

شیوه های نوین مقاوم سازی پل ها

میر احمد لشته نشایی^۱ ، مجتبی اصغری سرخی^۲ ، الهام بخشیان لموکی^۳
عضو هیئت علمی گروه عمران دانشگاه گیلان ، رشت - کیلومتر ۵ جاده رشت تهران - دانشکده فنی دانشگاه
گیلان - گروه عمران

خلاصه

به علت نقش مهمی که پل ها پس از وقوع زلزله در عملیات امداد و نجات دارند لازم است که این سازه ها در مقابل حملات لرزه ای از سطح حفاظت بالاتری برخوردار باشند. زلزله های اتفاق افتاده در دهه ۹۰ میلادی در آمریکا، ژاپن، تایوان و ترکیه ، خرابیهای نسبتاً زیادی در پل ها ایجاد کردند. زلزله نقاط ضعف سازه را شناسایی نموده و بیشترین خسارت را بدانجا وارد می کند که پل ها به دلیل درجه نامعینی کم در برابر این حملات بسیار آسیب پذیرند. آسیب های قابل توجه در پایه پل ها به دو گروه قابل دسته بندی هستند: دسته اول آسیب های وابسته به گسیختگی خمشی پایه به علت مقاومت خمشی ناکافی با ظرفیت شکل پذیری خمشی ناکافی پایه ستون پل و دسته دوم آسیب های وابسته به شکست برشی به علت ظرفیت برشی ناکافی پایه پل. در حالتی که زلزله با پیروی های بلند رخ دهد، فراهم نمودن انعطاف پذیری مناسب برای مقابله با انرژی ورودی آن ، امکان پذیر نمی باشد، در این حالت میزان جذب و استهلاک انرژی ، نقش بسیار مهمی در رفتار سازه خواهد داشت. در این روش ها سیستم های مکانیکی مختلفی در نشیمن پل و یا در دیافراگم های انتهایی آن جداسازی می گردند که در هنگام وقوع زلزله اقدام به جذب و استهلاک انرژی نماید. در این مقاله سعی شده است تا پس از پرداختن به علل خرابی پل ها در اثر زلزله به شیوه های نوین مقاوم سازی و بهسازی لرزه ای پل ها پرداخته شود.

کلمات کلیدی: پل ، مقاوم سازی ، میراگر ، جداگر ، FRP

۱- مقدمه

هدف اصلی از بهسازی لرزه ای ستون های بتن آرمه افزایش مقاومت برشی، به ویژه در پایه ها با قطع آرماتور طولی در وسط ارتفاع بدون طول مهارتی کافی می باشد. این کار شکل پذیری ستون را افزایش میدهد زیرا از شکست برشی زودرس جلوگیری میکند. اما اگر فقط شکل پذیری افزایش یابد، ممکن است تغییر شکل پسماند در پایه بعد از زلزله افزایش یابد. مقاومت خمشی پایه هم باید افزایش یابد، که این منجر به افزایش نیروی زلزله انتقالی از پایه به پی میشود. بررسی انواع پی نشان داده که اگر افزایش مقاومت خمشی پایه در اثر مقاوم سازی کمتر از دوبرابر مقاومت خمشی پایه پل موجود باشد، پی با افزایش نیروی زلزله دچار شکست نمی شود. [۱]

۲- انواع خرابی های پل ها در اثر زلزله

اعم آسیب های دیده شده در پل ها تحت زلزله عبارتند از:

- خرابی پل در اثر گسیختگی گسل یا روانگرایی خاک
- خرابی نشیمن و انحراف روسازه در هر دو امتداد طولی و عرضی
- فروریزی و کج شدگی پایه های پل به علت خرابی برشی
- فروریزی دهانه های پل به خاطر لغزش از نشیمن
- خرابی دیواره پشتیبان کوله ها [۲]

