



بهسازی لرزه ای پلها از طریق اصلاح پاسخ سازه پل توسط مهاربندهای تسلیم شونده بدون کمانش

پدرام محمودی، حسن حاجی کاظمی، عباس خواجه کرم الدین
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه فردوسی مشهد
استاد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران

pedramm Mahmoodi@yahoo.com

hkazemi@um.ac.ir

akaramodin@yahoo.com

خلاصه

با توجه به وقوع زلزله‌های عمده اخیر، مشاهده شده است که اغلب پل های فلزی بر روی پایه هایی ساخته شده‌اند که از لحاظ لرزه ای آسیب پذیر بوده و فاقد شکل پذیری لازم می باشد. یکی از تکنیک‌هایی که اخیراً در بهسازی لرزه‌ای پل ها از آن استفاده شده است، اصلاح پاسخ سازه پل توسط دیافراگم‌های انتهایی شکل پذیر می باشد که در روسازه پل نصب می شود. هدف از استفاده این دیافراگم ها محافظت از زیر سازه پل می باشد بطوری که قبل از رسیدن زیر سازه به مقاومت نهایی خود، دیافراگم بتواند به حد تسلیم برسد و برش عرضی منتقل شده از روسازه به زیر سازه محدود شود. دیافراگمی که در این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت، مهاربند تسلیم شونده بدون کمانش می‌باشد. این نوع مهاربند می تواند در برابر هر نوع مدکمانشی مقاومت کند و به حد جاری شدن برسد. طبق نتایج آزمایشگاهی، این نوع مهاربند توانایی جذب انرژی بالایی داشته و می تواند خسارات وارده ناشی از بارهای لرزه ای به سازه پل را کاهش دهد. در این مقاله با مدلسازی مهاربند تسلیم شونده بدون کمانش در نرم افزار Sap2000 Nonlinear و بکارگیری آن در مدل پلی نمونه، رفتار لرزه ای سازه پل مورد نظر بررسی خواهد شد. در این بررسی به تحلیل مدل پل مذکور که در آن از دیافراگمی معمولی استفاده شده است، پرداخته می‌شود و در انتها نتایج حاصل از این دو مدل مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده از مقایسه این دو مدل پل بیانگر عملکرد مطلوب سیستم مهاربند تسلیم شونده بدون کمانش در اصلاح پاسخ سازه پل می‌باشد.

کلمات کلیدی: بهسازی، پل، دیافراگم، شکل پذیری

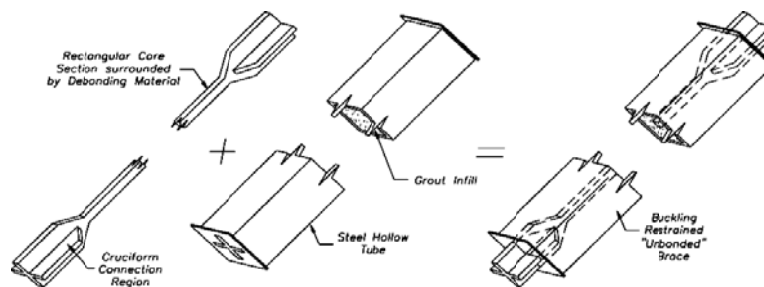
۱. مقدمه

با توجه به وقوع زلزله‌های عمده اخیر، مشاهده شده است که اغلب پل های فلزی بر روی پایه هایی ساخته شده‌اند که از لحاظ لرزه ای آسیب پذیر بوده و فاقد شکل پذیری لازم می باشند [1]. یکی از تکنیک‌هایی که اخیراً در بهسازی لرزه‌ای پل ها از آن استفاده شده است، اصلاح پاسخ سازه پل توسط دیافراگم‌های انتهایی شکل پذیر می باشد که در روسازه پل نصب می شود. در این مقاله، سیستمی که قرار است در دیافراگم انتهایی روسازه پل مورد بررسی قرار بگیرد، استفاده از مهاربندهای تسلیم شونده بدون کمانش می‌باشد.

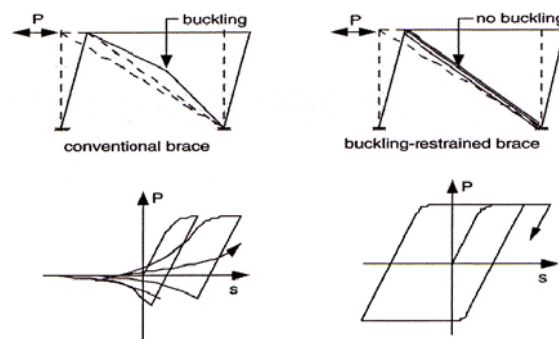
ایده مهاربندهای بدون کمانش اولین بار در ۳۵ سال پیش مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. Yashino در سال ۱۹۷۱ صفحات فولادی مسطحی در پانل های بتن مسلح مورد آزمایش قرار داد، این سیستم در واقع دیواری برشی بود که در داخل آن از مهاربند استفاده شده بود با این تفاوت که فاصله ای میان صفحات فولادی و بتن دیوار برشی تعبیه شده بود. Yashino به این نتیجه رسید که این سیستم استهلاک انرژی بسیار بالاتری نسبت به حالتی دارد که این فاصله بین صفحه فولادی و بتن دیوار برشی وجود نداشته باشد [2]. Wakabayashi در سال ۱۹۷۳ با انجام آزمایشاتی بر روی این صفحات فولادی نشان داد که به منظور بالابردن استهلاک انرژی بایستی مابین صفحات فولادی و بتن دیواربرشی از ماده ای غیر چسبنده و لزج (debonding material) استفاده کرد [3]. اولین آزمایش بر روی مهاربندهای فولادی محصور شده در ژاکت فولادی در سال ۱۹۷۶ توسط Kimura به انجام رسید. در این آزمایش، مهاربند فولادی در داخل ژاکت فولادی قرار گرفت به صورتی که حدفاصل مهاربند و ژاکت توسط ملاتی

