر ۰/۴۸ متر، ضخامت آن برابر ۰/۲۴ متر و عرض آن برابر ۰/۹۶ و ۱/۵۶ متر می‌باشد. قطر میلگرهای بکار رفته ۲۰ و ۱۶ میلیمتر با فواصل ۱۲۰ و ۱۸۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. ابعاد مش‌بندی در این مطالعه برابر ۶۰ میلیمتر می‌باشد.در این مدل رفتار سازه با توجه به مدل بتن با پلاستیسیته آسیب دیده در آباکوس تعریف می‌گردد. در شکل (۴) نحوه‌ی میلگردگذاری در برش‌گیرها، کوله‌ها (پایه‌های کناری) و ستون پل و مشخصات مصالح بتن و فولاد در جدول (۳) ارائه شده است.

ساختگاه پل دره ای مطابق شکل (۱) می‌باشد که ارتفاع خاک محل ساختگاه پل در پایه میانی و نشیمنگاه کوله‌ها به ترتیب ۳۳ متر و ۴۲ متر لحاظ گردید. مطابق فرضیات تحقیق بی و هائو (۲۰۱۵)، به دلیل صرفنظر از اندرکنش خک-سازه، خاک محل ساختگاه پل، بصورت بستر سنگی با مشخصات جدول۴ در نظر گرفته شده است. بارگذاری مدل مورد بررسی به صورت بار زلزله می‌باشد و بارگذاری از قسمت تحتانی سنگ بستر (نیم فضا) در جهت طولی سازه پل به مدل اعمال گردید. مطابق فرضیات تحقیق بی و هائو (۲۰۱۵)، از مولفه عمودی زلزله صرفنظر گردید است. زمان اعمال شتاب برابر ۱۶ ثانیه و مقدار PGA برابر g ۰/۵ در نظر گرفته شده است (شکل۶).



شکل۵. مسلح‌سازی برش‌گیرها توسط میلگرد (a) کوله‌ها، (b) ستون پل (بی و هائو، ۲۰۱۵)



شکل ۶. زلزله اعمالی در مدل بی و هائو (۲۰۱۵) و مدل اجزای محدود شبیه سازی شده

جدول ۳. مشخصات مصالح پل مورد بررسی در مطالعه بی و هائو (۲۰۱۵)

ضریب پواسون	مدول یانگ(مگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مصالح
۰/۲	۳۵۳۵۵	۵۰	۲۵۰۰	بتن
۰/۳	۲۰۰×۱۰۶	---	۷۸۵۰	فولاد

جدول۴. معرفی خصوصیات خاک در مطالعه بی و هائو (۲۰۱۵)

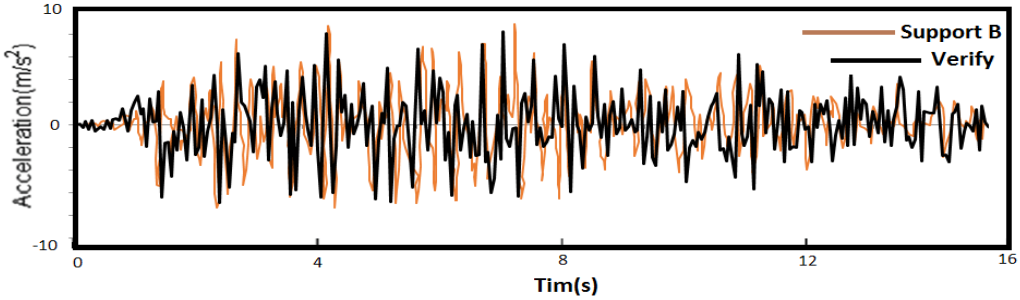
ضریب پواسون	ضریب میرایی	مدول برشی (مگاپاسکال)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	نوع خاک
۰/۳۳	۰/۰۵	۱۸۰۰	۳۰۰۰	سنگ بستر

پس از شبیه‌سازی اجزای محدود مدل اشاره شده، خروجی بدست آمده در این مطالعه نمودار شتاب – زمان در پایه میانی پل (support B) می‌باشد،که ارائه می‌گردد. در نمودار شکل (۷) به مقایسه نتایج حاصل از مطالعه‌ی بی و هائو (۲۰۱۵) و مدل شبیه‌سازی شده با استفاده از روش اجزای محدود بکار رفته در مطالعهٔ حاضر پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم مقادیر شتاب در نمودار استخراج شده از نرم‌افزار ABAQUS (۲۰۱۶) در پایه میانی پل (support B) نزدیک به ماکزیمم مقادیر متناظر آن در نمودار مطاله بی و هائو (۲۰۱۵) می‌باشد بطوریکه بیشترین مقدار آن ۸/۹۱ متر بر مجذور ثانیه و ماکزیمم مقدار شتاب استخراج شده از نرم افزار آباکوس جهت اعتبار سنجی ۸/۲۶ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد، روند شتاب در دو مدل نیز به شکل مناسبی با یکدیگر هماهنگ می‌باشند، در نتیجه می‌توان بیان نمود که روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده دراین مطالعه، از اختلافی حدود ۷/۳ درصد برخوردار بوده و دارای دقت مناسبی می‌باشد.