^۱ استاد یار دانشکده عمران دانشگاه گیلان

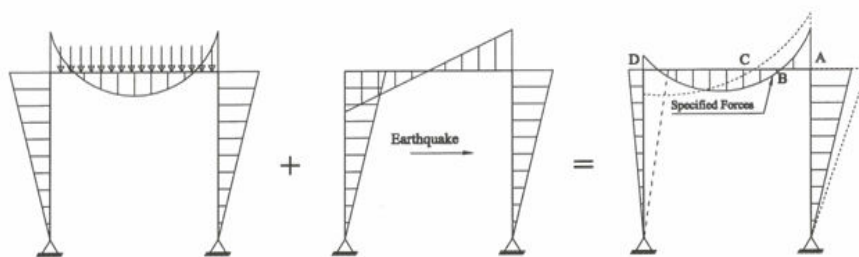
^۱ کارشناس عمران دانشگاه گیلان

^۲ کارشناس عمران دانشگاه صنعتی بابل

۲-۱- خرابی پل های طرح شده با روش الاستیک

پل ها بویژه پلهای بتن آرمه و بتن پیش تنیده علیرغم سیستم سازه ای ساده و رفتار شناخته شده ایکه دارند ، در برابر زلزله عملکرد خوبی نداشته اند و این مطلب عمدتاً ناشی از عوامل زیر است:

- عدم اجرای جزئیات لرزه ای مناسب
 - فلسفه طراحی الاستیک ← طراحی بر اساس ظرفیت
- تمامی پلهای ساخته شده تا قبل از سال ۱۹۷۱ با روش طرح الاستیک طراحی شده اند.
- تغییر مکان های لرزه ای بر اساس اصول طراحی الاستیک بسیار کمتر از آن است که در یک زلزله واقعی سازه تجربه می کند . به علاوه استفاده نکردن از ممان اینرسی ترک خورده مقطع این موضوع را تشدید می کند . از عواقب آن به موارد زیر میتوان اشاره کرد :
- افتادن و شکست عرشه ها به سبب از دست رفتن سطح اتکا (Unseating)
 - کوبیده شدن قسمت های سازه ای پل به یکدیگر (Pounding Effect)
 - آسیب دیدگی کلید برشی (Shear Key)
 - تخریب مفید کننده های مفصل ها (Hing Restrainer)
- در طراحی الاستیک نسبت نیروی لرزه ای به نیروی گرانشی به طور نا صحیحی پایین می باشد این موضوع باعث الگوی نامناسب توزیع لنگر می گردد و از عواقب آن می توان به تخمین نامناسب محل تشکیل مفصل لاستیک ، نقطه عطف و ... اشاره نمود. [۲]



شکل ۱- محل تشکیل مفصل پلاستیک و نقطه عطف در پل های طرح شده بر روش الاستیک

رفتار غیر خطی سازه و وابستگی آن به شکل پذیری ، پارامتر بسیار مهمی در عملکرد لرزه ای پل می باشد . چنانچه بخش عمده ای از استهلاک نیروی زلزله در این ناحیه صورت میگیرد اما در طراحی الاستیک این موضوع لحاظ نمی گردد [۲]

نقائص روش طرح الاستیک :

- در روش طرح لرزه ای الاستیک سطح نیروهای جانبی ناشی از زلزله بسیار پایین برآورد میشود
- نسبت بار های مرده به بارهای جانبی ناشی از زلزله نادرست برآورد میشود.
- پاسخ غیر الاستیک سازه تحت زلزله های شدید و مفاهیم مرتبط با آن مانند شکل پذیری و اصول طراحی بر مبنای ظرفیت در روند طرح الاستیک به هیچ وجه در نظر گرفته نمی شود.
- عدم رعایت ضوابط شکل پذیری منجر به مشکلات زیر میشود:
- کمبود محصور شدگی آرماتورهای طولی ستونها در نواحی تشکیل لولای پلاستیک
- وصله کردن آرماتورهای طولی ستون ها در نواحی پر تنش
- عدم کفایت طول وصله های پوششی برای فعال کردن کل مقاومت آرماتورهای وصله شده
- استفاده از وصله های جوشی در پای ستونها
- وصله کردن آرماتورهای عرضی محصور کننده در نواحی پر تنش
- قطع زود هنگام آرماتورهای طولی ستونها [۳]

