

اثرات مدل‌سازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی

غلامرضا قدرتی امیری (مسئول مکاتبات)، استاد، قطب علمی پژوهش‌های بنیادین در مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حمید رضا رازقی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مسعود خدابخش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مهدی اقبالی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: ghodrati@iust.ac.ir

پذیرش: ۹۲/۰۳/۲۷

دریافت: ۹۱/۱۲/۲۶

چکیده

تحلیل رفتار لرزه‌ای و مدل‌سازی پل‌ها معمولاً با استفاده از فرضیات ساده‌کننده و به منظور سهولت در تحلیل‌ها انجام می‌شود. این ساده‌سازی‌ها ممکن است باعث ایجاد تغییرات عمده در پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای پل‌ها شود. از موارد مهم در این زمینه نحوه مدل‌سازی کوله‌ها و اختصاص مفاصل پلاستیک پایه‌ها است. استفاده از مدل‌های ساده، غلتکی و کامل کوله در پل‌ها و نیز نحوه تعریف انواع مفاصل پلاستیک پایه‌ها همواره در طراحی و بررسی رفتار لرزه‌ای پل‌ها حائز اهمیت بوده است. با توجه به گستردگی ساخت و ساز پل‌های بتنی با دهانه‌های ساده و دال یکپارچه در کشور و نیز روش‌های مختلف طراحی و تحلیل پل‌های بتنی، بنابراین در این پژوهش اثر سه نوع مختلف کوله و انواع مفاصل پلاستیک و نحوه مدل‌سازی سایر اجزا مربوط به شش مدل از پل‌های بتنی موجود با ارتفاع و طول متفاوت بررسی شده است. برای بررسی این اثرات از نتایج تحلیل‌های مودال و استاتیکی غیرخطی و روش طیف ظرفیت ATC-40 استفاده شده است. نتایج تحلیل‌ها به صورت مودهای ارتعاشی، بیشینه برش پایه و نقطه عملکرد در دو جهت طولی و عرضی و راستای 45° نسبت به جهت طولی پل‌ها ارائه شده‌اند. برای پل‌هایی با طول کلی حداکثر ۸۰ متر اختلاف زیادی بین مقادیر زمان‌های تناوب ارتعاشی، بیشینه برش پایه و نقاط عملکردی پل به دست آمده و بنابراین در تحلیل رفتار لرزه‌ای این پل‌ها چشم‌پوشی از رفتار غیرخطی اجزای کوله‌ها موجب ایجاد خطاهای عمده در نتایج تحلیل شده است. در پل‌های بلند با طول کلی حداقل ۱۲۰ متر پاسخ‌ها با مدل‌های مختلف اجزای پل‌ها تقریباً مشابه هستند. با توجه به اینکه پل‌های مورد مطالعه از پل‌های موجود و رایج در کشور هستند بنابراین نتایج به دست آمده برای کاربرد در طراحی، مدل‌سازی و ارزیابی لرزه‌ای پل‌های با دهانه‌های ساده و دال یکپارچه مورد استفاده خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: پل‌های بتنی، مدل‌سازی کوله، مفاصل پلاستیک، رفتار لرزه‌ای

۱. مقدمه

تحقیقات مختلفی در مورد پاسخ لرزه‌ای پل‌های بزرگراهی در معرض بارهای لرزه‌ای پس از زلزله سان فرناندو در سال ۱۹۷۱ انجام شده است. نتایج به دست آمده به منظور افزایش دقت پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای پل‌ها در رخداد زمین لرزه‌ها با شدت‌های مختلف بکار گرفته شده‌اند. اکثر پژوهش‌های انجام یافته در مورد پاسخ لرزه‌ای پل‌ها مرتبط با رفتار دینامیکی عرشه پل هستند و در مورد نقش کوله‌ها در پاسخ لرزه‌ای پل‌ها تحقیقات بسیار کمی انجام شده است. رفتار کوله‌ها در اثر اندرکنش خاک-سازه و انعطاف‌پذیری خاک ریز در وقایع زمین‌لرزه‌های اخیر، حاکی از تأثیر چشم‌گیر کوله‌ها بر رفتار لرزه‌ای سیستم پل‌ها تحت زلزله‌های با شدت متوسط و شدید بوده و نشانگر میزان اهمیت کوله‌ها در پاسخ لرزه‌ای پل‌ها است.

کوله‌ها اعضای مناسبی برای انتقال نیروهای اینرسی در زمان وقوع زلزله هستند و با اصول حاکم برای دیوارهای حائل و مبتنی بر تئوری فشار محرک و مقاوم خاک طراحی می‌شوند. در زمان رخداد زمین‌لرزه، مقادیر نیروهای اینرسی بیشتر از شرایط پیش‌بینی شده فشار مقاوم خاک بوده و بنابراین کاربرد فرضیات ساده‌کننده برای طراحی کوله‌ها مناسب نخواهد بود. به عنوان نمونه در زمین‌لرزه سان فرناندو مشخص شد که مقاومت ارایه شده به وسیله خاک ریز کوله تأثیر مهمی بر روی رفتار دینامیکی برخی پل‌ها داشته است. در مورد مدل‌سازی کوله‌ها در ارزیابی رفتار کوله‌ها تحقیقات مهمی توسط [Wilson, 1988, 1990]، [Maroney and Chai, 1994]، [Shamsabadi et al., 2007]، [Kotsoglou and Pantazopoulou, 2007] و [Stergios and Mitoulis, 2012] انجام شده است. نحوه مدل‌سازی کوله‌ها برای تحلیل لرزه‌ای پل‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ توسط [Wilson, 1988] ارایه شد و امروزه نیز به عنوان پایه و اساس بسیاری از روش‌های مدل‌سازی کوله‌ها استفاده می‌شود.

در این روش، سختی کوله‌های مربوط به پل‌های یکپارچه بدون انحنا در پلان با یک مدل تحلیلی ساده جهت تشریح سختی این نوع کوله‌ها در تحلیل لرزه‌ای پل‌های بزرگراهی توسعه داده شده است. این مدل شامل ارزیابی سختی فنرهای معادل و مجزا در جهت درجات آزادی انتقالی و دورانی کوله‌ها و اثرات ناشی از دیوارهای بالی، شمع‌ها و خاک است. در این مدل تحلیلی فنرها به عنوان المان‌های مرزی در پاسخ دینامیکی تحلیل اجزای محدود اعضای روسازه پل‌ها موثر بوده‌اند. اثر مدل کوله با تغییرات مدول کشسانی خاک بر روی سختی پل و از طریق محاسبه و تشکیل ماتریس سختی با شش فنر مجزا شامل سه فنر انتقالی و سه فنر چرخشی در هر انتهای کوله انجام می‌شود. نتایج تحقیق با استفاده از مطالعات پارامتری بر روی سختی پل‌های بزرگراهی با یک دهانه، نشانگر اهمیت سختی کوله در تعیین فرکانس‌های پل و شکل‌های مودی آن در جهت قائم و عرضی پل بوده است. [Wilson and Tan, 1990] مدلی برای ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای پل‌های بزرگراهی با کوله‌های واقع بر خاکریز را مورد بررسی قرار دادند و به نتایج بسیار مشابهی با تحلیل‌های پیچیده و دقیق و نیز تحلیل اجزا محدود برای سیستم خاک و کوله دست یافته‌اند. [Maroney and Chai, 1994] با انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس، مدل غیرخطی کوله در جهت طولی برای دو نوع پل‌های با دهانه ساده و عرشه پیوسته با کوله را ارایه کرده‌اند. شمس‌آبادی و همکاران اندرکنش خاک و کوله پل را برای طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد مورد بررسی قرار داده‌اند [Shamsabadi et al., 2007]. نتایج به دست آمده به طور بسیار موثر در پیش‌بینی رفتار پاسخ واقعی پل‌ها در طراحی بر اساس عملکرد در آیین‌نامه طرح لرزه‌های کالیفرنیا [CALTRANS, 2004] مورد استفاده قرار گرفته است. [Kotsoglou and Pantazopoulou, 2007] مدل‌سازی و ارزیابی مشارکت خاکریز در پاسخ لرزه‌ای پل‌ها با کوله پیوسته را تحقیق کرده‌اند. برای این منظور، مدل تحلیلی پاسخ کلی

را ارایه کرده است [Chen, 1993]. [Zheng et al., 2003] ژنگ و همکاران پیش بینی پاسخ لرزه‌ای پل‌های فولادی چند دهانه پیوسته را از طریق انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار داده‌اند [Zheng et al., 2003]. نتیجه تحقیق به صورت ارایه روش تحلیل استاتیکی غیرخطی برای انواع مختلف سازه‌ها با مشارکت اثرات مودهای بالاتر ارایه شده است. [Pinho et al, 2007] کارآیی روش تحلیل استاتیکی غیرخطی با یک بار اجرا نسبت به روش‌های سنتی موجود مطالعات پارامتری بر روی یک مجموعه از پل‌های چند دهانه با دال یکپارچه را تحقیق کرده‌اند. [Banerjee and Shinozuka, 2007] در پژوهشی از روش طیف ظرفیت ATC-40 برای محاسبه تغییر مکان‌های طیفی و تبدیل آنها به چرخش ستون‌های پل‌ها به منظور استخراج منحنی‌های شکنندگی استفاده کرده‌اند و نتایج بامنحنی‌های شکنندگی حاصل از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه شده است. [Isaković et al., 2008] قابلیت استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی را برای تحلیل لرزه‌ای پل‌ها بررسی کرده‌اند. [Shattarata et al., 2008] روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی موجود در ATC-40 و قابلیت‌های نرم‌افزاری را برای تحلیل لرزه‌ای پله‌ای بزرگراهی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده مناسب بودن استفاده از روش‌های استاتیکی برای کاربرد در نرم‌افزارهای مختلف به منظور برآورد مناسب خسارت سازه‌ها و ارایه نتایج گرافیکی از آنها بوده است. [Aviram et al., 2008] در پژوهشی به بررسی و معرفی مجموعه‌های از روش‌های کاربردی و غیرخطی برای مدل‌سازی و تحلیل لرزه‌ای پل‌های بزرگراهی پرداخته‌اند. روش‌های ارایه شده برای تطابق با قابلیت‌های دینامیک افزاینده OpenS-ees و SAP2000 برای کاهش خطاهای روش‌های مختلف و نیز ارایه روش مناسب برای تحلیل انواع سازه‌های پل‌ها ارایه شده است. [Kotsoglou and Pantazopoulou, 2010] روشی جامع برای مدل‌سازی و ارزیابی لرزه‌ای پل‌های کوتاه بزرگراهی

پل با در نظر گرفتن اثرات خاکریز و نوع کوله‌ها ارایه شده است و ظرفیت باربری کل سازه پل نیز از طریق انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA) به دست آمده است. [Stergios and Mitoulis, 2012] استروگیوس و میتولیس عملکرد کوله‌های پیوسته و غیرپیوسته با عرشه در پاسخ لرزه‌ای پل‌ها را بررسی و اثرات قابل توجه کوله و اجزای مجاور آن در کاهش چشمگیر تقاضای لرزه‌ای پل‌ها را اثبات کرده‌اند [Stergios and Mitoulis, 2012].

برای در نظر گرفتن اثرات ناشی از اجزای مختلف مقاوم پل‌ها در برابر زلزله پژوهش‌های مهمی توسط [Megally et al., 2001] و [Makris and Zhang, 2002] انجام شده است. مگالی و همکاران با انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس مدل غیرخطی برای برشگیرهای داخلی و خارجی موجود بر روی کوله‌ها ارایه کرده‌اند. نتایج به دست آمده به طور قابل ملاحظه‌ای برای ارزیابی ظرفیت و عملکرد برشگیرها پس از وقوع بارگذاری‌های چرخ‌های موثر واقع شده‌اند. مارکیز و ژانگ اثرات ناشی از وجود میراگرها و بالشتک‌های الاستومری را در تحلیل پاسخ لرزه‌ای و مشخصات سازه‌های پل‌های بزرگراهی مورد مطالعه قرار داده‌اند [Makris and Zhang, 2002].