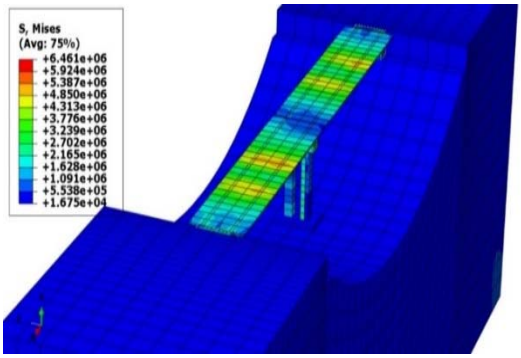
۳-نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر سختی خاک

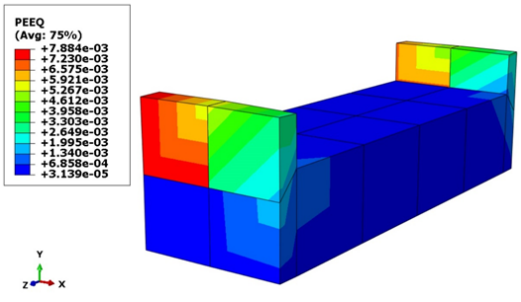
در این بخش با توجه به شرایط انعطاف‌پذیری خاک در شرایط E، E ۰/۵ و ۱/۵E، در سه حالت ۱، ۲ و۳ (جدول ۱)، خروجی ماکزیمم کرنش در برشگیر و ماکزیمم تنش، برش پایه و شتاب در پل ارائه می‌گردد. در شکل ۸ توزیع مقادیر کرنش، توزیع تنش، نمودار تاریخچه‌ی نیروی برشی و شتاب برای حالت ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه کرنش پلاستیک برابر ۰/۰۰۷۸۸، بیشینه تنش ایجاد شده برابر ۶/۴۶۱ مگاپاسکال، بیشینه جابجایی ایجاد شده برابر ۱۸۵ میلیمتر، بیشینه نیروی برش پایه ایجاد شده برابر ۳۷۰ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجاد شده برابر ۲۰ متر بر مجذور ثانیه شده است.



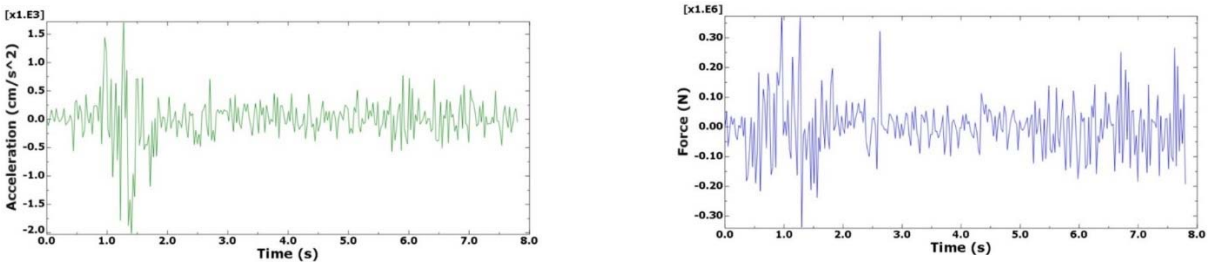
شکل ۷. مقایسه مقادیر شتاب ایجاد شده در مدل بی و هائو (۲۰۱۵) و مدل اجزای محدود شبیه سازی شده



ب



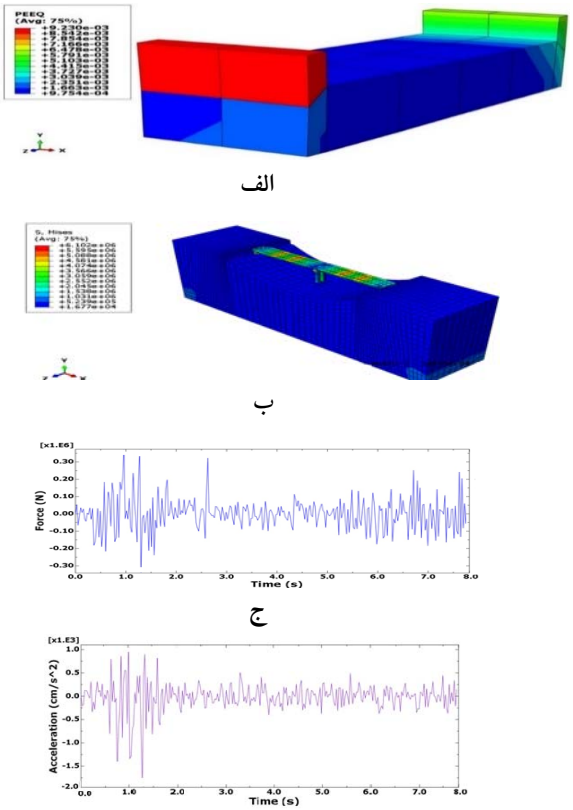
الف



د ج

شکل۸. خروجی‌های مربوط به حالت ۱- رفتار الاستیک با سختی E الف: توزیع کرنش پلاستیک در برشگیر ب: توزیع تنش ج: نمودار نیروی برش پایه د:نمودار شتاب

در شکل ۹ خروجی‌های مربوط را برای سختی برابر E۰/۵ در حالت ۲ ارائه گردیده است و در نهایت در شکل۱۰ خروجی‌های مربوط را برای سختی برابر E۱/۵ در حالت ۳ ارائه می‌گردد.