۲-۲- خرابی پل ها ناشی از گسیختگی

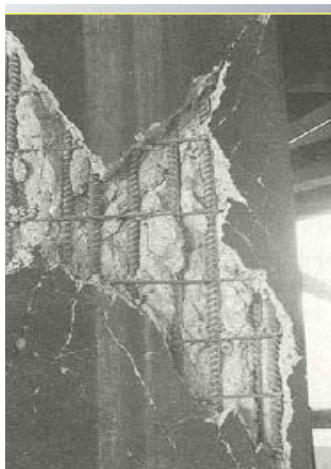
۲-۲-۱- گسیختگی خمشی و عدم شکل پذیری خمشی

گسیختگی های خمشی در ناحیه مفصل پلاستیک عمدتاً در پایه پل ها با آرماتورهای طوای پیوسته رخ میدهد. بعضی گسیختگی ها به این علت است که هسته بتن بطور کافی با آرماتور عرضی محصور نشده تا به پایه اجازه رسیدن به جابجایی غیر الاستیک وارد شده توسط زلزله را بدهد. گسیختگی مفصل پلاستیک بوسیله ایجاد ترک های افقی ، فروریختن هسته بتن در فشار و شکست آرماتور عرضی و کمانش آرماتور طولی ایجاد میشود. به علت کمبود فشار دورگیر کافی در سطح پارگی ناحیه وصله آرماتور ، لغزش قبل از اینکه مقطع به ظرفیت خمشی نهایی برسد رخ میدهد. این مکانیزم لغزش در اثر وقوع ترک های عمودی ریز در هسته بتن فعال میشود. لغزش افزایش می یابد و با بزرگ شدن ترک های قائم و یکارچه شدن آنها پوشش بتنی در ناحیه وصله آرماتور تخریب میشود. کم شدن مقاومت خمشی معمولاً برای تقاضای شکل پذیری در جابجایی کم رخ میدهد و حتی میتواند قبل از تسلیم آرماتور طولی پایه رخ دهد. [۴]

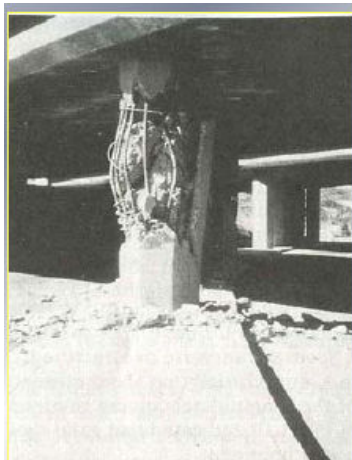
۲-۲-۲- گسیختگی برش

شکست های برشی ترد هستند و منجر به کاهش سریع مقاومت جانبی پایه میگرددند. ستون های کوتاه با جزئیات آرماتوربندی عرضی قدیمی بویژه به شکست برشی آسیب پذیرند ، در حالیکه برای یک بار جانبی داده شده مقاومت خمشی موجود معمولاً خیلی بیشتر از مقاومت برشی می باشد. یک گسیختگی ترکیبی برشی-خمشی هم میتواند رخ بدهد و با انتقال ناحیه مفصل پلاستیک همراه باشد. مفصل پلاستیک میتواند به مقطعی که نسبت فشار دورگیر به ممان خمشی اعمالی کمتر باشد منتقل شود. اگر فاصله آرماتورهای عرضی در ارتفاع پایه یکسان نباشد گسیختگی برشی ممکن است دور از ناحیه مفصل پلاستیک رخ دهد [۴]

ماهیت ترد و ناگهانی شکست برشی باعث شده است در سازه های مقاوم در برابر زلزله یکی از مهمترین الزامات ، بکارگیری تدابیری برای دوری از انهدام برشی باشد. از آنجا که شکست برشی ستون همراه با ایجاد ترک های مورب در کل ارتفاع ستون خواهد بود لذا در مقاوم سازی ستون های بتن آرمه در برابر برش لازم است کل ارتفاع ستون مقاوم سازی شود. ستون های بتن آرمه به دلایل مختلفی ممکن است در اثر برش آسیب پذیر باشند ، مهمترین این علت ها عبارتند از : ناکافی بودن خاموت ها ، کوتاه بودن ستون ها ، کمتر بودن ظرفیت برشی اولیه مقطع از نیروی برشی وارد بر آن در هنگام زلزله و نهایتاً کاهش ظرفیت برشی مقطع در هنگام زلزله. [۱]



