بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی کاربرد برشگیر فولادی جاری شونده در پلهای تیرو دال با تکیه‌گاههای نئوپرن

اکبر واثقی[۱] و حامد رستمیان[۲]

۱- استادیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، vasseghi@iiees.ac.ir

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

چکیـــده

در پلهای تیر و دال با تکیه‌گاههای نِئوپرن، بلوکها یا کلیدهای برشی معمولاً به منظور نگهداری تابلیه بر روی پایه و کوله در برابر بارهای جانبی زلزله طراحی می‌شوند. این عناصر نسبتاً صلب می‌باشند و در هنگام زلزله نیروی اینرسی تابلیه را تقریباً به‌طور کامل به پایه و کوله منتقل می‌کنند. جرم تابلیه پلها نسبتاً زیاد می‌باشد؛ لذا نیروی اینرسی ناشی از آن می‌تواند به عناصر زیر سازه (پایه، کوله و فونداسیون) آسیب جدی برساند. در این مقاله طرحی پیشنهاد می‌شود که در آن برشگیرهای فولادی جاری شونده با قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی زیاد جایگزین بلوکهای برشی متداول در پلها می‌گردند. در هنگام زلزله نیروی اینرسی تابلیه در داخل این برشگیرها مستهلک می‌شود و در نتیجه بارهای لرزه‌ای وارد بر عناصر زیر سازه پل بشدت کاهش می‌یابد. رفتار برشگیر پیشنهادی تحت بارهای سیکلی با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی چند نمونه متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعات نمونه‌هایی که از شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی نسبتاً خوبی برخوردار بودند مشخص شدند. این نمونه‌ها در بارگذاری سیکلی تغییرشکلهای غیرخطی را تا ۱۲ برابر حد الاستیک به‌صورت پایدار و بدون زوال در مقاومت تحمل نمودند. یک پل دو دهانه بتنی نیز با انجام تحلیلهای استاتیکی غیرخطی و دینامیکی تاریخچه زمانی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعات تحلیلی نشان می‌دهد که در صورت استفاده از برشگیر پیشنهادی، تقاضای لرزه‌ای در عناصر زیرسازه پل حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

کلید واژه‌ها:

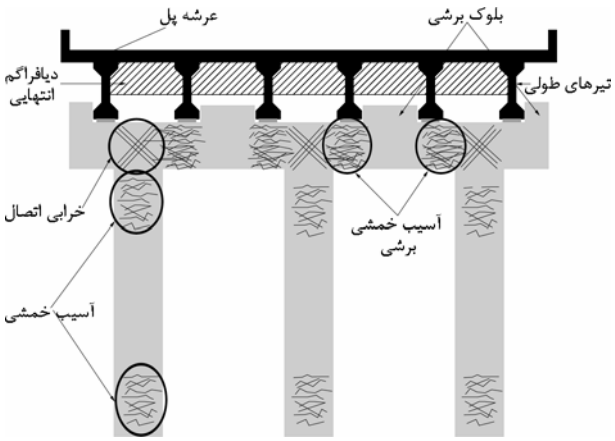
پل؛ سازه؛ زلزله؛

کلید برشی؛ تکیه‌گاه نئوپرن

۱– مقدمه

پلهای تیر و دال با تکیه‌گاههای نئوپرن یکی از متداولترین پلهای کشور می‌باشند. در این نوع پلها نیروی اینرسی تابلیه در هنگام زلزله عمدتاً از طریق بلوکهای برشی به عناصر زیر سازه انتقال می‌یابد و انرژی زلزله با رفتار غیرخطی این عناصر مستهلک می‌گردد. رفتار غیرخطی عناصر زیرسازه معمولاً منجر به آسیب و یا شکست آنها در هنگام زلزله می‌گردد. این آسیبها می‌تواند در ستون پایه، تیر سر ستون، اتصال تیر و ستون و یا فونداسیون رخ دهد. آیین‌نامه‌های معتبر طراحی پل [۱-۳] رفتار غیرخطی و آسیب قابل ترمیم را برای ستونهای پایه مجاز می‌شمارند ولی به دلیل مشکلات اجرایی در ترمیم آسیبهای ناشی از زلزله در سایر عناصر زیرسازه تأکید دارند که تقاضای لرزه‌ای به این عناصر آسیب جدی نرساند. این ضابطه در بسیاری از پلهایی که در کشور ساخته شده‌اند رعایت نشده است و عناصر فوق در این پلها به لحاظ لرزه‌ای آسیب‌پذیر می‌باشند. شکل (۱) آسیبهای احتمالی در پایه یک پل را نشان می‌دهد. یکی از راههای مقاوم‌سازی این پلها کاهش نیروی ناشی از زلزله با استفاده از تجهیزات مستهلک‌کننده انرژی می‌باشد. از روشهای متداول استفاده از این تجهیزات، نصب میراگرهای ویسکوز بین تابلیه و پایه و یا جایگزین نمودن تکیه‌گاههای نئوپرن با جداسازهای لرزه‌ای می‌باشد. با توجه به وزن سنگین تابلیه پل، هزینه این تجهیزات و نصب آنها بویژه هزینه جایگزین نمودن تکیه‌گاههای نئوپرن با جداسازهای لرزه‌ای بسیار زیاد می‌باشد. در این مقاله کاربرد برشگیرهای فولادی جاری شونده به جای بلوکهای برشی بتنی با ارائه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