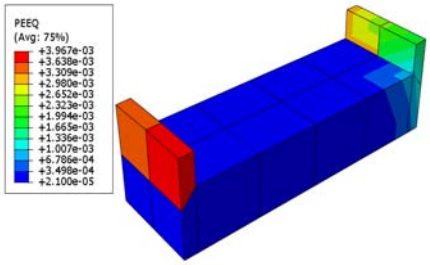
الف

ب

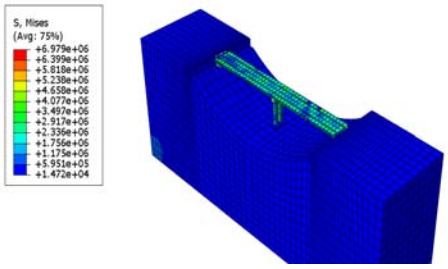
ج

د

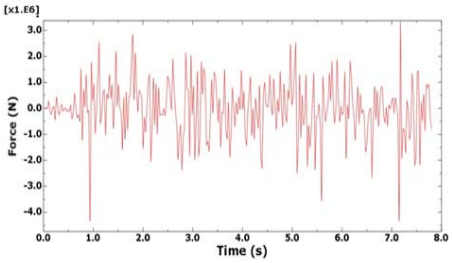
شکل۹. خروجی‌های مربوط به حالت ۲- رفتار الاستیک با سختی E۰/۵ الف: توزیع کرنش پلاستیک در برشگیر ب: توزیع تنش ج: نمودار نیروی برش پایه د:نمودار شتاب



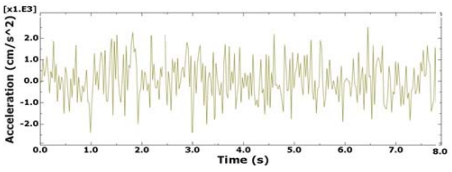
الف



ب



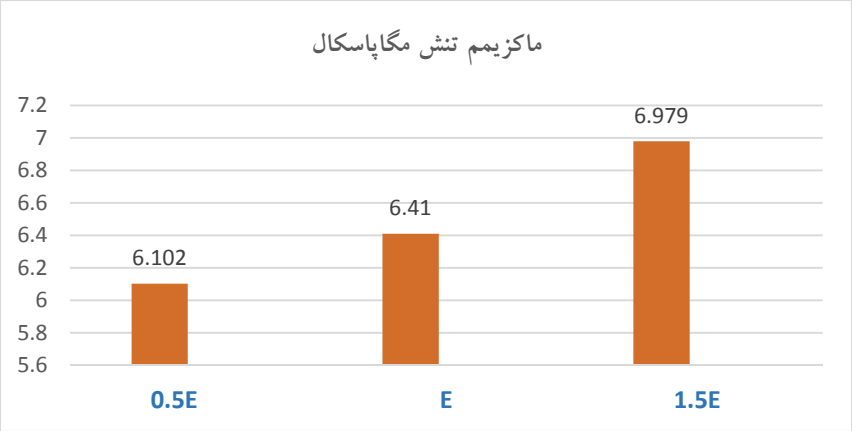
ج



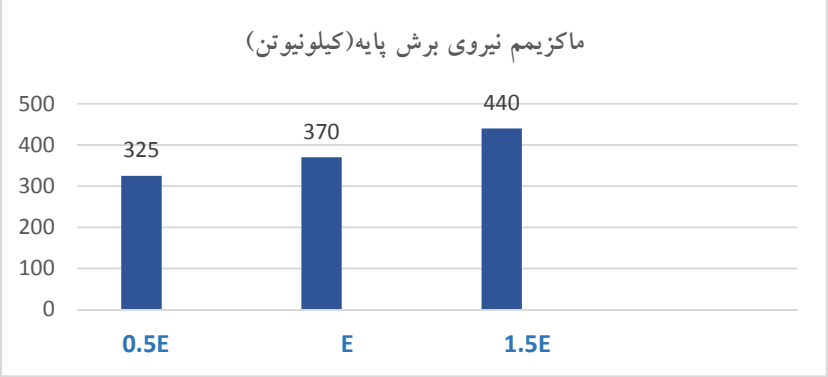
د

شکل ۱۰ خروجی‌های مربوط به حالت ۳- رفتار الاستیک با سختی ۱/۵E الف: توزیع کرنش پلاستیک در برشگیر ب: توزیع تنش ج: نمودار نیروی برش پایه د:نمودار شتاب