محققان و پژوهشگران متعددی در مورد تحلیل لرزه‌ای انواع پل‌ها تحقیق کرده‌اند. مهم‌ترین تحقیقات انجام گرفته در این زمینه مربوط به بررسی کارآیی انواع تحلیل‌های لرزه‌ای و نیز ارایه روش‌های جدید توسط [Chen, 1993]، [Zheng et al., 2003]، [Pinho et al., 2007]، [Banerjee and Shinozuka, 2007]، [ka, 2007]، [Isaković et al., 2008]، [Shattarata et al., 2008]، [Aviram et al., 2008]، [Kotsoglou and Pantazo, 2010] انجام شده است. [Chen, 1993] چن روش تحلیل استاتیکی و دینامیکی اصلاح شده برای ارزیابی پل‌های بتنی تحت اثر بارهای لرزه‌ای و سایر بارها چون وسائط نقلیه

به منظور بررسی پاسخ دینامیکی این نوع پل‌ها را با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه ارایه کرده‌اند.

با توجه به تحقیقات انجام گرفته، هدف از این انجام این پژوهش بررسی میزان اثرات نحوه مدل‌سازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی بزرگراهی است. برای این منظور از نتایج تحقیقات و آزمایش‌ها معتبر برای مدل‌سازی اجزای مختلف تشکیل‌دهنده پل‌ها و انواع مدل غلتکی، ساده و کامل کوله‌ها و نیز نحوه مدل‌سازی مفاصل پلاستیک پایه‌ها استفاده شده است. به منظور بیان نتایج از تحلیل مودال، تحلیل لنگر-انحناء، تحلیل استاتیکی غیرخطی و برای بررسی عملکرد سازه‌های مورد مطالعه از روش طیف ظرفیت $ATC-40$ [ATC-40, 1996] در درجهت طولی، عرضی و راستای 45° درجه با جهت طولی پل‌ها استفاده شده است. مدل‌های مورد مطالعه شامل شش نمونه از پل‌های بتنی موجود در کشور دارای ۲، ۴ و ۶ دهانه و ارتفاع پایه‌های $3/5$ و ۱۰ متر با سیستم سازه‌های دال پیوسته با قاب‌های میانی و دهانه‌های ساده بوده‌اند.

۲. مشخصات و نحوه مدل‌سازی پل‌های مورد مطالعه

۲-۱ مشخصات پل‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، شش مدل پل با دو ارتفاع پایه $5/3$ و ۱۰ متر و با ۲، ۴ و ۶ دهانه ۲۰ متری مطالعه شده‌اند. بارگذاری پل‌ها بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل‌های ایران [Code139, 2000] و طراحی آنها بر اساس آیین‌نامه طرح و محاسبه پل‌های بتنی آرمه [Code389, 2008] و ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ [IBCS, 2005]، آیین‌نامه ACI318 [ACI318-05, 2005] و AASHTO [AASHTO, 2002] انجام شده است. دو نمونه از پل‌های موجود مورد مطالعه شامل تقاطع شمال‌شرق شهر میامی و در محل تلاقی راه چهارخطه تهران-شاهرود-مشهد با محور اصلی میامی - جاجرم است. محل این پل در موقعیت جغرافیایی

۵۵ درجه و 34° دقیقه طول شرقی و 36° درجه و 23° دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این پل متشکل از دو دهانه به طول ۲۰ متر با ۶ تیر بتن مسلح پیش ساخته و عرشه با دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر است. پل دوم در راه اصلی میامی - جاجرم و دارای ۴ دهانه به طول ۲۰ متر است که در کیلومتر $21+500$ محور میامی - جاجرم بر روی رودخانه کالشور قرار گرفته است. عرض عرشه این پل $12/10$ متر متشکل از ۶ تیر بتن مسلح به طول ۲۰ متر و ارتفاع کل ۱۵۰ سانتیمتر به همراه دال بتنی مسلح به ضخامت ۲۰ سانتیمتر است. برخی از مشخصات مورد استفاده برای مدل‌سازی و تحلیل مدل‌ها در جدول ذیل ارایه شده است.

به منظور ایجاد یکپارچگی در شاه‌تیرها از دیافراگم‌های بتن مسلح به عرض ۴۰ سانتیمتر بر روی کوله‌ها و پایه‌ها و عرض ۳۰ سانتیمتر در وسط دهانه‌ها استفاده شده است. بر روی سرستون پایه‌ها دو برشگیر برای مقابله با نیروی زلزله در جهت طولی و عرضی و بر روی نشیمن کوله‌ها دو برشگیر برای مهار عرضی عرشه در مقابل نیروهای زلزله تعبیه شده است. چند نمونه از نقشه‌ها و جزئیات اجرایی پل‌های مورد مطالعه در شکل (۱) تا شکل ارایه شده است.

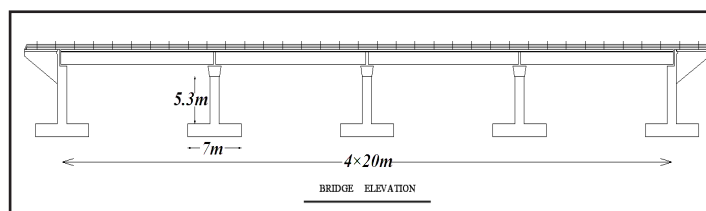
۲-۲ مدل‌سازی اجزای مختلف پل‌ها

به منظور تحلیل غیرخطی پل‌ها مقاومت مورد انتظار مصالح و رابطه تنش-کرنش برای بتن محصور و غیرمحصور و همچنین میلگردهای تقویتی برای حصول ظرفیت و بررسی رفتار پل مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات میلگردهای طولی و عرضی مطابق مشخصات رفتار ارتجاعی و غیرارتجاعی مدل‌سازی شده‌اند. نحوه مدل‌سازی اجزای مختلف پل‌ها شامل مصالح، پایه‌ها، عرشه، بالشتک‌های الاستومری، کوله‌ها، ستون‌ها، سرستون‌ها و برش‌گیرها در ادامه تشریح شده است. در این پژوهش کلیه ستون‌ها در پل‌ها دارای مقاطع دایروی بوده و با اتصال گیردار به شالوده متصل هستند و از انعطاف‌پذیری شالوده‌ها نیز چشم‌پوشی شده است.

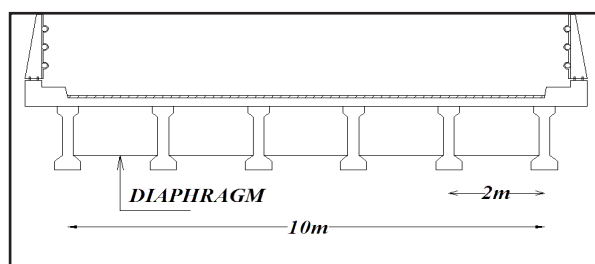
اثرات مدل‌سازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی

مشخصات پل‌ها	مدل پل‌های نوع اول	مدل پل‌های نوع دوم
نوع پل تعداد دهانه‌ها طول دهانه‌ها ابعاد درز انبساط نوع میلگردها	دهانه ساده با دال یکپارچه ۴،۲ و ۶ دهانه ۲۰ متر ۵ سانتیمتری AIII	دهانه ساده با دال یکپارچه ۴،۲ و ۶ دهانه ۲۰ متر ۵ سانتیمتری AIII
مقاومت مشخصه بتن	تیرهای پیش‌ساخته، فونداسیون کوله‌ها و پایه‌های میانی و نواحی مجاور خاک تیرهای عرضی، دال، دست‌انداز و دال اتصال، کوله و پایه‌های کناری	تیرهای پیش‌ساخته بر سانتیمتر مربع (B-350) تیرهای پیش‌ساخته بر سانتیمتر مربع (B-300)
پوشش بتن	شاه‌تیرهای پیش‌ساخته دال، تیرهای عرضی و دست‌اندازها و سرستون‌ها و ستون‌های میانی کوله	۳/۵ سانتیمتر ۴ سانتیمتر ۵ سانتیمتر
مشخصات ابعاد و اجزای تشکیل‌دهنده عرشه	نوع عرشه عرض عرشه عرشه پل‌ها ارتفاع کلی عرشه‌ها فاصله محور تا محور تیرها ضخامت دال نوع شاه‌تیرها نشیمن شاه‌تیرها	تیر پیش‌ساخته بتن مسلح و دال درجا ۱۲/۱ متر ۲۰ متر ۱۷۰ سانتیمتر ۲ متر ۲۰ سانتیمتر تیر پیش‌ساخته بتن مسلح بالشتک‌های الاستومر از جنس نئوپرن گومبا با ابعاد ۳۰۰×۲۰۰×۵۲ میلی‌متر بتن مسلح و چند ستونی قابی شکل سه ستونی
پایه‌ها	نوع پایه‌های میانی تعداد ستون‌های هر پایه ارتفاع پایه‌ها فاصله محور تا محور پایه‌ها	۵/۳ متر ۵ متر مقطع دایره با قطر ۱۲۰ سانتیمتر مقطع دایره با قطر ۱۶۰ سانتیمتر
ستون‌ها و سرستون‌ها	مشخصات و ابعاد مقطع هر ستون عرض سر ستون پایه میانی ناحیه فوقانی عرض سر ستون پایه میانی ناحیه تحتانی ضخامت سر ستون	۱۷۰ سانتی‌متر ۱۵۰ سانتی‌متر ۱۲۰ سانتی‌متر ۲۳۰ سانتی‌متر ۱۹۰ سانتی‌متر ۱۴۰ سانتی‌متر
کوله‌ها	نوع و جنس کوله‌ها ابعاد پی کوله‌ها	بسته و بتن مسلح ۱۳/۵×۶×۱/۴ متر ۱۳/۵×۹×۲ متر

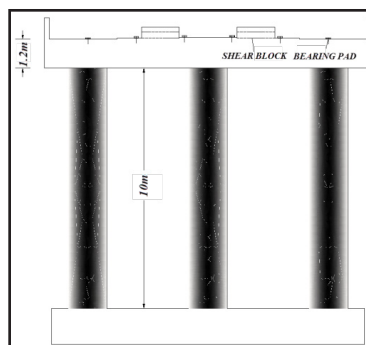
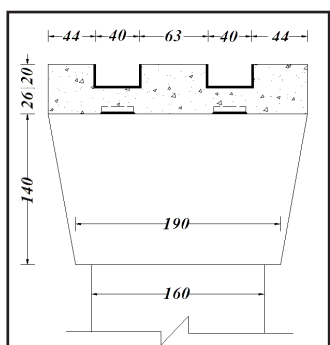
جدول ۱. مشخصات انواع پل‌های مورد مطالعه



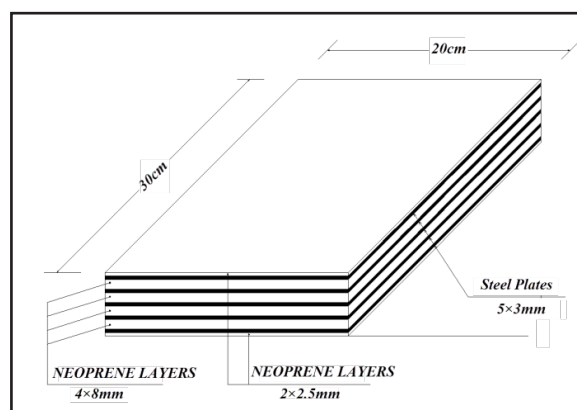
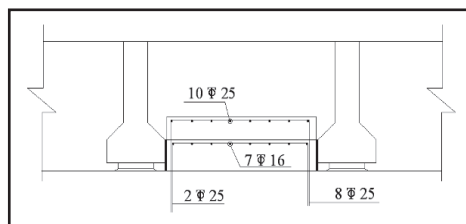
شکل ۱. نمای پل چهار دهانه با ارتفاع پایه ۵/۳ متر