شکست برشی ستون طی
زلزله ۱۹۸۷ وایتیر



شکست برشی ستون طی
زلزله ۱۹۷۱ سن فرناندو



شکست برشی ستون طی
زلزله 1994 نورتریج

شکل ۲- نمونه هایی از شکست برشی ستون ها در زلزله های اخیر

۳- راهکارهای بهسازی پل ها

بند ۲-۶ دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود :

راهکارهای زیر را میتوان بصورت منفرد یا در ترکیب با یکدیگر برای بهسازی بکار گرفت:

- اصلاح موضعی اجزای سازه که دارای عملکرد نامناسب در زلزله هستند.
 - حذف یا کاهش بی نظمی در ساختمان های موجود
 - تامین سختی جانبی لازم برای کل سازه
 - کاهش جرم سازه
 - بکارگیری سیستم های جداساز لرزه ای
 - بکارگیری سیستم های غیر فعال اتلاف انرژی
 - تغییر کاربری سازه
- که در مورد پل ها میتوان با بکارگیری سیستم های جداساز لرزه ای و سیستم های غیر فعال اتلاف انرژی پل مورد مورد نظر را بهسازی نمود.[۵]

۴- شیوه های نوین مقاوم سازی پل ها

۴-۱- جداگر ها

جداگر ها به منظور جداسازی سازه از حرکات شدید زمین هنگام زلزله بکار میروند. برخلاف ساختمان که جداسازی آن غالباً از روی فونداسیون انجام میپذیرد ، در پلها این جداسازی مابین روسازه و زیر سازه اعمال میگردد. علت این امر نیروی اینرسی بسیار زیاد قسمت روسازه (که شامل وزن عرشه میشود) و همچنین سهولت اجرای آن میباشد. بطور کلی این جداگرها در پلها به دو صورت الاستومتریک(لاستیکی) و اصطکاکی بکار گرفته می شوند. این جداگر ها به سبب سختی اندک وقتی زیر روسازه تعیبه میگردند موجب افزایش پیرو ارتعاش آزاد کل پل گشته و انتظار میرود که این امر باعث کاهش نیروی زلزله وارد به سازه گردد. که معمولاً با توجه به طیف پاسخ تغییر مکان این کاهش نیرو با افزایش تیبیر مکان روسازه پل همراه است [۶]

۳-۱-۱- جداگر لاستیکی

این جداگر های از دهه هفتاد میلادی در سازه ها بکار گرفته شده اند در پلها ، به عنوان یک دستگاه تکیه گاهی (که در ایران نئوپرن نامیده میشود) اکثراً بکار گرفته میشوند. لیکن به عنوان یک جداگر در تحلیل سازه پل بکار گرفته نمی شود. این دستگاه تکیه گاهی از لاستیک طبیعی یا مصنوعی (نئوپرن) و بصورت ساده و یا مسلح به ورقهای فولادی (بصورت لایه لایه) ساخته می شوند. نوع جداگر لرزه ای آن معمولاً نئوپرن مسلح میباشد که لایه های فولادی باعث افزایش سختی جداگر در جهت قائم شده لیکن در جهت افقی سختی آن کماکان همان سختی برشی لاستیک هاست که دهها برابر کمتر از سختی قائم میباشد. این جداگر عمدتاً از افزایش پیرو سازه در کاهش نیروی زلزله بهره می برد و میرایی ویسکوز بحرانی آن حدود ۳٪ می باشد. نیروی بازگرداننده در سیستم طبیعی وجود دارد که همان قابلیت ارتجاعی لاستیک میباشد . نقطه ضعف این جداگرها در مقدار جابجایی بالای آن میباشد. این نئوپرن ها در تحت زلزله حدوداً باید تا ۳ برابر ضخامت خود را در جابجایی جانبی تحمل کنند و پایدار بمانند. [۶]