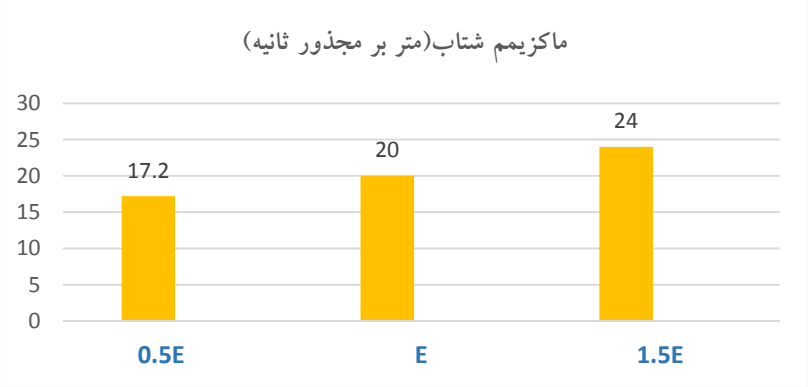
با توجه به استخراج خروجی‌های مربوط به شکل‌های ۹ و ۱۰، به مقایسه مقادیر ماکزیمم تنش، نیروی برش پایه و شتاب ایجاد شده در پل و ماکزیمم کرنش در برشگیر، با هدف بررسی اثر سختی خاک پرداخته شده است (به ترتیب شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴). همانطورکه ملاحظه می‌شود افزایش سختی خاک سبب شده است که بیشینه تنش، نیروی برش پایه و شتاب ایجاد شده در پل افزایش یابد، و بیشینه تنش ایجاد شده در پل را در شرایط خاک سخت‌تر (1.5E) نسبت به شرایط اولیه خاک (E) تا ۲۵ درصد افزایش دهد. در شرایط خاک سست‌تر (0.5E) این مقدار به میزان ۲۱ درصد نسبت به حالت سختی اولیه E خاک کاهش می‌یابد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تغییرات سختی خاک پاسخ تنش‌های ماکزیمم را تا ۳۷ درصد با تغییر روبرو می نماید. در خصوص نیروی برشی و شتاب ماکزیمم در پایه پل تغییرات سختی از 0.5E تا 1.5E بر روی نتایج، پاسخ‌ها را با تغییرات ۳۳ درصدی مواجه می نماید. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر ساختگاه بستر پل صلب‌تر باشد تنش، شتاب و نیروی برش پایه ناشی از بارهای دینامیکی زلزله وارد بر پل‌ها بیشتر می‌شود. بنابراین سختی بستر پل می‌تواند عملکرد سازه‌ی پل را تحت تاثیر قرار دهد.این مسأله لزوم تأثیر مشخصات سختی خاک در طراحی پل‌ها را ضروری می‌نماید، که این موضوع می‌تواند باعث طراحی فنی و اقتصادی‌تر پل گردد. در خصوص میزان تأثیر تغییرات سختی خاک بر روی پاسخ برشگیرها همانطور که از شکل ۱۴ مشخص می‌گردد، میزان تأثیر تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. لذا با توجه به نقش برشگیرها در شرایط لرزه‌ای ، اهمیت این موضوع دوچندان می‌گردد.



شکل ۱۱. مقایسه ماکزیمم تنش پل با هدف بررسی اثر سختی خاک



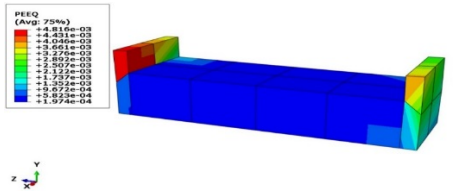
شکل ۱۲. مقایسه ماکزیمم نیروی برش پایه پل با هدف بررسی اثر سختی خاک



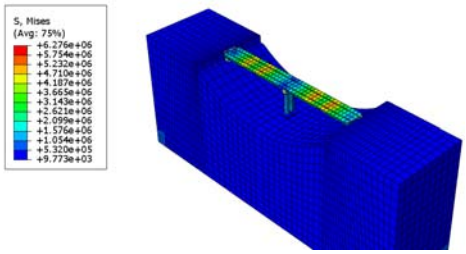
شکل ۱۳. مقایسه ماکزیمم شتاب ایجاد شده در پل با هدف بررسی اثر سختی خاک