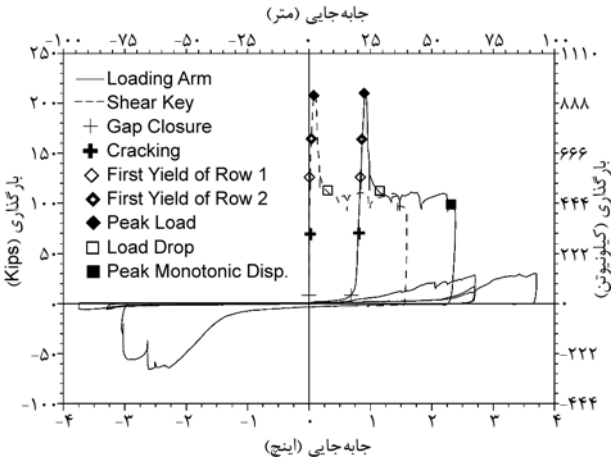
در سالهای اخیر تحقیقاتی به منظور بهبود رفتار بلوکهای



شکل ۱. آسیبهای ناشی از زلزله در پایه پل.

شکل ۲. مود شکست بلوک برشی بتنی [۴].

برشی بتنی با استفاده از آرماتورگذاری ویژه توسط مگالی و همکاران [۴] انجام شده است. هدف از این تحقیقات طراحی نوعی بلوک برشی بوده است که در هنگام زلزله شبیه فیوز عمل کرده و با مستهلک کردن انرژی زلزله نیروی کمتری را به عناصر زیرسازه منتقل نماید. علی‌رغم استفاده از آرماتورگذاری ویژه، منحنی‌های رفتاری نمونه‌های آزمایشگاهی در این تحقیقات حاکی از اتلاف انرژی نسبتاً پایین بویژه پس از سیکل اول بارگذاری می‌باشد. شکلهای (۲) و (۳) مود شکست و منحنی رفتار یک نمونه آزمایشگاهی در این مطالعات را نشان می‌دهد.

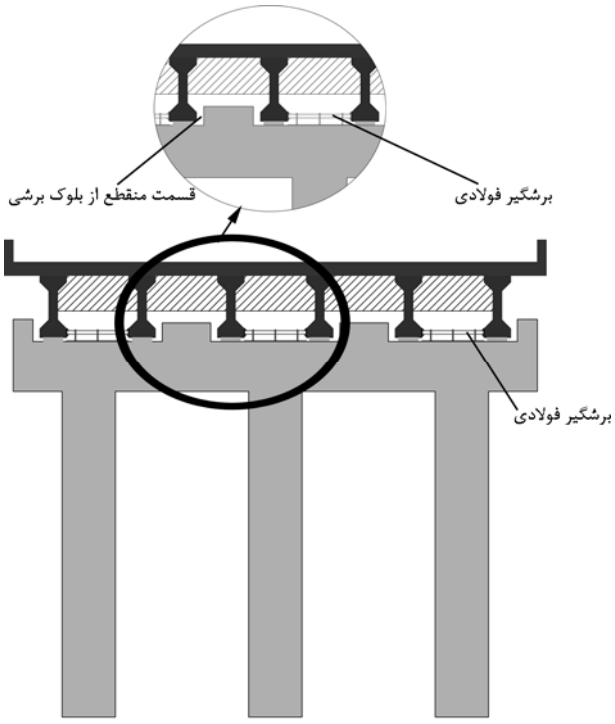


شکل ۳. منحنی نیروی تغییرمکان بلوک برشی بتنی در بارگذاری سیکلی [۴].

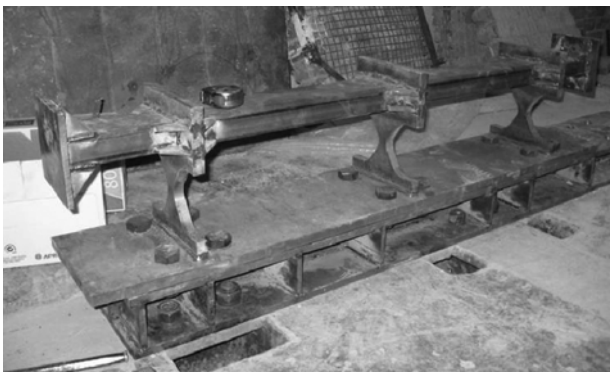
۲- برشگیر فولادی جاری شونده

در پلهای تیر و دال با تکیه‌گاههای نئوپرن می‌توان به جای بلوکهای برشی بتنی از برشگیرهای فولادی جاری شونده با قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی زیاد استفاده نمود. در هنگام زلزله نیروی اینرسی تابلیه در داخل این برشگیرها مستهلک می‌شود و در نتیجه بارهای لرزه‌ای وارد بر زیرسازه پل بشدت کاهش می‌یابد. استفاده از این برشگیرها جهت مقاوم‌سازی این نوع پلها بسیار کاربردی می‌باشد. شکل (۴) نحوه مقاوم‌سازی پایه یک پل را با استفاده از برشگیر پیشنهادی نشان می‌دهد. همین روش نیز برای مقاوم‌سازی کوله‌ها پیشنهاد می‌گردد. از مزایای مهم این طرح، قابلیت انجام عملیات اجرایی مقاوم‌سازی بدون نیاز به محدود نمودن ترافیک می‌باشد. علاوه بر مقاوم‌سازی، این برشگیرها برای طراحی پلهای جدید نیز براحتی قابل استفاده می‌باشند.