۳-۱-۲- جداگر های اصطکاکی

می توان گفت این جداگر ها از قدیمی ترین روشهای جداسازیست . زیرا که از صدها سال پیش بشر کشف کرده بود که اگر زیر یک ساختمان را با شن گرد پر کند در زلزله روی آن می لغزد و می تواند پایدار بماند. امروزه جداسازی توسط صفحات فولادی پولیش شده که آغشته به ماده تفلون شده اند انجام می پذیرد. [۶]

۴-۲- میراگر ها

دراثر اعمال بارهای دینامیکی تغییر مکان حاصله همراه با سرعت و شتاب خواهد بود. جهت مقابله با شتاب وارده نیرویی به عنوان نیروی لختی در اثر جرم آن و جهت مقابله با سرعت نیرویی به نام نیروی میرایی در اثر اصطکاک بین ذرات و لقی اتصالات و غیره به وجود می آید و باعث تلف شدن مقداری انرژی می شود به این پدیده در اصطلاح میرایی می گویند. [۶]

با تعیبه میراگر (دمپر) می توان اثر تخریب دینامیکی و انتقال جانبی سازه را به حداقل رساند.



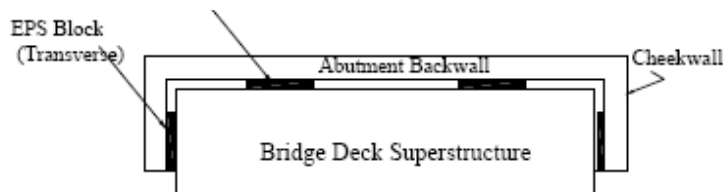
شکل ۳- تعبیه میراگر در محل تکیه گاه پل

افزودن میراگرهای سیال به پایه ها دارای دو اثر می باشد:

- کلیه پایه ها بصورت توزیع شده ای در تحمل بار زلزله سهیم میشوند.
 - تغییر مکان نسبی بین عرشه و پایه در میراگر باعث اتلاف انرژی می شود.
- عمده جرم سازه ها در تراز عرشه متمرکز شده است و معمولاً لازم است که عرشه پلها تحت حملات لرزه ای الاستیک خطی باقی بمانند. جدا کردن عرشه از زیرسازه سبب حفاظت بیشتر عرشه میگردد.
- جدا کردن عرشه از زیر سازه با استفاده از تکیه گاه های الاستومتری به علت کاهش نیروهای منتقله به زیرسازه در اثر تغییر شکلهای حرارتی عرشه از قدیم مرسوم میباشد. با ایجاد تغییرات اندک در سیستمهای تکیه گاهی و درزهای انبساط میتوان این سیستم را در مورد پل ها بکار گرفت. [۳]
- استهلاک انرژی در این وسایل عمدتاً با استفاده از روش های مختلفی نظیر جاری شدن یک فلز نرم (کار داخلی یا هیستریس) ، اصطکاک مواد بر روی هم ، حرکت یک پیستون درون یک ماده ویسکوز و یا رفتار ویسکو الاستیک در مواردی از جنس شبیه لاستیک می باشد . [۶]

۴-۳- بهسازی لرزه ای با استفاده از فوم پلی استایرن EPS

خاصیت مهم فوم پلی استایرن فراوانی، ضربه گیری و افزایش مقاومت فشاری پس از تغییر شکل آن میباشد. محل نصب این مواد حد فاصل دیوار گوشواره ای کناری در جهت عرضی و بین عرشه و کوله در جهت طولی میباشد [۶]



شکل ۴- بهسازی لرزه ای عرشه پل با استفاده از EPS

۴-۴- مقاوم سازی ستون و عرشه با FRP

پوشش های FRP عمدتاً برای بهسازی رفتار سازه های موجود یا تعمیر خرابیهای ایجاد شده در اثر خستگی ، خوردگی ، فرسودگی و... در سازه های موجود به کار میروند. این پوشش به وجه خارجی عضو بتن می چسبند . نسبت وزن به مقاومت این مواد ۵۰ برابر بتن و ۱۸ برابر فولاد میباشد. انواع کامپوزیت های پلیمری FRP متداول در مهندسی عمران عبارتند از الیاف کربن CFRP ، الیاف شیشه GFRP و الیاف آرامید . از محاسن کامپوزیت های پلیمری FRP میتوان به وزن کم ، انعطاف پذیری بالا ، راحتی در جابه جایی، سرعت عمل بالا، برشکاری در قطعات دلخواه ، سادگی اجرا و امکان تقویت به صورت خارجی و از معایب آن نمیتوان به آسیب پذیری در مقابل آتش سوزی و کم تجربگی مشاوران و پیمانکاران اشاره نمود [۷].