۳-۲- بررسی اثر مدل رفتاری خاک در پل و برشگیر

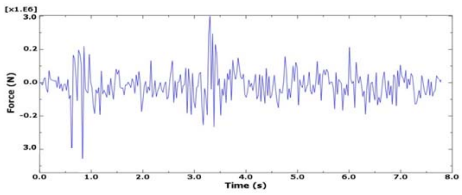
در این قسمت مدل رفتاری خاک که در شرایط معمول از نوع الاستیک خطی اختیار می‌گردد، با مدل رفتاری خاک از نوع الاستو-پلاستیک (موهر- کلمب) با سختی E جایگزین شده است. خاک مورد بررسی برای رفتار غیر خطی مجدد از نوع غیرچسبنده می‌باشد. خاک غیر چسبنده مانند ماسه ،چسبندگی موثر زیادی از خود نشان نمی‌دهد، ولی زاویه اصطکاک موثرنسبتاً زیادی دارد. مقادیر ماکزییم کرنش در برشگیر، ماکزیمم تنش، نیروی برش پایه و شتاب در پل در شکل (۱۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، بیشینه کرنش پلاستیک برابر ۰/۰۰۴۸۱۶، بیشینه تنش ایجاد شده برابر ۶/۲۷۶ مگاپاسکال، بیشینه نیروی برش پایه ایجاد شده برابر ۳۵۵ کیلونیوتن و بیشینه شتاب ایجاد شده برابر ۱۹ متر بر مجذور ثانیه شده است. در شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) به مقایسه مقادیر ماکزیمم تنش، نیروی برش پایه و شتاب ایجاد شده در پل و ماکزیمم کرنش در برشگیر با هدف بررسی اثر نوع مدل رفتاری پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد در حالت استفاده از مدل رفتاری موهر-کلمب، مقادیر تنش به مقدار حدود ۲/۹ درصد نسبت به حالت مدل رفتاری الاستیک خطی کاهش یافته است. همچنین مقدار نیروی برش پایه و شتاب ایجاد شده در مدل رفتاری موهر-کلمب به ترتیب به میزان ۴/۲ و ۵ درصد کمتر از مدل رفتاری الاستیک خطی شده است. در تمامی مدل‌های مورد بررسی، سازه بصورت غیرخطی مدلسازی شده است، به نوعی تاثیر خطی و غیرخطی بودن ساختگاه در پاسخ نهایی مجموعه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که انتخاب مدل رفتاری خاک می‌تواند در برآورد پاسخ پل در برابر بارهای لرزه‌ای موثر باشد. بنابراین، هر چه مدل رفتاری پیشرفته‌تر و پارامترهای بیشتری در آن دخیل باشد، رفتار واقع بینانه‌تری از خاک را می‌تواند شبیه‌سازی کند. نکته مهم مجدداً در بخش برشگیر پل‌ها است که نشان دهنده تأثیر خیلی زیاد تا ۱۰۰ درصد در پاسخ ها با تغییر رفتار خاک است. به عبارتی با وجود تأثیر کم تغییر رفتار در پاسخ پل (با تغییر مدل رفتاری)، که می‌تواند به دلیل نوع خاک و تاریخچه زمانی زلزله انتخابی باشد. با این وجود تأثیر لحاظ نمودن رفتار واقعی خاک باعث برآورد صحیح عملکرد برشگیرها به عنوان عضوی مهم در شرایط لرزه‌ای خواهد گردید.