شکل ۲. مقطع عرضی عرشه پل‌ها



شکل ۳. نمای ستون‌های ۱۰متری و مقطع عرضی سرستون‌ها



شکل ۴. نئوپرن و مقطع برشگیر بر روی سر ستون

و ارایه رفتار واقعی بتن بر اساس رابطه (۱) استفاده شده است. در این رابطه f'_{cc} تنش فشاری بتن و ϵ_{cc} کرنش متناظر با تنش فشاری بیشینه بتن محصور و f'_l تنش موثر محصور کننده برای مقاطع دایروی هستند و با توجه به تنش متوسط محصور شدگی E_c و E_{sec} به ترتیب مدول کشسانی بتن و مدول متناظر با تنش فشاری بیشینه هستند و با استفاده از آنها می‌توان مشخصات مربوط به بتن غیرمحصور را نیز به دست آورد. در این رابطه K_e ضریب اثر بخشی محصور شدگی و مقدار آن برای مقاطع دایره‌های شکل ۹۵/۰ است و f_l عبارت از بیشینه فشار موثر جانبی

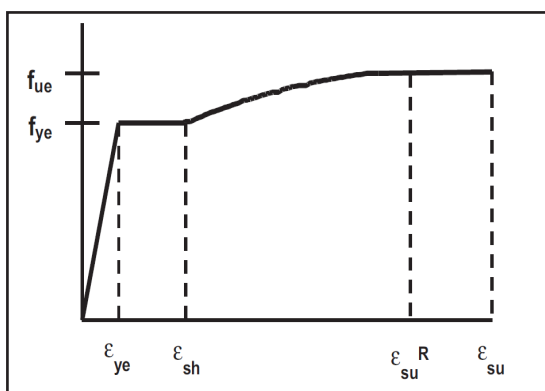
$$f_c = \frac{x r f'_{cc}}{r - 1 + x}$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}, \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}, \quad f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254 \right), \quad f'_l = K_e f_l, \quad f_l = \frac{2 f_{yh} A_{sp}}{D' S} \quad (1)$$

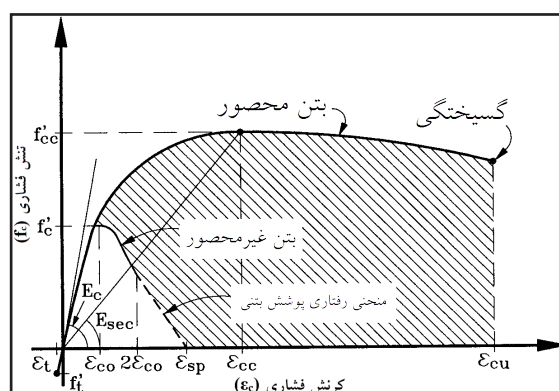
۲-۲-۱ مشخصات مصالح بتنی و فولادی

برای ارایه رفتار غیرخطی پایه‌ها از آیین‌نامه طرح لرزه‌ای کالیفرنیا [CALTRANS, 2004] و مدل [Mander et al., 1988] برای مدل‌سازی رفتار فولاد و بتن استفاده شده است. میلگردهای عرضی در پایه پل‌ها، مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن را از طریق محصور کردن هسته مقطع افزایش می‌دهند. بنابراین از مدل [Mander et al., 1988] برای تعیین ظرفیت شکل پذیری اعضای بتنی از یک مدل تنش-کرنش غیرخطی برای بتن محصور و غیرمحصور مطابق شکل ۴-الف

اثرات مدل‌سازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی

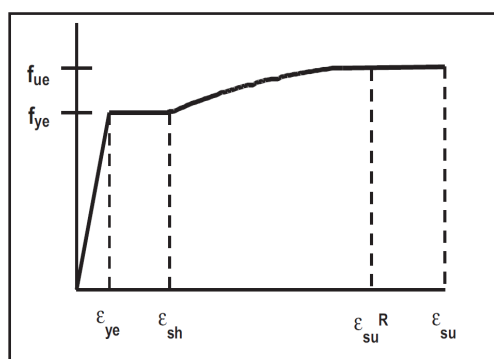


(ب) نمودار تنش کرنش میلگردها

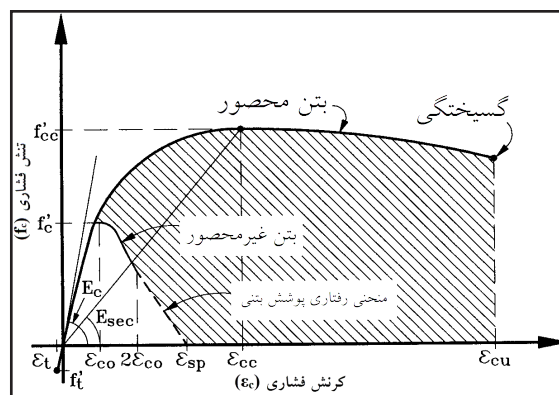


(الف) مدل تنش-کرنش Mander

شکل ۵. نمودار تنش-کرنش (الف) بتن محصور و غیرمحصور مطابق طبق مدل Mander و (ب) میلگردها [CALTRANS, 2004]



(ب) نمودار تنش کرنش میلگردها



(الف) مدل تنش-کرنش Mander

شکل ۶. یک نمونه از نمودار تنش-کرنش بتن محصور و غیرمحصور و میلگرد

طراحی عرشه بر اساس ظرفیت و با سطح انتظار رفتار الاستیک تحت اثر زلزله انجام شده است، بنابراین نیازی به استفاده از خصوصیات غیرخطی برای اجزای عرشه در انجام تحلیل‌ها نیست. برای این منظور از مشخصات مقطع، سختی خمشی، سختی پیچشی معرف ایجاد ترک قبل از فرا رسیدن حالات حدی استفاده شده و از ممان اینرسی مؤثر (I_{eff}) برای حصول مقادیر واقعی زمان تناوب سازه و نیاز لرزه‌ای ایجاد شده از تحلیل استفاده شده است [ACI 318-05, 2005].

در هر دو انتهای کوله و روی سرستون‌ها مابین نشیمن تیرها و

چون حد تسلیم میلگردهای عرضی است. رفتار میلگردها (شکل ۴-ب) با یک رابطه تنش-کرنش با رفتار خطی الاستیک اولیه، پایا و سخت‌شدگی متناسب با افزایش تنش-کرنش مدل‌سازی شده‌اند. نقطه متناظر تسلیم مطابق تنش تسلیم مورد انتظار فولاد و طول ناحیه تسلیم پایا تابعی از مقاومت فولاد و قطر میلگرد است. در ادامه یک نمونه از نمودارهای تنش-کرنش هسته، پوشش و میلگردهای مقطع ستون‌های پل‌های با پایه‌های ۱۰ متری مورد استفاده در پژوهش حاضر در شکل (۵) نشان داده شده است.

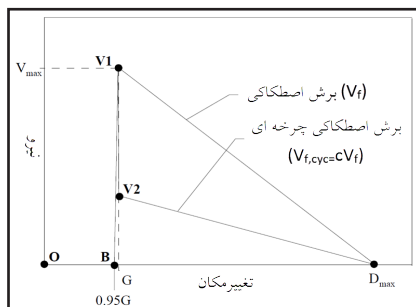
۲-۲-۲ روسازه (عرشه) و بالشتک‌های الاستومر

بین برش گیرها و دستک کوله برای حدود میزان میلگردهای ۰/۳۶-۰/۲۳ و نسبت وجوه ۰/۵-۰/۳ و نسبت عرض به ارتفاع ۰/۷ استفاده شده است. با توجه به اینکه امروزه اغلب برش گیرهای داخلی با مکانیزم لغزشی- اصطکاکی دچار خرابی می شوند بنابراین رفتار آنها را می توان به وسیله مدل لغزشی- اصطحاکی در نظر گرفت، از این رو، طبق رابطه ظرفیت [Megally et al., 2001]

رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$V_n = \mu A_{vf} f_y \quad (3)$$

در این رابطه A_{vf} مساحت میلگردهای طولی در وجه مشترک دیوار نشیمن کوله و بلوک برشی، f_y مقاومت تسلیم میلگردها، μ ضریب اصطحاک برابر 1.4λ و مقدار λ نیز برای بتن معمولی برابر ۱ در نظر گرفته می شود. یک نمونه از مشخصات هندسی مربوط به برش گیرهای داخلی مورد استفاده در مدل سازی ها در شکل (۷) ارایه شده است. همچنین نمونه هایی از نمودار پوش نیرو- جابجایی برش گیرهای داخلی در شکل (۸) مورد استفاده در این پژوهش ارایه شده است. جابجایی بیشینه (D_{max}) برش گیرها تحت تأثیر عواملی چون قطر میلگردهای تقویتی و اندازه دانه ها است [Megally et al., 2001] و تأثیر عواملی چون میزان میلگرد و نسبت وجه بسیار ناچیز است. در مدل سازی این اجزاء میزان بیشینه جابجایی (D_{max}) قابل قبول در حدود ۱۱۴ میلی متر تعیین شده است.



شکل ۸. نمودار پوش نیرو-جابجایی برش گیرها [Megally et al, 2001]

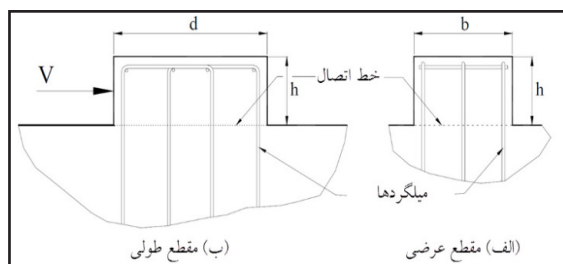
تکیه گاه آنها بالشتک های الاستومر قرار گرفته اند. رفتار این اعضا، غیرخطی است. بالشتک های الاستومری شامل لایه های الاستومر و فولاد هستند و مدول برشی و سختی الاستیک موثر (K_{eff}, G_{eff}) هر بالشتک مطابق با مدل غیر خطی [Makris and Zhang, 2002] و با استفاده از المانهای پیوندی غیرخطی و طبق رابطه (۲) مدل سازی شده اند؛

$$K_{eff} = \frac{G_{eff} A}{t}, \quad G_{eff} = 1 \frac{MN}{m^2}, \quad u^Y = \frac{F^Y}{K_{eff}} \quad (2)$$

در این رابطه: A : مساحت بالشتک، G_{eff} مدول برشی موثر و t ضخامت الاستومرها است. تحت تغییر شکل برشی، بالشتک تقریباً به صورت الاستیک تا نیروی $F^Y = \mu N$ تغییر شکل می دهد، در این رابطه $\mu = 0.3$ ضریب اصطحاک در وجه مشترک نئوپرن و عرشه و N نیروی عمود بر سطح نئوپرن است. جابجایی حد تسلیم نئوپرن (u^Y) بر اساس تنش حد تسلیم (F^Y) و سختی الاستیک (K_{eff}) طبق رابطه [Aviram et al., 2008] به دست می آید.