برشگیر فولادی پیشنهادی با استفاده از ورقهای *ADAS* که قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی بسیار بالایی دارند ساخته می‌شود. شکل (۵) تصویر یک نمونه آزمایشگاهی که دارای سه پره *ADAS* است را نشان می‌دهد. پره‌ها در پایین به ورق فولادی



شکل ۴. مقاوم‌سازی پایه پل با استفاده از برشگیر فولادی.



شکل ۵. تصویر یک نمونه آزمایشگاهی برشگیر فولادی.

و در بالا به یک پروفیل نسبتاً صلب متصل می‌گردند. در اجرا، ورق فولادی زیرین با میل مهار به تیر سر ستون و یا کوله متصل می‌گردد و دو انتهای آزاد پروفیل فوقانی در مجاورت تیرهای تابلیه قرار می‌گیرند. در هنگام زلزله و با حرکت جانبی تابلیه پل، پره‌های *ADAS* تحت بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرند. چنانچه شدت زلزله و در نتیجه حرکت جانبی تابلیه از میزان مشخصی تجاوز نماید، پره‌های *ADAS* به صورت غیرخطی تغییر شکل می‌یابند و بدین وسیله انرژی لرزه‌ای مستهلک می‌گردد. در یک برشگیر فولادی ابعاد و تعداد پصره‌ها متناسب با شدت زلزله، وزن تابلیه و میزان جذب انرژی مورد نیاز طراحی می‌گردد.

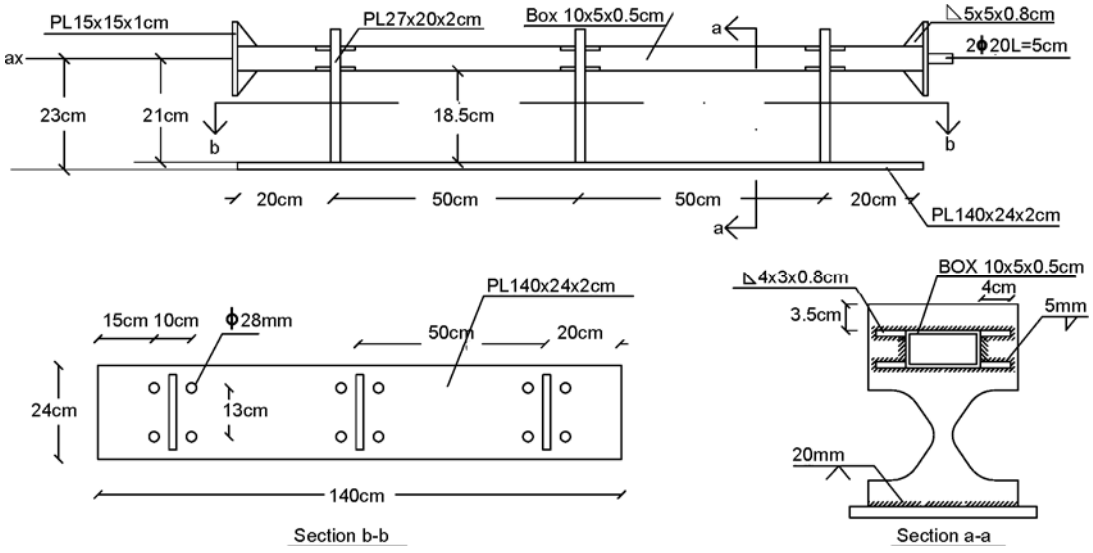
طرح پیشنهادی با انجام آزمایش بر روی چهار نمونه برشگیر فولادی و تحلیل یک پل دو دهانه بتنی مورد بررسی قرار گرفت [۵-۶].

۳- مطالعات آزمایشگاهی

چهار نمونه برشگیر فولادی در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف از آزمایش این نمونه‌ها بررسی رفتار آنها تحت بارگذاری سیکلی و ارزیابی نحوه اتصال قطعات می‌باشد. ابعاد و مشخصات کلی نمونه‌ها در شکل (۶) ارائه شده است. تمام نمونه‌ها با فولاد نرمه *st-37* ساخته شده‌اند. هر نمونه دارای سه پره *ADAS* به ضخامت ۲ سانتیمتر می‌باشد. هر یک از پره‌ها در پایین با جوش نفوذی کامل به یک ورق سرتاسری متصل شده است. در قسمت فوقانی، پره‌ها به یک پروفیل قوطی شکل متصل شده‌اند.

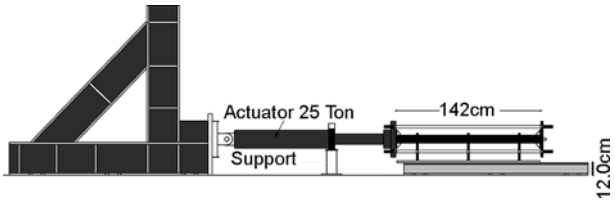
تفاوت اصلی بین نمونه‌ها در نحوه اتصال پره *ADAS* به پروفیل به پروفیل قوطی شکل می‌باشد. به‌طوری که نمونه‌های ۱ و ۲ پره‌های *ADAS* یکپارچه بوده و پروفیل قوطی در چهار قطعه به آنها متصل شده است. در نمونه‌های ۳ و ۴ پره‌های *ADAS* به اندازه مقطع پروفیل سوراخ شده و پروفیل قوطی در یک قطعه سراسری از بین آنها عبور داده شده است. شکل (۷) پره‌های *ADAS* را در دو حالت فوق نشان می‌دهد.