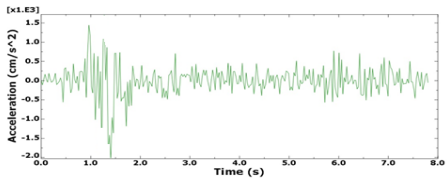
الف



ب

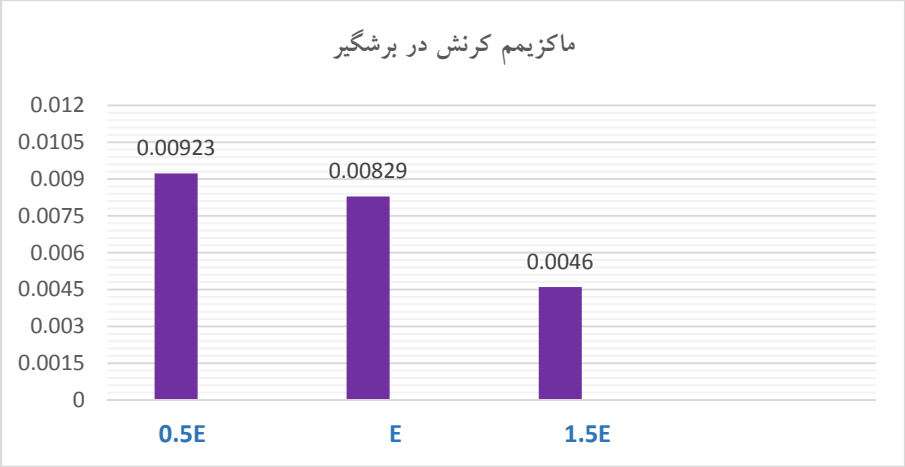


ج

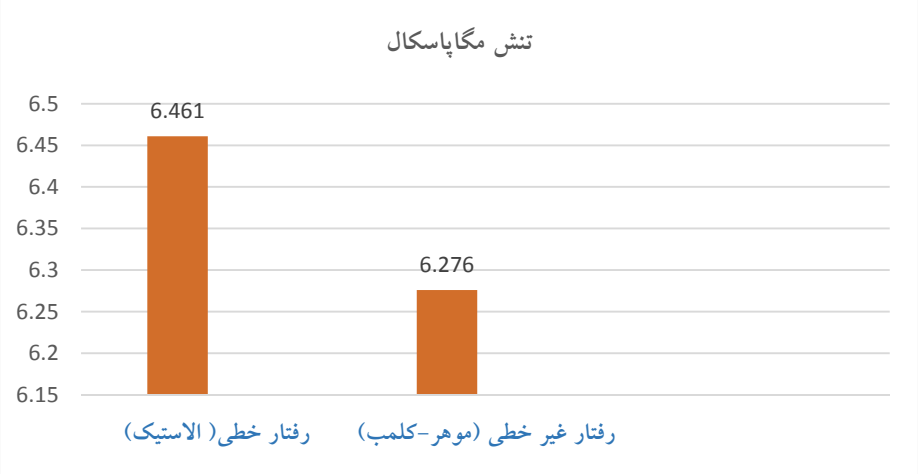


د

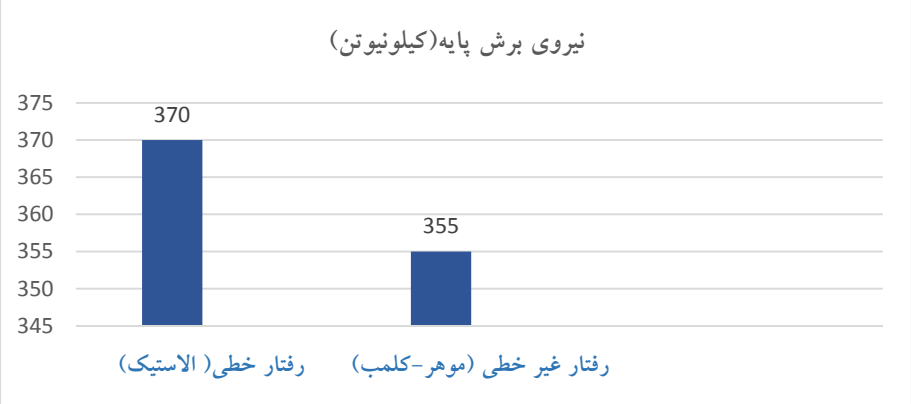
شکل ۱۵. خروجی‌های مربوط به حالت ٤- رفتار الاستیک با سختی E الف: توزیع کرنش پلاستیک در برشگیر ب: توزیع تنش ج: نمودار نیروی برش پایه د:نمودار شتاب



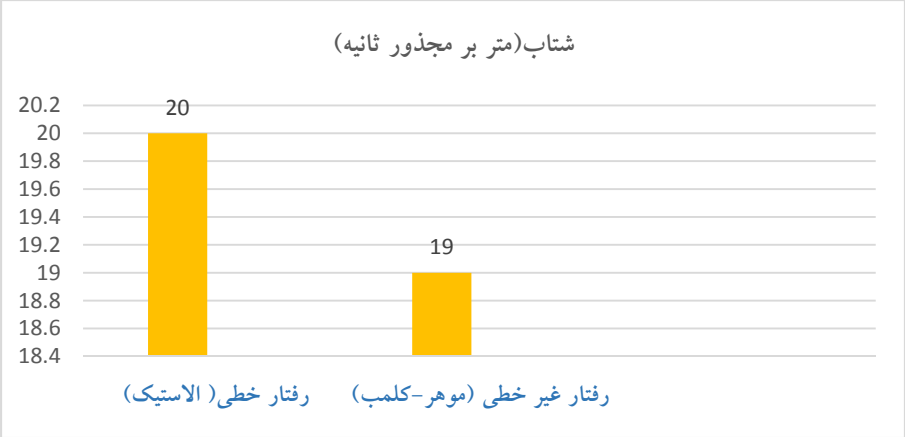
شکل۱٤. مقایسه ماکزیمم کرنش ایجاد شده در برشگیر پل با هدف بررسی اثر سختی خاک



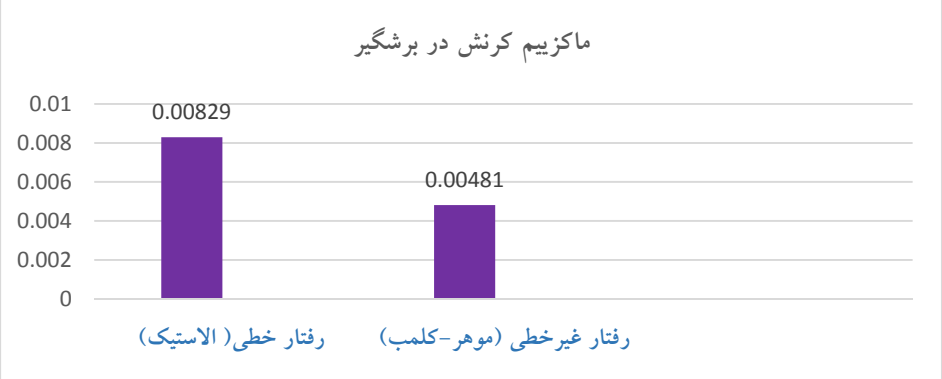
شکل۱۵.مقایسه ماکزیمم تنش پل با هدف بررسی اثر مدل رفتاری خاک



شکل ۱٦. مقایسه ماکزیمم نیروی برش پایه پل با هدف بررسی اثر مدل رفتاری خاک



شکل ۱۷. مقایسه ماکزیمم شتاب ایجاد شده در پل با هدف بررسی اثر مدل رفتاری خاک



شکل۱۸. مقایسه ماکزیمم کرنش ایجاد شده در برشگیر پل با هدف بررسی اثر مدل رفتاری خاک