۲-۳-۲ برش گیرها

برش گیرها در کوله ها یا سرستون های پل های با دهانه های کوچک تا متوسط استفاده می شوند و به عنوان فیوزهایی برای جلوگیری از حرکت های بیش از مقدار مجاز در راستای طولی و عرضی عرشه تحت اثر نیروی زلزله مورد استفاده قرار می گیرند. برای مدل سازی برش گیرها از نتایج آزمایش ها [Megally et al, 2001] و برای ارزیابی ظرفیت برش گیرهای داخلی با یک وجه مشترک



شکل ۷. مقطع عرضی و طولی برش گیرها [Megally et al, 2001]

۲-۲-۴ مدل‌سازی کوله‌ها

مدل الاستیک خطی کوله باید شامل مقدار واقعی برای پاسخ خاک‌ریز و سختی موثر کوله (K_{eff}) باشد. سختی خاک‌ریز کوله به صورت غیرخطی بوده و به مصالح خاک‌ریز وابسته است. بر پایه نتایج تحقیقات [Maroney and Chai, 1994] سختی اولیه کوله ها تحت اثر بارهای ضربه‌ای و نوسانی $K_i = 11.5 \times 10^2 \text{ kg/m}$ و برای تعدیل سختی اولیه با توجه به نسبت دیوار انتهایی به ارتفاع عرشه از رابطه (۴) استفاده شده است.

$$K_{abt} = K_i \times w \times \left(\frac{h}{1.7}\right) \quad (SI) \quad (4)$$

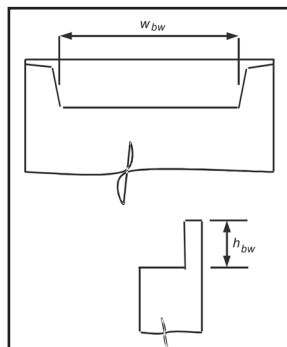
در این رابطه w عرض دیوار انتهایی یا عرشه برای کوله‌های پیوسته و نشیمن ساده است.

سختی کوله (K_{abt}) و مقاومت دیوار انتهایی (P_{bw}) حاصل برای راستای طولی با استفاده از ضریب تأثیر دیوار $C_L = 2/3$ و ضریب

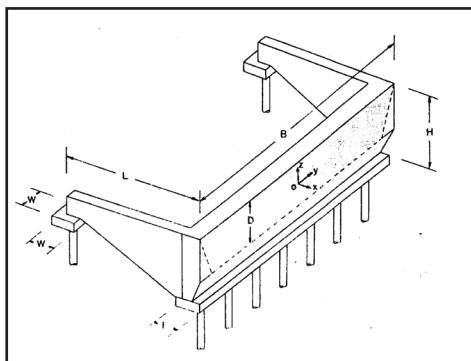
مشارکت دیوار $C_w = 4/3$ [Maroney and Chai, 1994] برای محاسبه سختی کوله در جهت عرضی استفاده شده است. طول دیوار بالی طبق تحقیقات [Maroney and Chai, 1994] و [Makris and Zhang, 2002] حدود $0.5 - 0.33$ دیوار انتهایی فرض شده است. فشار مقاوم خاک ریز کوله به طور خطی با جابجایی افزایش می‌یابد و بیشینه فشار مقاوم طبق رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$P_{bw} \text{ or } P_{dia} = 239 A_e \left(\frac{h_{bw} \text{ or } h_{dia}}{1.7} \right) \quad (m, kN) \quad (5)$$

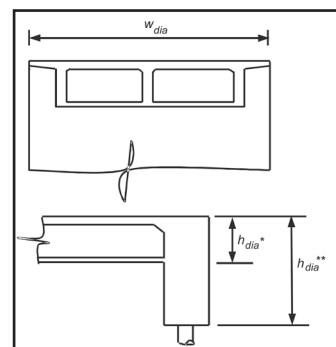
تغییرات بیشینه فشار مقاوم (P_{bw} or P_{dia}) بر اساس نیروی استاتیکی نهایی در تحقیقات [Maroney and Chai, 1994] استفاده شده است. در مدل‌های این پژوهش از ضریب ارتفاع $7/1$ متر بر اساس تحقیقات [Maroney and Chai, 1994] استفاده شده است.



(ج) کوله غیرپیوسته با عرشه

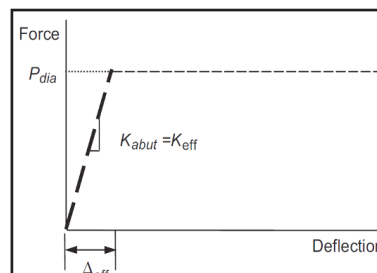
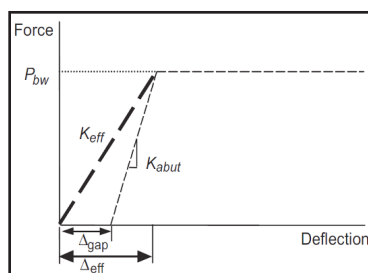


(الف) اجزای تشکیل دهنده کوله



(ب) کوله پیوسته با عرشه

شکل ۹. (الف) مشخصات و ابعاد تشکیل دهنده کوله [Wilson, 1988] (ب و ج) نحوه اتصال کوله به عرشه [CALTRANS, 2004]



شکل ۱۰. تغییرات نیرو-جابجایی کوله با درز انبساط و کوله پیوسته با عرشه [CALTRANS, 2004]

به منظور مدل‌سازی رفتار کوله از المان پیوند غیرخطی برای مدل‌سازی رفتار کوله در جهت طولی و عرضی استفاده شده و علاوه بر آن در جهت طولی از المان پیوند Gap برای درز انبساط ۵ سانتیمتری بین عرشه و کوله با آزادی حرکت در جهت طولی استفاده شده است. مشخصات مورد استفاده برای مدل غیر خطی کوله ها در جهت طولی و عرضی در جدول (۲) تا جدول (۴) ارایه شده است.

۲-۲-۱ کاربرد انواع مدل های کوله ها

به منظور بررسی اثر کوله ها بر رفتار پل ها از سه مدل غلتکی، ساده و کامل استفاده شده است. در مدل سازی غلتکی کوله از

غلطک به عنوان جایگزینی برای مدل سازی نئوپرن‌های موجود بین کوله ها و شاه‌تیرها استفاده شده است. به دلیل استفاده از فرضیات ساده کننده مدل غلتکی کوله بسیار مورد توجه طراحان و مهندسان مشاور قرار دارد. در مدل ساده شکل از المان پیوند غیرخطی برای مدل سازی نئوپرن‌ها در زیر شاه‌تیرها استفاده می شود. در مدل کامل کوله، کلیه نئوپرن های موجود در زیر شاه‌تیرها، برشگیرهای بین شاه تیرها و بر روی کوله و سرستون‌ها در مدل‌سازی در نظر گرفته شده شکل (۱۲) و رفتار طولی و عرضی کوله طبق شرایط واقعی و با اجزای غیرخطی و منطبق با جزئیات موجود این اعضا مدل سازی می شوند.

جدول ۲. مشخصات مورد استفاده برای مدل کوله ها در جهت طولی و عرضی

سختی اولیه کوله‌ها K_i (kN/mm/m)	بیشینه فشارمقاوم خاکریز P_{max} (kPa)	ضریب ارتفاع Height Factor (m)	ضریب تاثیر دیوار (C_L)	ضریب مشارکت دیوار (C_W)
10×11.5	۲۳۹	۱.۷	۰.۶۷	۱.۳۳

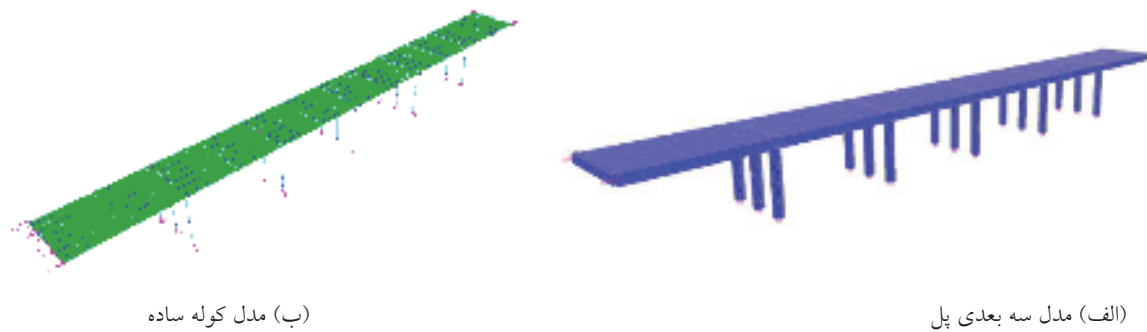
جدول ۳. مشخصات روابط مدل غیرخطی کوله در جهت طولی

سختی اولیه اصلاح شده (K_{abt})	فشار مقاوم خاکریز کوله (P_{bw})	سطح موثر دیوار انتهایی کوله (A_e)	جابجایی متناظر بیشینه فشار مقاوم (Δ_{eff})	سختی اولیه موثر کوله‌ها (K_{eff})
$K_i \times w \times \left(\frac{h}{1.7}\right)$	$239 A_e (h_{bw} \text{ or } h_{dia})$	$(h_{bw} \text{ or } h_{dia}) w$	$\Delta_{eff} = \Delta_{gap} + (P_{bw} / K_{abt})$	$K_{eff} = P_{bw} / \Delta_{eff}$

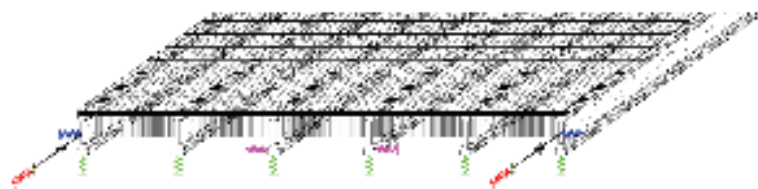
جدول ۴. مشخصات روابط مدل غیرخطی کوله در جهت عرضی

سختی اولیه اصلاح شده (K_{abt})	فشار مقاوم خاکریز کوله (P_{bw})	سطح موثر دیوار انتهایی کوله (A_e)	عرض دیوار انتهایی یا عرشه	سختی اولیه موثر کوله‌ها K_{eff}
$K_{abt} = K_i \times w \times \left(\frac{h}{1.7}\right) \times \frac{2}{3} \times \frac{4}{3}$	$P_{bw} = 239 A_e \left(\frac{h_{bw} \text{ or } h_{dia}}{1.7}\right) \times \frac{2}{3} \times \frac{4}{3}$	$(h_{bw} \text{ or } h_{dia}) w$	$h_{bw} / 3$	K_{abt}

اثرات مدل سازی کوله ها و مفاصل پلاستیک پایه ها در رفتار لرزه ای پل های بتنی



شکل ۱۱. مدل سه بعدی پل و مدل کوله ساده

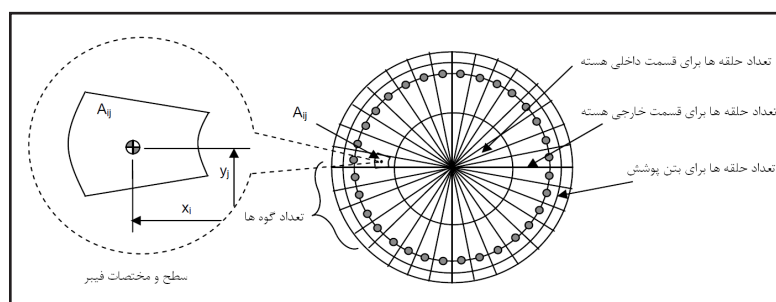


شکل ۱۲. مدل کوله کامل

۲-۵- مدل سازی مفاصل پلاستیک

رفتار غیرخطی پایه ها از طریق تخصیص مدل های مفصل پلاستیک مجزا به نواحی محتمل برای رفتار غیر ارتجاعی قابل تعریف است. به منظور تبدیل انحنای غیرخطی به چرخش پلاستیک باید طول تقریبی برای مفصل پلاستیک تعریف شود. برای مدل سازی مفاصل پلاستیک جهت بیان رفتار غیر خطی ستون روش های مختلفی وجود دارد. در تحقیق حاضر از سه نوع مفصل پلاستیک شامل مفصل فایبری شکل (۱۳)، مفصل غیرمزدوج و مفصل اندرکنشی نیرو-لنگر (PMM) برای بیان شکل پذیری ستون ها در نواحی تحتانی و فوقانی پایه ها و در محدوده طول مفصل پلاستیک استفاده شده

است. سایر مدل ها چون مفاصل Uncoupled و NL-Link به دلیل اینکه برای یک سطح مشخص از نیروی محوری (معمولا بار مرده ستون) تعریف می شوند، بنابراین در ارزیابی تغییرات شکل پذیری و ظرفیت ستون هایی که در معرض نوسانات شدید بار محوری قرار می گیرند، نتایج ضعیفی ارائه می کنند. بنابراین این گونه مدل ها توانایی در نظر گرفتن مناسب اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی را ندارند و در صورتی که ظرفیت ستون از طریق بار محوری کنترل شود منجر به ارزیابی نتایج غیردقیق خواهند شد. بنابراین کاربرد این مدل ها برای انجام تحلیل های ساده و مقدماتی مدل های دو بعدی پل ها محدود شده است



شکل ۱۳. مفصل فایبر انعطاف پذیر [Aviram et al, 2008]

۳. روش های ارزیابی لرزه ای پل های مورد مطالعه

به منظور بررسی رفتار لرزه ای پل های مورد مطالعه باید از روش های تحلیلی معتبر طبق ضوابط آیین نامه ها استفاده شود. این روش های تحلیل بایستی مشخصات مصالح، هندسه سازه و اجزای تشکیل دهنده آن، جرم ها و شرایط مرزی و منابع رفتار غیرخطی مدل سازه ای را داشته باشند.