در هر دو حالت برای اتصال پروفیل قوطی و ورق *ADAS* از جوش گوشه استفاده شده است. ابعاد پره‌ها در تمام نمونه‌ها یکسان می‌باشد. این ابعاد با انجام تحلیلهای غیرخطی اجزاء محدود بهینه شده‌اند. چهار نمونه برشگیر فولادی به نحوی که در شکل (۸) نشان داده شده است مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایشها ورق فولادی زیرین نمونه به کف آزمایشگاه متصل گردید و نمونه با استفاده از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۵ تن تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفت. شکل (۹) تصویر یکی از نمونه‌ها را هنگام آزمایش نشان می‌دهد. بارهای مثبت با فشار مستقیم جک به انتهای سمت چپ نمونه و بارهای منفی با فشار به انتهای دیگر نمونه از طریق یک صفحه فولادی و میله‌هایی که



شکل ۶. مشخصات نمونه‌ها.

شکل ۷. پره‌های *ADAS*.

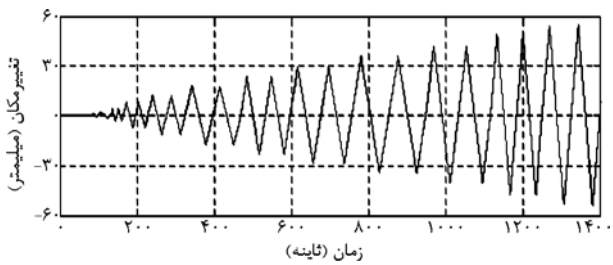


شکل ۸. نحوه آزمایش نمونه‌ها.

به جک متصل بودند اعمال گردید. این روش بارگذاری وضعیت بارگذاری برشگیر یک پل را در هنگام زلزله به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. در طول آزمایش مقادیر نیرو و تغییرمکان به عنوان دو پارامتر اصلی به‌صورت مستمر و با استفاده از تجهیزات *LVDT* و *Load cell* مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و ثبت گردیدند. دقت تجهیزات فوق در اندازه‌گیری نیرو و تغییرمکان ۹۹/۸ درصد می‌باشد.

شکل (۱۰) تعداد و دامنه تغییرمکان سیکلی را نشان می‌دهد.

شکل ۹. تصویر نمونه ۲ هنگام آزمایش.

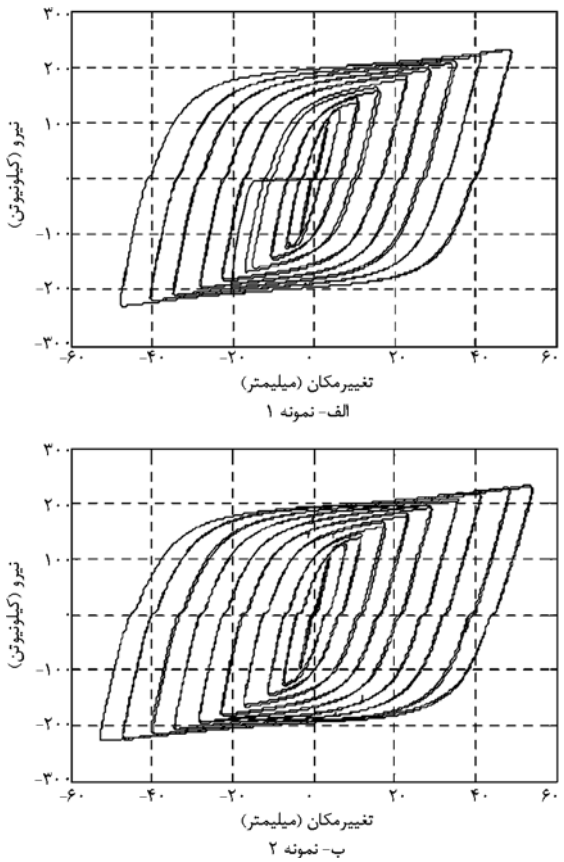


شکل ۱۰. تعداد و دامنه چرخه‌های بارگذاری.

۴- نتایج آزمایشات

شکل (۱۱) منحنی رفتار دو نمونه ۱ و ۲ که در آنها پره‌های *ADAS* سوراخ نشده‌اند را نشان می‌دهد. نمونه ۱ تعداد ۲۰ سیکل بارگذاری را تا دامنه تغییرمکان ۴۸ میلیمتر (معادل ۱۲ برابر حد الاستیک) بدون زوال در مقاومت و سختی و به‌صورت پایدار تحمل نمود. آزمایش این نمونه بدون مشاهده هرگونه شکست در حداکثر دامنه تغییرمکان ۴۸ میلیمتر خاتمه یافت. رفتار نمونه ۲ نیز تا دامنه تغییرمکان ۴۸ میلیمتر نیز مشابه رفتار نمونه ۱ می‌باشد. آزمایش این نمونه تا دامنه تغییرمکان ۵۶ میلیمتر ادامه یافت. در سومین سیکل بارگذاری در این دامنه، جوش اتصال اولین پره *ADAS* به ورق زیرین دچار شکست شد. شکل (۱۲) تصویر ناحیه شکست را نشان می‌دهد. برآورد میرایی ویسکوز معادل نمونه‌ها با توجه به امکان استفاده از این میرایی در تحلیل‌های خطی مهم می‌باشد. نسبت میرایی ویسکوز معادل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. در این رابطه E_h انرژی مستهلک شده (مساحت محصور شده منحنی نیرو تغییرمکان) در یک سیکل بارگذاری و E_s انرژی کرنشی الاستیک می‌باشد.

$$\xi = \frac{E_h}{4\pi E_s}$$



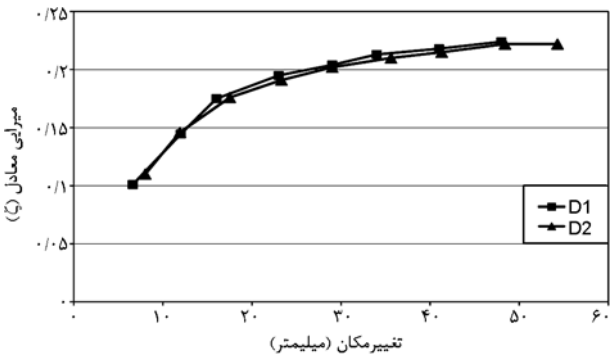
شکل ۱۱. منحنی رفتار نمونه‌های ۱ و ۲.