٤- بحث

خلاصه‌ای از مقادیر ماکزیمم پاسخ در پل‌ها و برشگیر آنها در جدول ۵ ارائه گردیده است. همانگونه که از این جدول ملاحظه می‌گردد، ماکزیمم کرنش در برشگیرها با تغییر انعطاف‌پذیری خاک (حالت ۲ و ۳) تا حدود ۱۰۰ درصد متغیر می‌باشد، در حالیکه ماکزیمم نیروی برش پایه و شتاب در پل تا حدود ۳۵ درصد تغییر می‌نماید. مقایسه رفتار الاستیک و الاستو- پلاستیک خاک با سختی E نیز سبب کاهش تا نصف در ماکزیمم کرنش در برشگیرها و تغییرات ٦ درصدی در ماکزیمم برش پایه و شتاب ماکزیمم در پل می‌گردد. ذکر این نکته لازم است که تغییرات جنس خاک و محتوای فرکانسی با زلزله‌های مختلف، باعث تغییرات و تفاوت در پاسخ‌ها به گونه‌ای دیگری خواهد شد که قابل بررسی می‌باشد.

جدول۵. مقایسه مقادیر ماکزیمم کرنش در برشگیر و ماکزیمم تنش، نیروی برش پایه و شتاب در پل درحالت‌های مختلف

حالت	رفتار خاک- میزان سختی	کرنش ماکزیمم در برشگیر	تنش ماکزیمم در پل (مگاپاسکال)	نیروی برش پایه ماکزیمم در پل (کیلونیوتن)	شتاب ماکزیمم در پل (متربرمجذور ثانیه)
۱	خاک الاستیک با سختی E	۸/۲۹x ۱۰^۸ -۳	٦/٤٦١	۳۷۰	۲۰
۲	خاک الاستیک با سختی 0.5E	۹/۲۳x ۱۰^۸ -۳	٦/۱۰۲	۳۲۵	۱۷/۲
۳	خاک الاستیک با سختی 1.5E	٤/٦x ۱۰^۸ -۳	٦/۹۷۹	٤٤۰	۲٤
٤	خاک با مدل رفتاری الاستو- پلاستیک (موهر-کلمب) با سختی E	٤/۸۱x ۱۰^۸ -۳	٦/۲۷٦	۳۵۵	۱۹

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثرات انعطاف پذیری و تغییر رفتار خاک بر میزان پاسخ در سازه و برشگیر پل‌ها تحت اثر زلزله طبس پرداخته شد. پس از اثبات صحت عملکرد مدل عددی، مطالعات پارامتری انجام و نتایج زیر حاصل گردید.

-نتایج حاصل ازتغییرات سختی خاک نشان می‌دهد که بیشینه تنش، نیروی برش پایه و شتاب ایجاد شده در پل با افزایش سختی خاک افزایش می‌یابد، با افزایش سختی از 0.5E تا 1.5E تغییرات نیروی برشی ماکزیمم تا حدود ۳۳ درصد افزایش می یابد. این موضوع در خصوص حداکثر تنش در کل پل تا ۳۷ درصد می باشد.از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر ساختگاه بستر پل صلب‌تر باشد تنش، شتاب و نیروی برش پایه ناشی از تاثیر سختی خاک بر پاسخ برشگیرها بسیار مهم می‌باشد، به عبارتی، هنگامی که شرایط ساختگاه سخت‌تر گردد، مقادیر کرنش ماکزیمم ایجاد شده تحت بار لرزه‌ای نسبت به حالت خاک سست‌تر کمتر می‌گردد. مقدار این تغییر تا نصف در پاسخ مشاهده می‌گردد. مقایسه پاسخ در برشگیر پل با شرایط رفتار الاستیک خاک زیر پل با سختی E نسبت به رفتار الاستو- پلاستیک خاک با همان سختی، نیز سبب کاهش تا نصف در ماکزیمم کرنش در برشگیرها گردیده است. با توجه به تأثیر تغییرات ساختگاه احداث پل با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه و مدلسازی واقعی رفتار الاستو- پلاستیک خاک، خصوصاً جهت رفتارسنجی برشگیر پل‌ها که در عملکرد آنها در شرایط لرزه‌ای بسیار اهمیت دارد، تحلیل پل با در نظر گرفتن اثر خاک، مسأله‌ای ضروری و اجتناب ناپذیر می‌باشد. البته تحلیل این موضوع تحت اثر زلزله‌ها و محتوای فرکانسی مختلف، می‌تواند نتایج قابل توجه‌ای را به طراحان و تحلیل گران مسائل پل ارائه نماید.

٦-مراجع

- دهقانی، حمیدرضا و دهقانی، احسان (۱۳۹۷). مقایسه روشهای مختلف تحلیل لرزه‌ای در برآورد رفتار لرزه‌ای پل‌های قوسی فولادی در جهت طولی. *پژوهشنامه حمل و نقل*، شماره ٥٦، ۱۴۴-۱۲۳.

- رضایی تبریزی، علی (۱۳۸۱). مطالعه اثر اندرکنش سازه-خاک- سازه بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلند. پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: فریبرز ناطقی الهی، تهران: *پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*.