۳-۱ روش های تحلیل

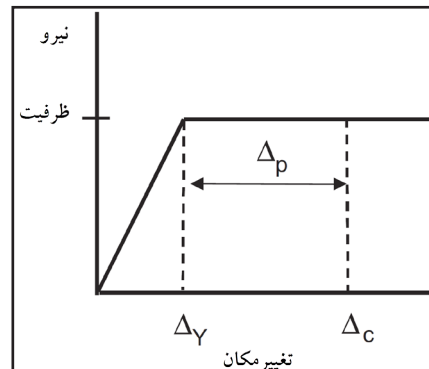
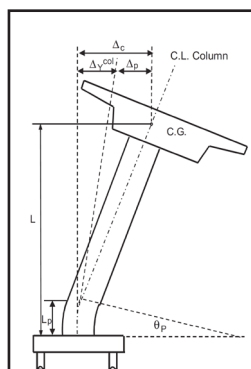
ساده ترین روش برای بررسی مشخصات دینامیکی یک پل استفاده از آنالیز مودال است. نتایج تحلیل مودال شامل زمان های تناوب مودال و خصوصیات اصلی مورد استفاده در تحلیل طیف پاسخ و تاریخچه زمانی هستند که در ارزیابی واقعی نیاز زلزله و پاسخ سازه پل تحت یک طیف طراحی یا شتاب نگاشت مصنوعی به دست می آیند. با توجه به رفتار پیچیده انواع پل ها و امکان افزایش نیاز سازه در اثر زلزله که ممکن است سبب فروریزش کلی یا گسیختگی اعضای سازه ای باربر شوند. بنابراین برای در نظر گرفتن حالت های مختلف رفتار لرزه ای پل ها در فرایند طراحی می توان از تکرار تحلیل های مودال برای به دست آوردن پارامترهای دینامیکی یک پل و حالات مختلف خسارت استفاده کرد. ظرفیت لنگر پلاستیک کلیه اعضای بتنی شکل پذیر پل ها چون پوشش بتنی ستون ها و نیز پیش بینی مقادیر اضافه مقاومت مورد

نظر در طراحی سطوح دارای دوران پلاستیک از طریق تحلیل لنگر- انحناء و بر اساس مشخصات مورد انتظار مصالح محاسبه می شود. تحلیل لنگر- انحناء برای یک مقطع تحت بارهای پیوسته طبق اصل سازگاری کرنش و تعادل نیروها باعث ارایه نتایج انحناء مطابق با محدوده لنگر مقطع شده و مقاومت خمشی طراحی متناظر با کرنش فشاری 0.003 بتن یا کرنش 0.010 میلگردهای طولی را به دست می دهد.

۳-۲ تغییر مکان هدف

به منظور محاسبه تغییر مکان کنترلی (هدف) از طریق تحلیل استاتیکی غیرخطی از مدل شکل [Aviram et al, 2008] استفاده شده است. از طریق محاسبه تغییر مکان هدف و مطابق مقادیر حاصل از تحلیل لنگر- انحناء و روابط [Aviram et al, 2008] مقادیر جابجایی تسلیم، جابجایی محدوده خمیری، جابجایی نهایی و چرخش های چون این جابجایی ها برای پایه پل محاسبه شده اند.

در شکل L ، فاصله بین لنگرهای تکیه گاهی و محل عرشه، L_p طول معادل مفصل پلاستیک، Δ_p ظرفیت جابجایی پلاستیک در اثر چرخش پلاستیک، Δ^{col} جابجایی تسلیم ستون تا تشکیل مفصل پلاستیک و θ_p ظرفیت چرخش پلاستیک ستون در جهت طولی پل است.



شکل ۱۴. نحوه مدل سازی پل برای محاسبه تغییر مکان هدف و ظرفیت جابجایی ستون در راستای طولی [Aviram et al, 2008]

۴. نتایج و تحلیل آنها

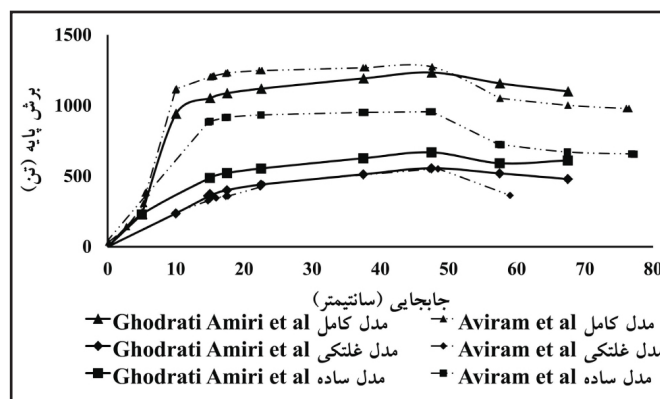
به منظور بررسی تأثیر انواع مدل‌های کوله‌ها در ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها از سه نوع مدل غلتکی، ساده و کامل کوله برای پل‌های مورد مطالعه با ارتفاع پایه‌ها و تعداد دهانه‌های مختلف استفاده شده است. نتایج شامل مشخصات دینامیکی پل‌ها در محدوده الاستیک، ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و عملکرد پل‌ها با استفاده از روش ATC40-A ارائه شده است. همچنین کاربرد مفاصل پلاستیک مختلف در رفتار لرزه‌ای پل‌ها به منظور بررسی میزان دقت کاربرد هر یک از انواع مفاصل فایبری، غیرمزدوج و اندرکنشی PMM با انجام تحلیل مودال پل‌ها در راستای طولی و عرضی و در راستای 45° نسبت به محور اصلی پل مقایسه و بررسی شده است.

۴-۱ صحت‌سنجی

به منظور بررسی میزان اعتبار نحوه مدل‌سازی اجزای تشکیل‌دهنده پل‌ها و بررسی میزان دقت نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها، یافته‌های به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج یکی از پل‌های

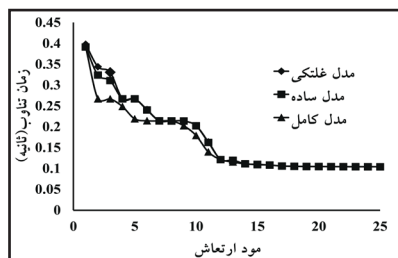
جدول ۵. مشخصات سازه‌های پل مورد بررسی (Route 14) در تحقیقات [Aviram et al, 2008]

نوع پل - نام پل	تعداد دهانه	طول پل (متر)	عرض پل (متر)	تعداد ستون	قطر ستون (متر)	ارتفاع ستون (متر)	عمق روسازه (متر)
بتنی با دهانه‌های یکپارچه و عرشه پیوسته با سرستون‌ها-Route 14	۲	۸۷/۱۷	۱۶/۳۷	۲	۱/۶۵	۱۱/۵۵	۱/۷۵

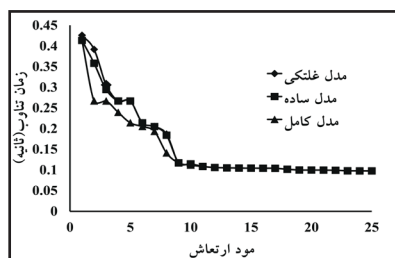


شکل ۱۵. نمودار برش پایه- جابجایی در جهت طولی برای دو مدل پژوهش حاضر [Ghodrati Amiri et al] و [Aviram et al, 2008]

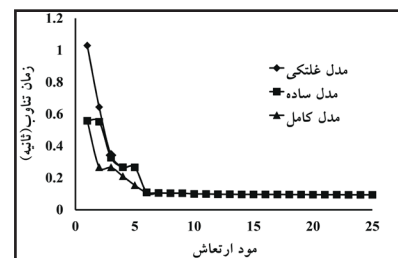
ارتفاع پایه‌ها و تعداد دهانه‌ها بررسی و مقایسه شده است. بنابراین همانند شکل (۱۶) زمان تناوب ۲۵ مود اول ارتعاش برای پل‌های ۲، ۴ و ۶ دهانه و ارتفاع پایه ۳/۵ و ۱۰ متر ارایه شده است. نتایج بیانگر آن است که در مورد پل دو دهانه استفاده از مدل غلتکی کوله موجب افزایش قابل ملاحظه زمان تناوب مربوط به مود اول ارتعاش شده است. در پل چهار دهانه برای هر سه مدل کوله نتایج تقریباً مشابهی به دست آمده است و در مورد پل‌های شش دهانه نتایج تقریباً منطبق بر هم هستند. به دلیل وجود درز انبساط در مدل کامل و عدم اندرکنش عرشه و کوله در محدوده تغییر شکل‌های الاستیک در نتیجه باعث همگرایی زمان تناوب در مود اول ارتعاش و راستای طولی عرشه کوله پل‌ها با دو مدل ساده و کامل شده است. به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر پایه‌ها در پل‌ها با ارتفاع پایه ۱۰ متر بنابراین پایه‌ها دارای زمان‌های تناوب بزرگ‌تری نسبت به مدل‌های با ارتفاع ۵/۳ متری هستند، اما با استفاده از سه مدل کوله، رفتاری مشابهی با مدل‌های پل‌ها با ارتفاع پایه ۳/۵ متر داشته‌اند. در ادامه شکل (۱۷) نتایج مربوط به زمان تناوب ارتعاش طولی، عرضی و پیچشی در پل‌ها با ارتفاع پایه ۳/۵ و ۱۰ متر ارایه شده است.