شکل ۱۲. تصویر ناحیه شکست در نمونه ۲.

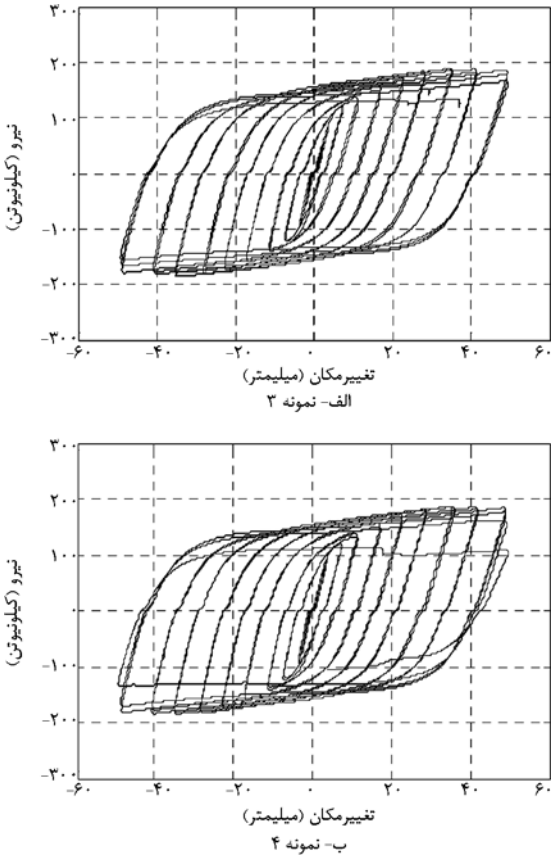
شکل (۱۳) نسبت میرایی ویسکوز معادل دو نمونـه فـوق را در تغییرمکانهای مختلف نشان می‌دهد. در تغییرمکان ایمن ۳۰ میلیمتر، میرایی ویسکوز معادل نمونه‌ها حدود ۲۰٪ می‌باشد.

شکل (۱۴) منحنی رفتار دو نمونه ۳ و ۴ که در آنها پره‌های *ADAS* سوراخ شده‌اند را نشان می‌دهد. هر دو نمونه تعـداد ۱۶ سیکل بارگذاری را تا دامنه تغییرمکان ۳۶ میلیمتر بـدون زوال در مقاومت و سختی و به‌صورت پایدار تحمـل نمودنـد ولـی در دامنه‌های بالاتر، بارگذاری با افت نسبی مقاومت همراه بود.

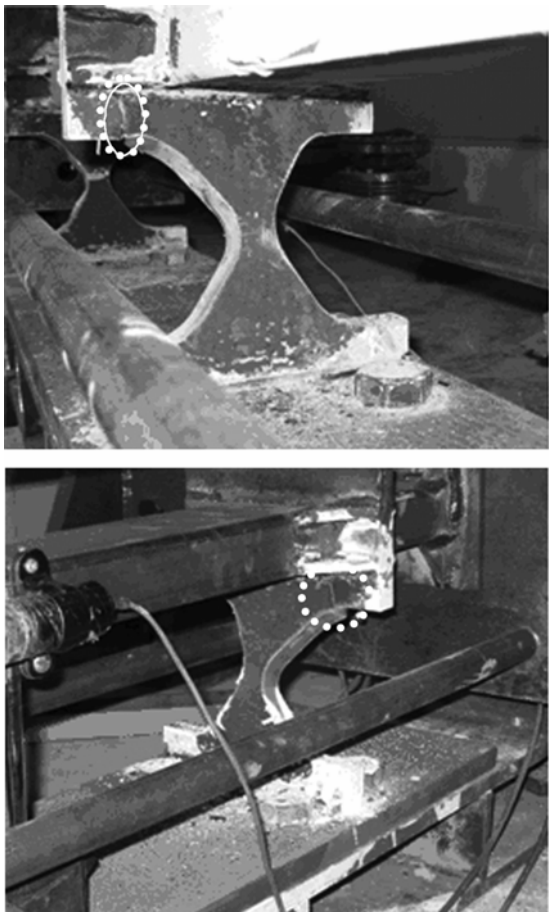
هر دو نمونه در دامنه تغییـرمکـان ۴۸ میلیمتـر در ناحیـه فوقانی یکی از پره‌های *ADAS* دچار شکست شدند. شکل (۱۵) تصویر ناحیه شکست در این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بـه طـور کلی نمونه‌های ۱ و ۲ که در آنها پـره‌هـای *ADAS* سـوراخ نـشده بودند رفتار بهتری نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان دادنـد. این نمونه‌ها از شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بـسیار خـوبی برخوردار بودند و بارگذاری سیکلی با تغییرمکان غیرخطی زیاد را بدون افت مقاومت به خوبی تحمل نمودند.