- شیرگیر، وحید (۱۳۹۳). ارائه مدل تحلیلی رفتار لرزه‌ای پایه پلها با در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک- سازه. پایان نامه کارشناسی

ارشد، استاد راهنما: علی قنبری، تهران: دانشگاه تربیت معلم (خوارزمی).

– صالحی، احمد (۱۳۸٤). تحلیل لرزه‌ای غیرخطی پل‌های پس کشیده جعبه‌ای با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه. پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: امیرمهدی حلبیان، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.

– صمدیان، بهروز، جانعلیزاده، عسکر و واثقی امیری، جواد (۱۳۸۳). لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه در تحلیل دینامیکی سازه‌ها. تهران: اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه شریف.

– فیض‌اله زاده‌خویی، ایمان، موحدی‌فر، مجتبی (۱۳۹٦). اثر سختی خاک بر عملکرد لرزه‌ای پل‌های یکپارچه. *پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری*، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس.

– وتر، محمد قاسم، عظیمی، نیما، زاهدی، مهدی و خالقی، احمد (۱۳۹٦). اثر رفتار غیر خطی خاک و اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند. *کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر*، تهران، دانشگاه اسوه، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.

– قدرتی امیری، غلامرضا؛ رازقی، حمیدرضا، خدابخشی، مسعود و اقبالی، مهدی، (۱۳۹۲). اثرات مدلسازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی. *مهندسی حمل و نقل*، سال چهارم، شماره چهارم،۱۱۲–۸۸.

– محتشمی، احسان؛ شوشتری، احمد (۱۳۹۳). بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای پل‌های یکپارچه. هشتمین کنگره ملّی مهندسی عمران. دانشکده مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت‌ماه، *دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل*.

– محمدزاده، یعقوب (۱۳۹۵). تحلیل اندرکنش پی– خاک و سازه در رفتار لرزه‌ای پل‌ها به روش المان محدود (مطالعه موردی). پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: غلام مرادی، تبریز: دانشگاه تبریز.

– یحیی‌نسب، محمد امین (۱۳۹۰). بررسی اندرکنش خاک– سازه در پل‌های یکپارچه. پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: غلام مرادی، تبریز: دانشگاه تبریز.

-ABAQUS theory manual. Pawtucket, (2016). R.I: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. *Version 6.11*.

-Bi, Kaiming And Hao, Hong (2015). Modelling of shear keys in bridge structures under seismic loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 74, 56-68.

-Bozorgzade, A., Megally, S., Restrepo, J. I. And Ashford, S. A. (2006). Capacity evaluation of exterior sacrificial Shear keys of bridge abutments. *Bridge Engineering*, September/October 555-565.

-Callisto, L., Rampello, S. And Viggiani, G. M. (2013). Soil–structure interaction for the seismic design of the Messina strait bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 103-115 .

-Dezi F. Carbonari S; Tombari A. Leoni G. (2012). Soil-structure interaction in the seismic response of an isolated three span motorway overcrossing founded on piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 151-163.

-Goele, R. K. And Chopra, A. K. (2008). Role of Shear keys in seismic behavior of bridges crossing fault-rupture zones. *Bridge Engineering*, 13(4), 398-408.

-Megally, S. H., Silva, P. F. And Seible, F. (2001). Seismic response sacrificial shear keys in bridge abutments. *The University of California*.

-RabetiMoghadam M., Baziar M. H., (2016). Seismic groundmotion amplification pattern induced by a subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 81-97.

-Salveson, M. W. And Fell, B. V. (2011). Effect of abutment shear keys on the seismic response of bridges. *Structures Congress*, 265-275.

-Spyrakos, C. C. and Vlassis, A. G. (2002). Effect of soil-structure interaction on seismically isolated bridges. *Earthq. Eng*., 6(3): 391-429.

-www.Peer.ir

Effect of Soil Flexibility and Behavior on Seismic Response of Shear Keys in Bridges

Afshin Hefzi, Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.
Hadi Dashti, Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.
Alireza Fiouz, School of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

E-mail: hdashti1356@yahoo.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT
In recent decades, several studies have been conducted on the seismic behavior of bridges under various earthquakes. Shear keys in bridge, as fuse elements, play an important role in bridges to prevent the deck of the bridge from falling under the structure. But, an important issue that has not been given much attention in these studies is the effect of the site effect of bridge on the responses generated in the shear keys at the time of the earthquake. In the present study, after constructing a finite element model of a bridge with its other components, including shear keys, in realistic three-dimensional conditions, the accuracy of the model's performance is confirmed by comparing it with valid results. Then, considering the effect of soil flexibility and linear and nonlinear soil behaviors under the bridge, their effects on seismic response (under the TABAS earthquake) in the bridge and shear keys will be examined. The changes in the response of the bridge can be seen in some cases up to 37% due to the flexibility of the soil. Under the influence of change in soil flexibility and also taking into account soil behavior more realistically under the conditions of soil elasto-plastic behavior, the response in shear keys is up to 100% different. This makes it necessary to carefully design the bridges, especially the shear keys them under different earthquakes and soils.

Keywords: Earthquake, Numerical, Shear Key, Soil Stiffness, Soil- Structure Interaction