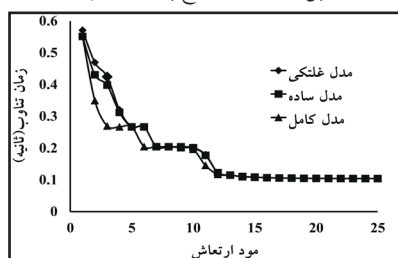
پل ۶ دهانه با ارتفاع پایه ۵/۳ متر



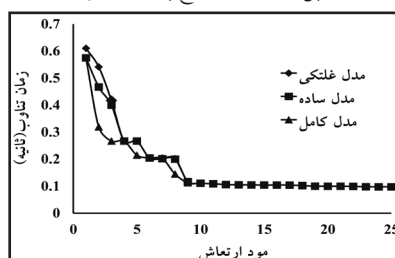
پل ۴ دهانه با ارتفاع پایه ۵/۳ متر



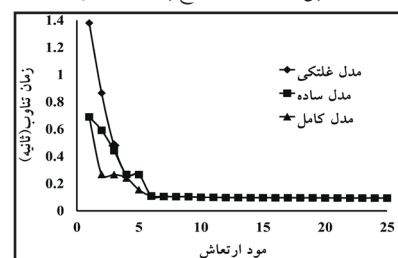
پل ۲ دهانه با ارتفاع پایه ۵/۳ متر



پل ۶ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر



پل ۴ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر



پل ۲ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر

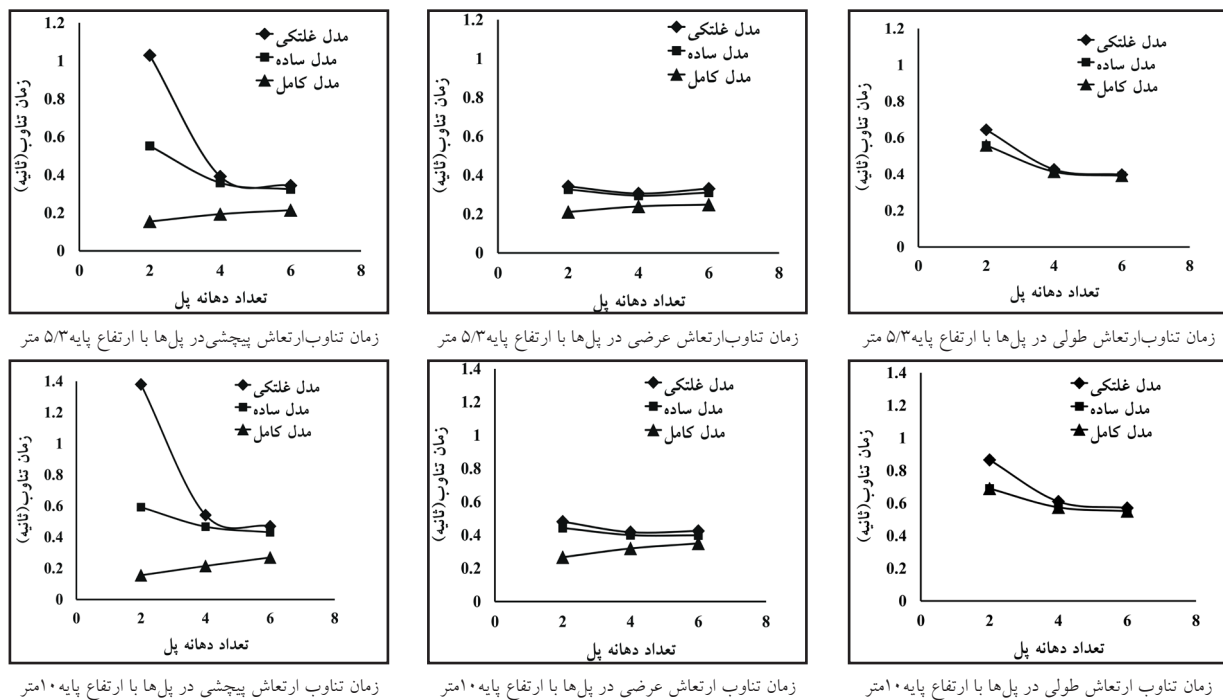
شکل ۱۶. زمان تناوب ۲۵ مود اول ارتعاش برای پل‌های ۲، ۴ و ۶ دهانه ۲۰ متری با ارتفاع پایه ۳/۵ و ۱۰ متر

با توجه به تفاوت موجود در مدل‌های بین این پژوهش (پل دودهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر) و تحقیقات [Aviram et al, 2008] مدل کامل کوله‌ها به دلیل در نظر گرفتن کلیه اجزای تشکیل‌دهنده در مدل‌سازی و تحلیل و نیز مدل غلتکی کوله‌ها به دلیل در نظر گرفتن برخی فرضیات و انجام ساده‌سازی‌ها دارای مطابقت مناسب و منطقی می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای سایر مدل‌های این تحقیق نیز نحوه مدل‌سازی و فرضیات در نظر گرفته شده به صورت منطقی و صحیح انجام گرفته است. برای مدل ساده با توجه به تفاوت در مشخصات سازهای و دینامیکی پل‌ها و نیز وجود ساده‌سازی‌های مختلف و گسترده نسبت به مدل‌های کامل و غلتکی در مدل‌سازی نتایج دارای تفاوت نسبتاً زیادی بوده‌اند ولی همچنان در این مدل نیز تشابه رفتاری مناسبی با سایر نتایج قابل مشاهده است.

۵. مشخصات دینامیکی پل‌ها در محدوده الاستیک

به منظور بررسی اثرات مدل‌سازی کوله‌ها در مشخصات دینامیکی آنها در محدوده الاستیک زمان تناوب ۲۵ مود اول ارتعاش پل‌ها و نیز زمان تناوب سه مود طولی، عرضی و پیچشی با تغییر در

اثرات مدل‌سازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی



شکل ۱۷. مقایسه زمان تناوب ارتعاش طولی، عرضی و پیچشی در پل‌ها با ارتفاع پایه ۵/۳ و ۱۰ متر

مشاهده زمان تناوب ارتعاش پل‌ها با ارتفاع پایه ۱۰ متری در مود ارتعاش طولی، عرضی و پیچشی با سه مدل کوله نتایجی مشابهی با پل‌های کوتاه‌تر و با ارتفاع پایه ۵/۳ متری به دست آمده است.

۵-۱ ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی

غیرخطی

به منظور بررسی اثرات ناشی از چگونگی مدل‌سازی کوله‌ها بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها در محدوده تغییر مکان‌های غیرخطی و در دو جهت انتقالی طولی و عرضی از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. تحلیل استاتیکی غیرخطی در حالت کلی به دو روش کنترل تغییرمکان و کنترل نیرو انجام می‌شود. در این پژوهش از روش کنترل تغییر مکان با الگوی بارگذاری متناسب با وزن روسازه (عرشه) در قسمت‌های مختلف استفاده شده است. بنابراین تعریف نیروهای متناسب با وزن عرشه دارای اهمیت است. تغییر مکان کنترلی حدود ۲-۱/۵ برابر تغییر مکان حد گسیختگی محلی ستون‌ها و حاصل از نتایج تحلیل لنگر-انحنای پایه هستند. در مدل‌های مورد مطالعه و براساس محاسبات انجام

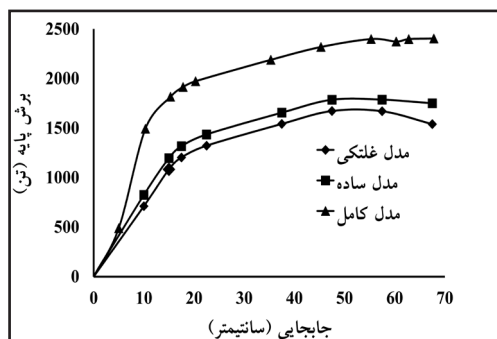
با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که مود ارتعاش طولی در مورد پل‌ها با ارتفاع پایه ۵/۳ متر با استفاده از سه مدل با افزایش تعداد دهانه و طول کلی پل همگرا شده و در مورد پل ۶ دهانه (طول ۱۲۰ متر) کاملاً منطبق بر هم هستند. علت رفتار مشابه دو مدل ساده و کامل وجود درز انبساط در مدل کامل و در گیر نشدن عرشه با دیوار انتهایی و خاکریز در محدوده تغییر مکان‌های الاستیک است.

استفاده از مدل‌های غلتکی و ساده موجب رفتار تقریباً مشابه پل‌ها در محدوده تغییر مکان الاستیک شده و در مقایسه با مدل کامل رفتار متفاوتی در جهت عرضی قابل مشاهده است. اختلاف ناچیز بین دو مدل غلتکی و ساده به علت وجود ثوابت در مدل ساده است. در هر سه مدل کوله برای پل‌های با طول کوتاه (حداکثر ۴۰ متر) افزایش قابل ملاحظه مود ارتعاش پیچشی حاصل شده است که موجب برآورد کمتر از سختی سازه، در این مود ارتعاشی خواهد شد. همچنین با افزایش طول پل‌ها علیرغم عدم همگرایی در نتایج اما زمان‌های تناوب ارتعاش به هم نزدیک شده‌اند. با

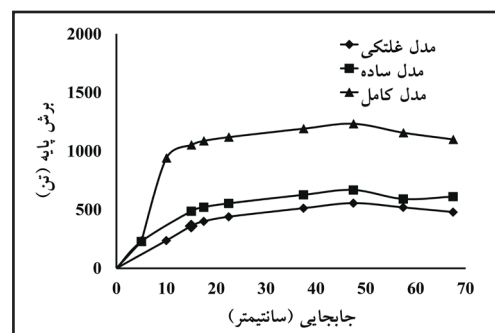
مدل غلتکی و ساده با مدل کامل اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارند. هرچند اختلاف در برش پایه در پل دو دهانه بیشتر است، اما با افزایش طول پل میزان اختلاف دو مدل ساده و غلتکی نسبت به مدل کامل کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این امر ناشی از افزایش تعداد پایه‌های طره از ۲ تا ۶ دهانه در جهت طولی و کاهش تاثیر نقش کوله در جهت طولی باشد. در شکل ۱۰ میزان اختلاف پیشینه برش پایه در جهت طولی برای دو مدل ساده و غلتکی نسبت به مدل کامل با افزایش تعداد دهانه‌ها نشان داده شده است. برای جهت عرضی پل‌ها نیز تحلیل و محاسبه تغییرات برش پایه در برابر جابجایی نقطه کنترلی انجام و نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده، که در شکل (۱۲) ارایه شده است. طبق نتایج به دست آمده در جهت عرضی با توجه به سختی قاب‌های عرضی پل و نسبت سختی نئوپرن‌ها به سختی ستون‌ها دو مدل غلتکی و ساده رفتار تقریباً مشابهی از خود نشان داده اند.

شده طبق ضوابط تحلیل استاتیکی غیرخطی و برای پل‌های با ارتفاع پایه ۳/۵ متر برابر ۳۰ سانتیمتر و در پل‌های با ارتفاع ۱۰ متر ۷۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. مختصات کنترل در کلیه تحلیل‌ها نقطه میانی عرشه در نظر گرفته شده است که با توجه به زوج بودن دهانه‌ها این نقطه در کلیه تحلیل‌ها محل اتصال عرشه و سر ستون میانی است. پس از انجام تحلیل و محاسبه تغییرات برش پایه در برابر جابجایی نقطه کنترلی آنگاه نمودار نیرو-جابجایی در دو جهت طولی (شکل ۱۸) و عرضی (شکل ۲۰) به دست آمده است.

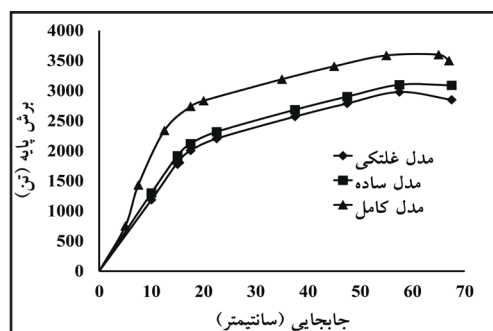
هر سه پل با دو نوع مدل ساده و کامل کوله تا بسته شدن درز انبساط سختی یکسانی دارند اما پس از بسته شدن درز انبساط مدل کامل به دلیل مقاومت خاکریز و دیوار انتهایی سختی بیشتری نشان می‌دهد. اختلاف دو مدل ساده و غلتکی به دلیل نسبت سختی نئوپرن‌ها به سختی پایه‌ها ناچیز است. در کلیه پل‌ها هر دو



پل ۴ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت طولی



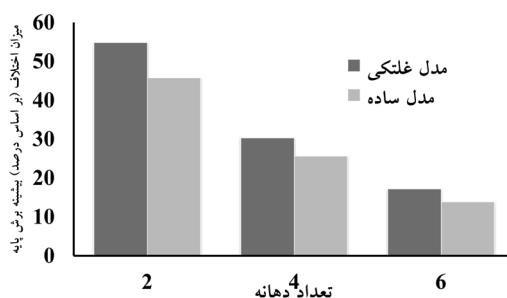
پل ۲ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت طولی