شکل ۱۳. میرایی ویسکوز معادل نمونه‌های ۱ و ۲.



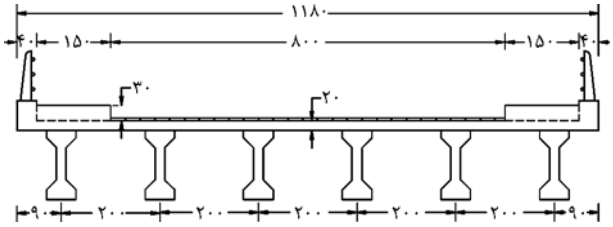
شکل ۱۴. منحنی رفتار نمونه‌های ۳ و ۴.



شکل ۱۵. تصویر ناحیه شکست در نمونه‌های ۳ و ۴.

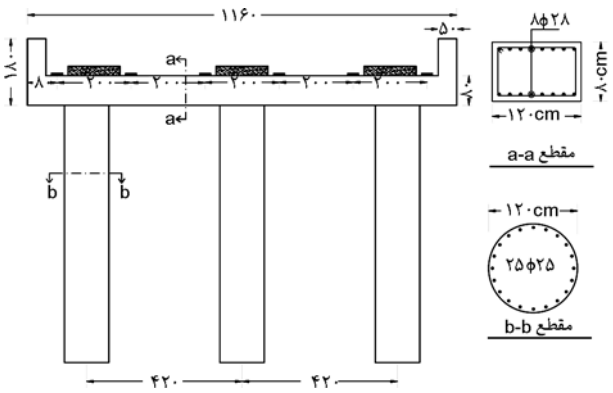
۵- مطالعات تحلیلی یک پل دو دهانه بتنی

به منظور بررسی کاربرد برشگیر فولادی در پلها، یک پل دو دهانه بتنی تیر و دال با یک پایه میانی و دو کوله در طرفین مورد تحلیل قرار گرفت. طول هر دهانه ۲۰ متر و عرض پل ۱۲ متر می‌باشد. تیرهای هر دهانه با تکیه‌گاههای نئوپرن به صورت ساده بر روی پایه میانی و کوله‌ها مستقر می‌باشند. شکل (۱۶) مقطع عرضی تابلیه پل را نشان می‌دهد. تابلیه پل متشکل از ۶ عدد تیر بتن مسلح پیش‌ساخته به ارتفاع ۱۴۰ سانتیمتر و دال بتن مسلح درجا به ضخامت ۲۰ سانتیمتر می‌باشد. تابلیه دارای ۳ دیافراگم عرضی به ضخامت ۳۰ سانتیمتر در دو انتها و وسط هر دهانه است.



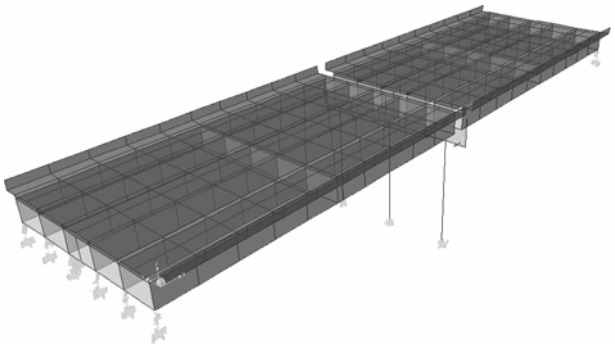
شکل ۱۶. مقطع عرضی پل.

شکل (۱۷) جزئیات پایه میانی را نشان می‌دهد. پایه میانی از ۳ ستون مدور به قطر ۱۲۰ سانتیمتر و ارتفاع ۷ متر و تیر سر ستونی به ابعاد ۱۲۰×۸۰ سانتیمتر تشکیل شده است. سیستم دستگاه تکیه‌گاهی شامل نئوپرنهای مسلح به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتیمتر و به ضخامت ۵ سانتیمتر می‌باشد. در انتهای هر دهانه پل سه بلوک برشی بتنی جهت نگهداری تابلیه بر روی پایه میانی و کوله‌ها نصب شده‌اند. کوله‌های دو طرف به صورت بسته با دیوارهای بتنی در نظر گرفته شدند.



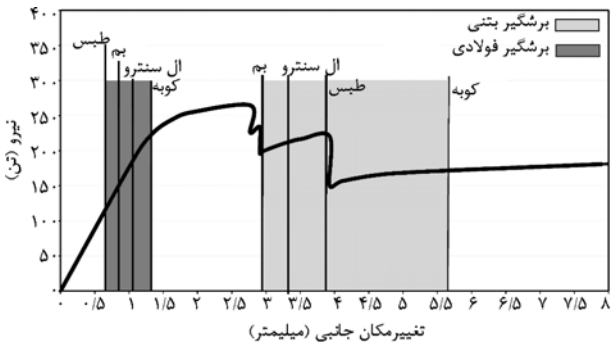
شکل ۱۷. جزئیات پایه میانی.

آسیب‌پذیری این پل در جهت عرضی با انجام تحلیلهای استاتیکی غیرخطی و دینامیکی تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۸) مدل تحلیلی پل را نشان می‌دهد. پایه میانی با آلمان *Frame* و تابلیه پل با آلمانهای *Frame* و *Shell* مدلسازی شده‌اند. تکیه‌گاههای نئوپرن به صورت فنر و بلوکهای برشی بتنی به صورت تکیه‌گاه صلب در جهت عرضی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به سختی زیاد کوله‌ها نسبت به پایه میانی، کوله‌ها نیز به صورت تکیه‌گاه صلب در نظر گرفته شده‌اند. برشگیرهای فولادی با فنرهای غیرخطی مدلسازی شده‌اند. شتابنگاشتهای انتخابی برای تحلیل تاریخچه زمانی مربوط به زلزله‌های کوبه، ال‌سنترو، طبس و بم با بیشینه شتاب $0/7g$ می‌باشند.