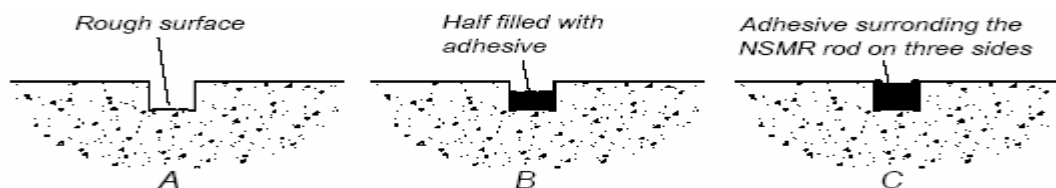


شکل ۵- ستون های یک پل قبل و بعد از مقاوم سازی با جاکت FRP

در اعضای تخت مانند دالها و تیر ها صفحات پیش ساخته کامپوزیت های FRP با عرض ۵ تا ۱۵ سانتی متر بر روی سطح تمیز شده عضو-سطح بتن با ماسه و با فشار هوا تمیز می شود و با استفاده از چسب چسبانده میشوند. در اعضای عمودی مانند ستون ها برای تقویت از صفحات پیش ساخته که در آنها الیاف به صورت حلقه ای قرار دارند استفاده میشود . پس از آماده سازی سطح عضو بتنی با لایه چسب روی آن را می پوشاند و صفحه مورد نظر در راستای مشخص روی عضو چسبانده می شوند. [۸]

۴-۴-۱- اتصال کامپوزیت های FRP پروش NSM

روش کار این است که با برش سطح بتن بوسیله اهر شیارهایی روی سطح المان ایجاد شود . بعد از تخلیه شیار از ذرات اضافی و گرد و غبار ، تا حدود نیمی از شیار میله کامپوزیت در شیار قرار می گیرد و با اپوکسی شیار پر میشود. در استفاده از این روش برای اتصال کامپوزیت باید پوشش بتن ضخیمی در المان وجود داشته باشد . [۹]



شکل ۶- اتصال کامپوزیت های FRP پروش شیارزنی

۴-۴-۲- عرشه ساخته شده از کامپوزیت بتن و FRP

در این روش بتن در قالب پانل های FRP ریخته میشود و عرشه به تیر ها که از میلگردهای برشی استفاده کرده است متصل می گردد. بعد از قرار دادن پانل ها بر روی تیر فولادی میلگردهای برشی جوشکاری میشوند . ماهیچه بتنی مابین پانل های عرشه کامپوزیتی و تیر فولادی قرار میگیرند. [۱۰]