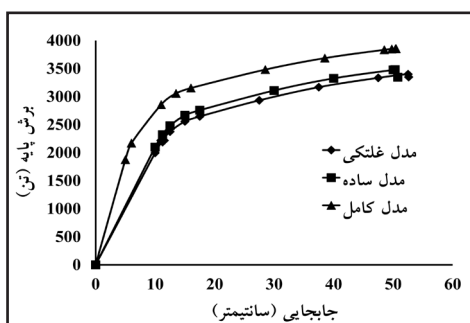
پل ۶ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت طولی

شکل ۱۸. نمودار برش پایه- جابجایی پل ۲، ۴، و ۶ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت طولی

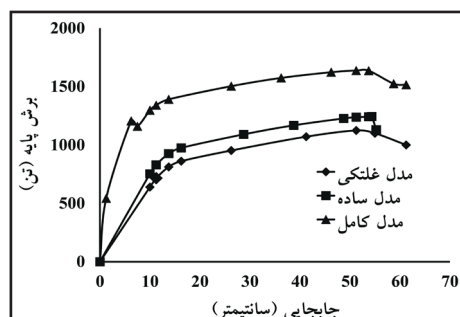
اثرات مدل‌سازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی



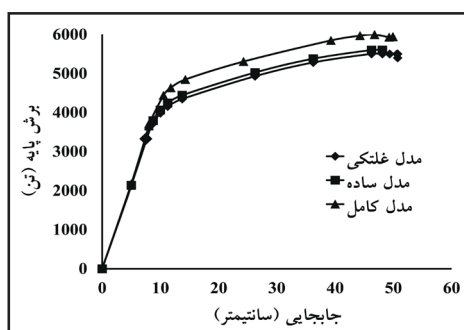
شکل ۱۹. میزان اختلاف (بر اساس درصد) بیشینه برش پایه مدل غلتکی و ساده نسبت به مدل کامل در جهت طولی برای پل‌های با ۲، ۴ و ۶ دهانه



پل ۴ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت عرضی



پل ۲ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت عرضی

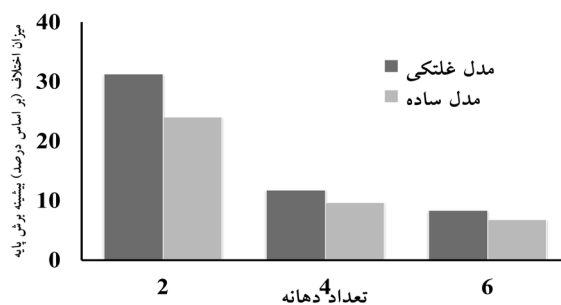


پل ۶ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت عرضی

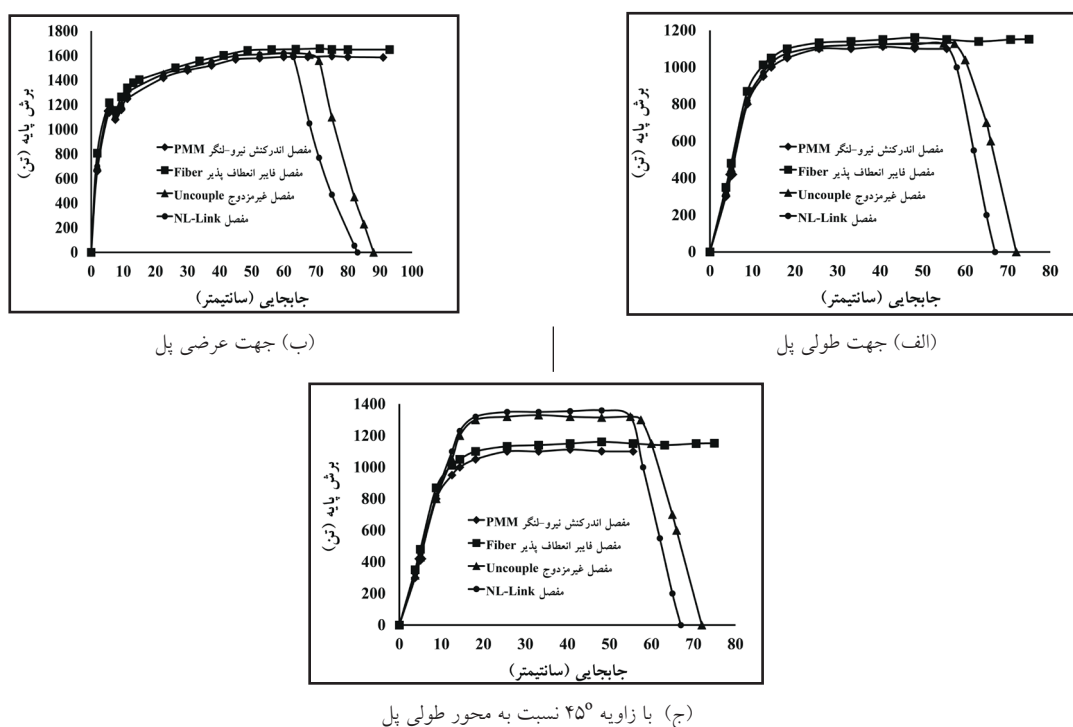
شکل ۲۰. نمودار جابجایی-برش پایه پل ۲، ۴ و ۶ دهانه با ارتفاع پایه ۱۰ متر در جهت عرضی

دیوارهای بالی و برشگیرها در محاسبه سختی سیستم پل بسیار مهم است بنابراین توصیه می‌شود برای تحلیل غیرخطی پل‌های با طول کوتاه در جهت عرضی از یک مدل شامل سختی تئوپرن‌ها، برشگیرها و دیوارهای بالی استفاده شود. با افزایش تعداد دهانه‌ها نقش مدل کوله و برشگیرها کمتر شده و می‌توان بجای استفاده از مدل‌سازی کامل در جهت عرضی برای پل‌های با طول بلند (حداقل ۱۲۰ متر) از یک مدل ساده شامل مدل‌سازی تئوپرن‌ها استفاده کرد.

دو مدل ساده و غلتکی نسبت به مدل کامل به علت نادیده گرفتن سختی برشگیرها، خاک‌ریز و دیوارهای بالی سختی جانبی کمتری برآورد می‌نمایند. شکل ۲۰ میزان اختلاف بیشینه برش پایه در جهت عرضی برای دو مدل ساده و غلتکی نسبت به مدل کامل با افزایش تعداد دهانه‌ها نشان داده شده است. با افزایش تعداد دهانه‌های پل مقادیر خطای مدل غلتکی نسبت به مدل کامل از ۳۱٪ به ۸/۴٪ و خطای مدل ساده از ۲۴٪ به ۶/۸٪ درصد کاهش یافته است. بنابراین در پل‌های با طول کوتاه (حداکثر ۴۰ متر) نقش



شکل ۲۱. میزان اختلاف (بر اساس درصد) بیشینه برش پایه مدل غلتکی و ساده نسبت به مدل کامل در جهت عرضی برای پل‌های با ۲، ۴ و ۶ دهانه



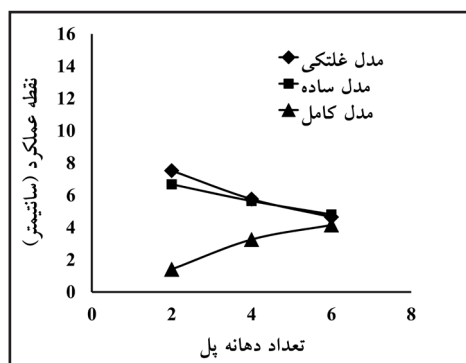
شکل ۲۲. مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی با استفاده از مفصل‌های مختلف تحت بارگذاری جانبی (الف) جهت طولی پل (ب) جهت عرضی پل (ج) با زاویه 45° نسبت به محور طولی پل

یکسانی به همراه داشته است. این رفتار در مورد سایر پل‌ها و انجام تحلیل در راستای محورهای اصلی آنها بطور مشابه تکرار شده است. تنها تفاوت در اندازه بزرگای برش پایه و تغییر مکان بیشینه بوده است. اما تحلیل در راستای 45° درجه نسبت به راستای اصلی پل نتایج متفاوتی داشته است. نتایج این تحلیل برای یک نمونه از پل‌ها در شکل (۲۲-ج) نشان داده شده است. نتایج مربوط به تحلیل در راستای 45° نسبت به محور طولی پل در شرایطی که

پس از مدل‌سازی پایه‌ها با استفاده از مفصل‌های معرفی شده و انجام تحلیل مودال رفتار پایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به ارایه رفتار مشابه انواع پل‌ها بنابراین نتایج مربوط به یک نمونه از پل‌ها در جهت‌های طولی و عرضی و در راستای 45° درجه نسبت به محور اصلی پل در شکل (۲۲) ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌سازی رفتار غیرخطی پایه‌ها با استفاده از مفصل‌های مختلف در جهت طولی و عرضی پل نتایج تقریباً

اثرات مدل‌سازی کوله‌ها و مفاصل پلاستیک پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی

شرایط متفاوت مدل کوله و با افزایش طول پل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل (۲۳) تغییرات مقادیر نقاط عملکرد پل‌ها با افزایش تعداد دهانه تحت اثر سه مدل مختلف کوله نشان داده شده است. در پل دو دهانه با مدل‌های مختلف کوله اختلاف مقادیر نقاط عملکرد قابل ملاحظه بوده و اختلافی در حدود ۹۳٪ بین مدل غلتکی و کامل وجود دارد. این اختلاف در مورد مدل ساده و کامل ۲۹٪ است. با افزایش تعداد دهانه‌ها و طول پل نقاط عملکرد پل‌ها با سه مدل مختلف کوله همگرا شده و اختلاف دو مدل غلتکی و کامل از ۹۳٪ به ۳۷٪ کاهش یافته است. اختلاف دو مدل ساده و کامل در پل چهار دهانه حدود ۳۳٪ است. در پل شش دهانه اختلاف دو مدل غلتکی و کامل ۳۷٪ و اختلاف مدل ساده و کامل ۲۹٪ است. بدین ترتیب برای ارزیابی پل‌های با طول کوتاه (حداکثر ۴۰ متر) در جهت طولی استفاده از مدل غلتکی منجر به بروز مقادیر بزرگ خطا در نتایج خواهد شد. برای ارزیابی پل‌ها با طول زیاد (حداقل ۱۲۰ متر) با توجه به تعداد پایه‌های میانی و کم شدن اختلاف مدل‌های ساده و کامل می‌توان از مدل ساده استفاده کرد. همچنین باید توجه شود که در نظر گرفتن مدل کوله کامل موجب کاهش نقطه عملکرد سازه خواهد شد.

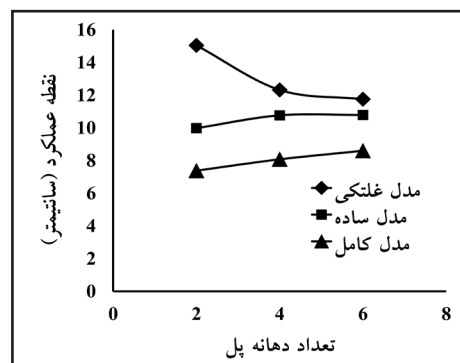


شکل ۲۳. تغییرات نقطه عملکرد پل‌ها در جهت عرضی و عرضی

راستای بارگذاری منطبق بر محورهای اصلی پل نیست، نشان می‌دهد که استفاده از مفصل غیرمزدوج تخمین محافظه کارانه تری از سختی و در نتیجه برش پایه سازه را به همراه خواهد داشت. بنابراین زمانی که پل مورب یا قوسی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و تحلیل با زوایای مختلف نسبت به محورهای اصلی پل انجام می‌شود، استفاده از این نوع مفصل برای تحلیل مناسب نیست، درحالی که کاربرد مفصل‌های اندرکنشی PMM و مفصل فایبری انعطاف‌پذیر به علت توزیع مناسب نیروها و در نظر گرفتن نمودارهای لنگر-انحناء متنوع با سطوح بار محوری گوناگون منجر به نتایج بهتری خواهند شد. در نتیجه برای تحلیل دو بعدی یا سه بعدی پل‌ها با مقاطع نامتقارن یا پل‌های نامنظم استفاده از مفصل اندرکنشی نسبت به مفصل غیرمزدوج توصیه می‌شود.