شکل ۱۸. مدل تحلیلی پل دو دهانه بتنی.

ظرفیت جانبی پل با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی و تقاضای لرزه‌ای در هر زلزله با انجام تحلیلهای دینامیکی تاریخچه زمانی تعیین گردیدند. شکل (۱۹) منحنی ظرفیت پایه میانی و تغییرمکان جانبی ناشی از زلزله‌ها را نشان می‌دهد. کاهش ناگهانی مقاومت پایه میانی در جابه‌جایی ۲/۸، ۲/۹ و ۳/۹ سانتیمتر ناشی از شکست خمشی برشی مفاصل پلاستیک در تیر سر ستون می‌باشد. بیشینه جابه‌جایی پایه میانی با بلوک برشی بتنی در چهار زلزله کوبه، ال‌سنترو، طبس و بم بین ۳/۴ تا ۶/۲ سانتیمتر می‌باشد که در هر چهار مورد از ظرفیت جابه‌جایی پایه (۲/۸ سانتیمتر) بیشتر است. لذا تیر سر ستون پایه میانی در هر چهار زلزله بشدت آسیب‌پذیر بوده و دچار شکست خمشی- برشی می‌شود.

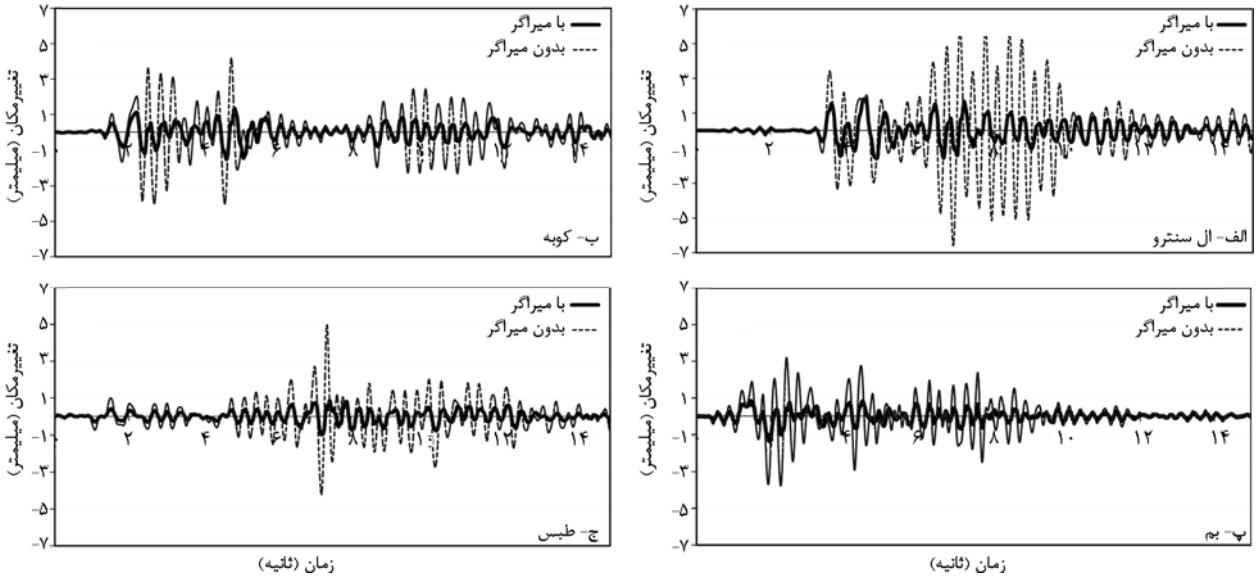


شکل ۱۹. منحنی ظرفیت پایه میانی و تغییرمکان جانبی ناشی از زلزله.

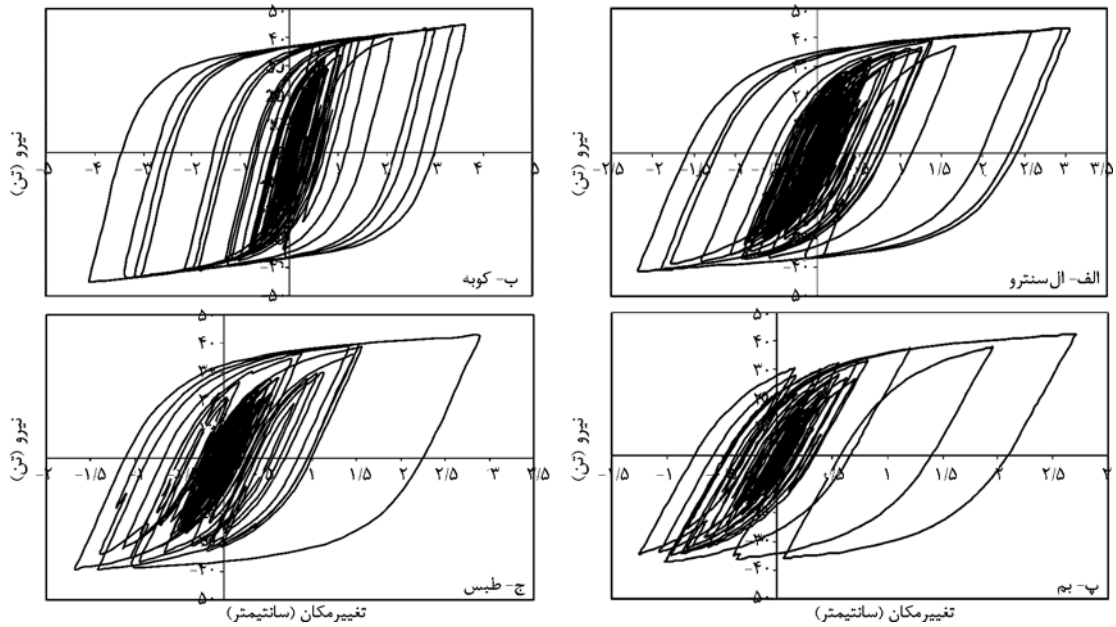
در ادامه مطالعات دو برشگیر فلزی با مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی جایگزین سه بلوک برشی بتنی در انتهای هر دهانه گردید و تحلیلهای تاریخچه زمانی مجدداً تکرار شد. در این تحلیلها بیشینه جابه‌جایی پایه در زلزله‌های کوبه، ال‌سنترو، طبس و بم با حداقل ۵۰ درصد کاهش به کمتر از ۲ سانتیمتر کاهش یافت.