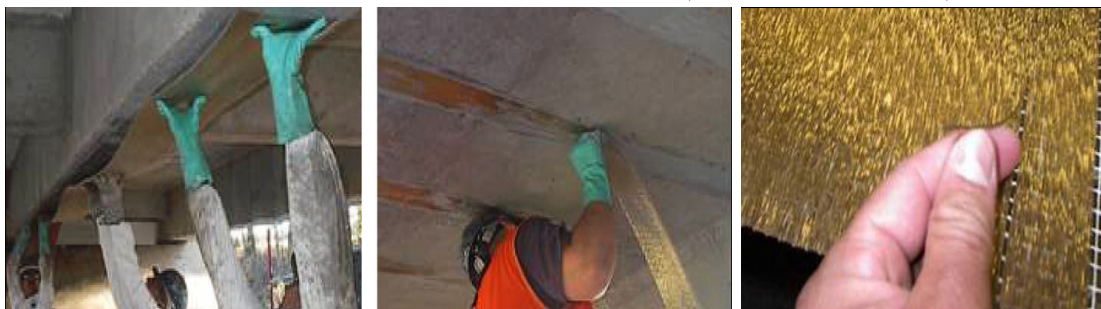




شکل ۷- نمونه ای از دال مسلح کامپوزیت با میلگرد های FRP

۴-۳- مقاوم سازی با ورقهای مسلح به پلیمر SRP

این تکنیک شامل سیم های شکل داده شده فولادی با مقاومت بالای مشبک محاط شده در رزین های پلیمری میباشد. سیستم SRP پراحتی قابل نصب است و نصب آن شایهت بسیاری بروش های مقاوم سازی سنتی فیبر های مسلح با پلیمر FRP میباشد. بعلت مستحکم بودن ، عدم چسبندگی ، اجرا سریع و دوام بالا از این کامپوزیت استفاده میشود. یک اشکال کامپوزیت CFRP مربوط به هزینه آنهاست که انگیزه گسترش سیستم های کامپوزیتی دیگر با استحکام برابر و هزینه کمتر را شکل میدهد [۱۱]



شکل ۸- نصب کامپوزیت های SPR برای مقاوم سازی تیر پل ها

نتیجه گیری:

بعضی مواقع استفاده از بتن و فولاد و مواد کامپوزیتی جهت تقویت اعضاء بروش سنتی جوابگوی نیروی زلزله نیست و یا هزینه زیادی می طلبند و یا به سبب موقعیت خاص پل قابل اجرا نیستند، در اینصورت استفاده از جداگرها ، میراگرها ، سیستم های یکپارچه ، کنترل فعال و مواد هوشمند میتواند گزینه های بعدی باشند. برای مقاوم سازی پل ها روش های سنتی زیادی از جمله استفاده از غلاف فولادی برای ستون، استفاده از بادبند ۸ ، استفاده از کوله یکپارچه و سایر روش ها متداول بوده اما در روش های جدید با بکارگیری سیستم های جداساز لرزه ای و سیستم های غیر فعال اتلاف انرژی پل مورد مورد نظر را بهسازی مینمایند.

استفاده از سیستم های جداساز و تلف کننده انرژی در پلها باعث تمرکز خسارت ناشی از زلزله در محل سیستمهای تکیه گاهی میشود و پایه ها و کوله ها در مقابل خسارات سازه ای محافظت میشوند.

منابع و مراجع

۱- R.S.Aboutaha.,M.D.Engelhardt.,J.O.Jirsa.and M.E.Kreger-“Rehabilitation Of Shear Critical Concrete Columns By Use of Rectangular Steel Jackets”ACI Structreual Journal, V.۹۶،۱۹۹۹

۲- دکتر شایانفر-“بررسی خرابی های ایجاد شده در پلها در زلزله های اخیر”



^۳ - مهندس پژمان دلاوری - "بررسی اثر سختی و مقاومت تسلیم جداساز بر پاسخ لرزه ای پل ها"

^۴ - دکتر خسروبرگی و مهندس زهرا تورنگک - "بهسازی لرزه ای پلها با استفاده از غلافهای فولادی"

^۵ - نشریه شماره ۳۹۰ - "دستور العمل بهسازی لرزه ای سازه ها"

^۶ - دکتر شروین ملکی - "روش های نوین در مقاوم سازی پلها"

^۷ - مقاوم سازی سازه های بتنی با استفاده از FRP تالیف دکتر فریبرز ناطق الهی - شهرام ملکی

[^] - P.Chang Huang, Yaau T.Hse, Antonio Nanni - "ASSESSMENT AND PROPOSED STRUCTURAL REPAIR STRATEGIES FOR BRIDGE PIERS IN TAIWAN DAMAGED BY THE JI-JI EARTHQUAKE"

[^] - J.G.Teng, J.F.Chen, L.Lam - "FRP Strengthened RC Structures"

[^] - T.E.Ringelstetter, Lawrence.C Bank, Fabio Matta, Antonio Nanni - "Development of a Cost-Effective

Structural FRP Stay-In-Place Formwork System for Accelerated and Durable Bridge Deck Construction"

[^] - A.Lopez, N.Galati, T.Alkhardaji, Antonio Nanni - "Strengthening of a reinforced concrete bridge with externally bonded steel reinforced polymer (SRP)"