۵-۲ عملکرد پل‌ها با استفاده از روش ATC40-A

عملکرد هر یک از پل‌ها با استفاده از سه مدل کوله و طبق روش طیف ظرفیت ATC-40 [ATC-40, 1996] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روش طیف ظرفیت و جزئیات انجام آن در منابع مختلف چون ATC-40 [ATC-40, 1996] ارایه شده است. بنابراین با توجه به واقع شدن پل‌های مورد مطالعه بر روی خاک نوع دو، از طیف پاسخ خاک متناظر و مشخصات ساختگاه با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد مطابق ویرایش سوم- استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. نقطه عملکرد هر یک از پل‌ها با سه گونه



شکل ۲۳. تغییرات نقطه عملکرد پل‌ها در جهت طولی و عرضی

شکل ۲۳. تغییرات نقطه عملکرد پل‌ها در جهت طولی و عرضی

مطابق نتایج به دست آمده در جهت عرضی، اختلاف بین نقاط عملکرد مدل ساده و غلتکی با مدل کامل بسیار زیاد است، اما دو مدل ساده و غلتکی اختلاف چندانی با هم ندارد و پیشبینی می‌شود با افزایش طول پل کاملاً بر هم منطبق خواهند شد. در مقایسه این دو مدل با مدل کامل، هرچه تعداد دهانه ها افزایش می‌یابد، اثر مدل کوله بر عملکرد پل کمتر شده و در مورد پل ۱۲۰ متری و سه مدل کوله پاسخ‌ها مشابه هستند. بنابراین برای ارزیابی سازه پل‌هایی با طول متوسط (۴۰ تا ۸۰ متر) استفاده از مدل کامل نتایج دقیق‌تری خواهد داشت و برای پل‌های با طول بلند (حداقل ۱۲۰ متر) می‌توان از مدل غلتکی برای ارزیابی عملکرد پل‌ها در جهت عرضی استفاده کرد.

۶. جمع بندی

با توجه به اینکه پل‌های مورد مطالعه از پل‌های موجود و رایج در کشور هستند، بنابراین نتایج به دست آمده برای کاربرد در طراحی، مدل‌سازی و ارزیابی لرزه‌ای پل‌های با دهانه ساده و دال یکپارچه مورد استفاده خواهند بود.

در پل‌های با دهانه ساده و دال یکپارچه و حداکثر طول ۴۰ متر استفاده از مدل غلتکی موجب افزایش زمان تناوب مود اول ارتعاش پل و محاسبه مقدار کمتر سختی پل نسبت به مقدار واقعی آن خواهد شد. بنابراین در این محدوده از طول پل، با توجه به نتایج تقریباً مشابه مدل‌های کامل و ساده استفاده از یک مدل ساده کوله شامل سختی نشوین‌ها در جهت طولی و عرضی پل برای تحلیل الاستیک خطی مناسب خواهد بود.

در پل‌های با دهانه ساده و دال یکپارچه و طول ۸۰ و ۱۲۰ متری با توجه به همگرایی زمان تناوب مود ارتعاش طولی و همچنین مقادیر اختلاف کم مودهای ارتعاش عرضی و پیچشی برای هر سه مدل کوله استفاده از مدل غلتکی یا ساده برای تحلیل استاتیکی خطی و طراحی کافی خواهد بود.

برای محاسبه ظرفیت پل‌ها در جهت طولی و با توجه به اینکه دو مدل غلتکی و ساده با مدل کامل در پل ۴۰ متری به طور متوسط در حدود ۵۰ درصد در برآورد ظرفیت پل اختلاف داشته‌اند بنابراین استفاده از مدل کوله کامل منجر به نتایج دقیق‌تری خواهد شد. در پل‌های با طول بلند ۱۲۰ متری تاثیر کوله در جهت طولی کمتر شده و اختلاف مدل ساده و کامل در برآورد ظرفیت پل به مقدار حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است. در جهت عرضی و برای پل‌های ۴۰ متری با توجه به اختلاف ۳۰٪ نتایج مدل غلتکی و کامل و اختلاف ۲۵٪ نتایج مدل ساده و کامل در برآورد ظرفیت پل‌ها، بنابراین استفاده از مدل کامل کوله در جهت عرضی ضروری است. در مورد پل‌های ۸۰ تا ۱۲۰ متری با توجه به کاهش اختلاف نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی بین سه مدل بنابراین استفاده از مدل غلتکی یا ساده در جهت عرضی نتایج قابل قبولی به همراه خواهد داشت.

به منظور ارزیابی لرزه‌ای در پل‌های دو دهانه و مدل‌های مختلف کوله اختلاف مقادیر نقاط عملکرد در جهت طولی پل بین مدل غلتکی و کامل بسیار زیاد (حدود ۹۳٪) است و این اختلاف نقاط عملکرد در مورد مدل ساده و کامل حدود ۳۰ درصد است. به این ترتیب برای ارزیابی پل‌های کوتاه در جهت طولی استفاده از مدل غلتکی منجر به بروز مقادیر زیاد خطا در نتایج خواهد شد. در مورد پل‌های با طول بلند (حداقل ۱۲۰ متر) با توجه به تعداد پایه‌های میانی و کاهش اختلاف مدل‌های ساده و کامل می‌توان به منظور ارزیابی پل از مدل ساده استفاده کرد.

در جهت عرضی با مقایسه دو مدل غلتکی و ساده با مدل کامل هرچه تعداد دهانه ها افزایش می‌یابد اثر مدل کوله بر عملکرد پل کمتر شده و در مورد پل ۱۲۰ متری با سه مدل کوله پاسخ‌ها مشابه هستند. بنابراین برای ارزیابی سازه پل‌های با طول متوسط (طول ۴۰ تا ۸۰ متر) استفاده از مدل کامل نتایج دقیق‌تری خواهد داشت. در مورد پل‌های بلند (حداقل ۱۲۰ متر) می‌توان از مدل غلتکی برای

mendations”, Applied Technology Council. Redwood City, CA.

- ATC-40 (1996) “Seismic evaluation and retrofit of concrete building”, Applied Technology Council. Redwood City, CA.

- Aviram, A., Mackie, K. and Stojadinovic, B. (2008) “Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California”, Technical Report 2008/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

- Banerjee, S. and Shinozuka, M. (2007) “Non-linear static procedure for seismic vulnerability assessment of bridges”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.22, pp. 293–305

- Building and Housing Research Center of I.R. Iran (2005) “Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No.2800, (3rd Edition)”, Building and Housing Research Center, BHRC-PN S 253, Tehran, Iran

- Caltrans SDC (2004) “Seismic design criteria, Version 1.3”, California Department of Transportation, Sacramento, California.

ارزیابی عملکرد پل‌ها در جهت عرضی استفاده کرد.

کاربرد انواع مفصل پلاستیک در مدل‌سازی و تحلیل با توجه به اینکه مفاصل Uncoupled و NL-Link برای یک سطح مشخص از نیروی محوری تعریف میشوند (معمولاً بار مرده ستون) بنابراین در ارایه تغییرات شکل پذیری و ظرفیت ستون‌هایی که در معرض نوسانات شدید بار محوری قرار می‌گیرند، نتایج دقیقی به همراه نخواهند داشت. به دلیل اینکه در این مدل مفصل پلاستیک، اندرکنش لنگر-نیروی محوری را به طور مناسبی در نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین در هنگام کنترل ظرفیت ستون در شرایط وجود بارهای محوری نوسانی نتایج غیردقیقی به دست خواهد آمد، بنابراین کاربرد این مدل‌ها به تحلیل‌های ساده و مقدماتی دو بعدی پل محدود می‌شوند. مدل مفصل فیبری انعطاف‌پذیر همانند مفصل اندرکنشی PMM ایده‌آل در شرایط بار محوری نوسانی توانایی ارزیابی دقیق‌تری از رفتار ستون تحت انحنای اعمالی و کرنش محوری برای مقطع عرضی دارد و در نتیجه کاربرد آن برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی سه بعدی پیشنهاد می‌شود.

۷. مراجع

- AASHTO HB-17 (2002) “Standard specification for highway bridges”, 17th Edition, American Association of State and Highway Transportation Officials.

- ACI318-05 (2005) “Building code requirements for structural concrete and commentary”, Michigan, U.S.A.

- ATC-32 (1996) “Improved seismic design criteria for California bridges: provisional recom-

- (2010) "Response simulation and seismic assessment of highway overcrossings", International Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.39, pp.991 –1013.
- Makris, N. and Zhang, J. (2002) "Structural characterization and seismic response analysis of a highway overcrossing equipped with elastomeric bearings and fluid dampers: A case study", Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER 2002/17, University of California, Berkeley.
- Management and Planning Organisation of I.R. Iran (2000) "Code 139 : Standard loads for bridges, Publication No.139", Office of the Deputy for Technical Affairs, Bureau of Technical Affairs and Standards, Management and Planning Organization, Islamic Republic of Iran.
- Management and Planning Organisation of I.R. Iran (2008) "Code 389 : The Code of Practice for Analysis and Design of Concrete Bridges, Publication No.389", Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Islamic Republic of Iran
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. - Chen, Y. (1993) "On static and dynamic refined analysis of reinforced concrete bridges", Computers & Structures, Vol.47, pp. 601–613.
- CSI (2005) "SAP2000- Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures: Basic Analysis Reference Manual", Computers and Structures, Inc, Berkeley, California.
- CSI (2007) "Technical papers and support", Computers and Structures, Inc, Berkeley, California, http://www.csiberkeley.com/support_technical_papers.html.
- Isaković, T., Lazaro, M. P. N. and Fischinger, M. (2008), "Applicability of pushover methods for the seismic analysis of single-column bent viaducts", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.37, pp.1185–1202.
- Kotsoglou, A. N. and Pantazopoulou, S. J. (2007) "Bridge-embankment interaction under transverse ground excitation", International Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vo.36, pp.1719 – 1740.
- Kotsoglou, A. N. and Pantazopoulou, S. J.

- Shattarata, N. K., Symansb, M. D., Mcleanc, D. I. and Cofer, W. F. (2008) "Evaluation of nonlinear static analysis methods and software tools for seismic analysis of highway bridges", Engineering Structures, Vol.30, No.5, pp.1335–1345.
- Stergios, A. and Mitoulis, A. (2012) "Seismic design of bridges with the participation of seat-type abutments", Engineering Structures, Vol.44, No.3, pp 222–233.
- Wilson, J. C. (1988) "Stiffness of non-skew monolithic bridge abutments for seismic analysis", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.16, No.6, pp.867–883.
- Wilson, J. C. and Tan, B. (1990) "Bridge abutments: Formulation of simple model for earthquake response analysis", Journal of Engineering Mechanics (ASCE), Vol.116, No.8, pp.1828–1837
- Zheng, Y., Usami, T. and Ge, H. (2003), "Seismic response predictions of multi-span steel bridges through pushover analysis", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.32, No.8, 1259–1274.
- (1988) "Theoretical stress-strain model for confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, pp.1804-1826.
- Maroney, B. H. and Chai, Y. H. (1994) "Seismic design and retrofitting of reinforced concrete bridges", 2nd International Workshop, Earthquake Commission of New Zealand. Queenstown, New Zealand.
- Megally, S.H., Silva, P. F. and Seible, F. (2001) "Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments", Department of Structural Engineering University of California, San Diego, La Jolla, California.
- Pinho, R., Casarotti, C. and Antoniou, S. (2007) "A comparison of single-run pushover analysis techniques for seismic assessment of bridges", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.36, pp.1347–1362.
- Shamsabadi, A., Rollins, K. and Kapuskar, M. (2007) "Nonlinear soil–abutment–bridge structure interaction for seismic performance-based design", Journal of Geotechnical and Environmental Engineering (ASCE), Vol.133, No.6, pp.707-720.