همانطور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود بیشینه جابه‌جایی پایه از ظرفیت جابه‌جایی در هنگام شکست تیر سرستون کمتر است. در نتیجه با استفاده از برشگیر فولادی ضمن کاهش شدید تقاضای لرزه‌ای در عناصر زیر سازه از شکست تیر سر ستون جلوگیری می‌شود. شکل (۲۰) تاریخچه زمانی جابه‌جایی پایه میانی برای هر دو حالت استفاده از بلوک برشی بتنی و برشگیر فولادی را نشان می‌دهد. در این شکل تأثیر کاربرد برشگیر فولادی در کاهش پاسخ لرزه‌ای پایه میانی کاملاً مشهود می‌باشد. البته باید توجه نمود که تأثیر میراگر بر پاسخ لرزه‌ای پایه پل با افزایش پریود طبیعی پایه کاهش می‌یابد. لذا به دلیل افزایش پریود طبیعی در پایه‌های بلند راندمان میراگر در کاهش پاسخ لرزه‌ای کمتر از پایه‌های کوتاه می‌باشد.

شکل (۲۱) پاسخ برشگیر فولادی را در هنگام زلزله نشان می‌دهد که حاکی از جذب بخشی از انرژی زلزله توسط این برشگیر می‌باشد.



شکل ۲۰. جابه‌جایی پایه میانی در هنگام زلزله.



شکل ۲۱. پاسخ برشگیر فولادی در هنگام زلزله.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله جهت بهبود رفتار لرزه‌ای پلهای تیر و دال با تکیه‌گاههای نئوپرن طرحی پیشنهاد شده است که در آن برشگیرهای فولادی با عناصر *ADAS* جایگزین بلوکهای برشی متداول در پلها می‌گردند. رفتار برشگیر پیشنهادی با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی چهار نمونه مورد بررسی قرار گرفت و نمونه‌های برتر مشخص شدند. این نمونه‌ها تعداد ۲۰ سیکل بارگذاری را تا دامنه تغییرمکان ۴۸ میلیمتر (معادل ۱۲ برابر حد الاستیک) بدون زوال در مقاومت و سختی و به‌صورت پایدار تحمل نمودند. در دامنه تغییرمکان ایمن ۳۰ میلیمتر، میرایی معادل ویسکوز نمونه‌های فوق حدود ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین به‌منظور بررسی کاربرد این برشگیرها در پلهای تیر و دال، یک پل دو دهانه بتنی با روش اجزاء محدود مورد تحلیل قرار گرفت. ظرفیت جانبی پل با تحلیل استاتیکی غیرخطی و تقاضای لرزه‌ای با تحلیلهای دینامیکی تاریخچه زمانی برای چهار رکورد زلزله با بیشینه شتاب ۰/۷g تعیین گردیدند. نتایج این تحلیلها نشان داد که تیر سر ستون پایه میانی در هر چهار زلزله بشدت آسیب‌پذیر بوده و دچار شکست خمشی- برشی می‌شود. ولی در صورت استفاده از برشگیرهای فولادی پاسخ لرزه‌ای پایه پل حدود ۵۰ درصد کاهش یافته و از شکست تیر سر ستون جلوگیری می‌گردد. از این برشگیر می‌توان در ساخت پلهای جدید و یا مقاوم‌سازی پلهای موجود استفاده نمود.

مراجع

1. AASHTO (2004). “LRFD Bridge Design Specifications”, Third Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
2. Caltrans (2004). “Seismic Design Criteria”, Version 1.4. California Department of Transportation, Sacramento, CA.
3. ATC-32 (1996). “Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations”, Applied Technology Council (ATC).
4. Megally, S.H., Silva, P.F., and Seible, F. (2002). “Seismic Response of Sacrificial Shear Keys in Bridge Abutments”, Report No. SSRP–2001/23, University of California, San Diego.

۵. واثقی،اکبر و رستمیان، حامد (۱۳۸۷). ”بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی کاربرد مستهلک‌کننده‌های *ADAS* برای مقاوم‌سازی پلها“، گزارش طرح پژوهشی شماره ۷۵۰۵-۳۰۹، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۶. رستمیان، حامد (۱۳۸۶).”مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی تجهیزات متداول مستهلک‌کننده انرژی برای مقاوم‌سازی پلها“، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.