مخصوص پر شده بود. در این آزمایش از هیچ گونه ماده لرزی استفاده نشده بود. سرانجام توسط تیمی تحقیقاتی در ژاپن (Watanabe و همکاران) موضوع مواد غیر چسبنده و لرز بصورت موثرتری مورد بررسی قرار گرفت [4]. در یک کار تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۴ توسط Carden به انجام رسید، عملکرد دیافراگم انتهایی یک پل که مدل آن بصورت پلی با دهانه ساده و روسازه فولادی می باشد، توسط آزمایش میز لرزان به انجام رسید. در این بررسی دو نوع دیافراگم انتهایی پل مورد بررسی قرار گرفت [1]. در دیافراگم اول از مهاربندی ضربدری تک نبشی و در دیگری از مهاربندهای بدون کمانش استفاده شده بود. در هر دوی این سیستم ها، عملکرد شکل پذیری بهتری را نسبت به سایر دیافراگم ها از خود نشان دادند، بطوریکه تغییر مکان نسبی جانبی دو انتهای مقطع شایسته‌ها، مقادیر بیشتری داشتند. در صورتی که اجازه تغییر مکان نسبی جانبی قابل قبولی به شایسته‌ها داده شود، می توان نیروهای لرزه ای وارده به پل را با طولانی تر کردن دوره تناوب آن، کاهش داد. در این بررسی، با مشاهده حلقه های هیسترسیس مهاربندهای ضربدری مشخص شد که در این حلقه ها پدیده باریک شدگی (pinching) رخ داد که علت آن کاهش سختی و مقاومت عضو تک نبشی مهاربند بعد از وقوع کمانش می باشد. هر چند که مهاربندهای بدون کمانش نتایج بهتری نسبت به مهاربندهای ضربدری بعلت استهلاک بیشتر انرژی، از خود نشان دادند [5].

با بررسی تاریخچه تحقیقات مربوط به مهاربندهای تسلیم شونده بدون کمانش، نیاز به این نوع مهاربند زمانی بوجود آمد که بتوان مقاومت فشاری عضو مهاربندی را افزایش داد، بدون اینکه مقاومت کششی عضو تحت تاثیر قرار گیرد و در نهایت پاسخ هیسترسیس مقارنی را در رفتار این عضو مهاربندی مشاهده کرد. این نوع مهاربند متشکل از یک هسته فولادی قابل تسلیم می باشد که در داخل محفظه ای فولادی که از بتن مخصوصی پر شده، قرار گرفته است. این مهاربند می تواند در برابر هر نوع مد کمانشی مقاومت کند و به حد جاری شدن برسد. در این مهاربند، هسته فولادی نیروی محوری وارده را تحمل می کند و محفظه خارجی توسط بتن پرکننده، تکیه گاه های جانبی را برای هسته فولادی تامین می نماید تا از کمانش آن جلوگیری شود. سطوح هسته فولادی مهاربند توسط لایه نازکی از یک ماده لرز آغشته می شود، تا اینکه از انتقال برش از بتن به هسته فولادی در حین تغییر شکل های هسته فولادی جلوگیری گردد و نیز این امکان را فراهم آورد تا زمانی که عضو تحت اثر فشار قرار گیرد، تغییر شکل های شعاعی ایجاد شده ناشی از اثر پواسون را در خود جای دهد. شرایط موجود، هسته فولادی را قادر می سازد تا در درون محفظه ای که از بتن پر شده است، بتواند آزادانه تغییر شکل های محوری را بدهد [5].



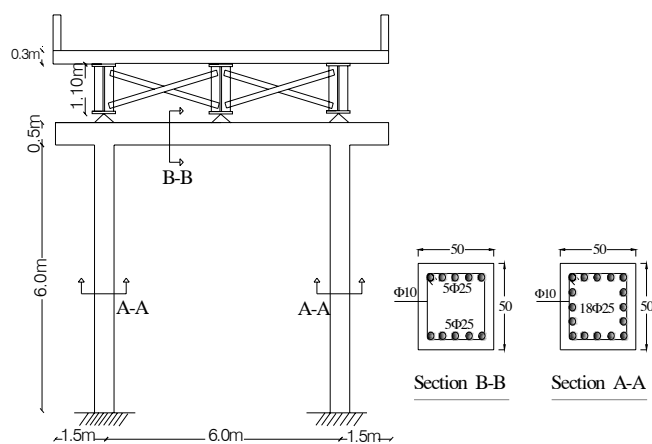
شکل ۱- مهاربند تسلیم شونده بدون کمانش [5]



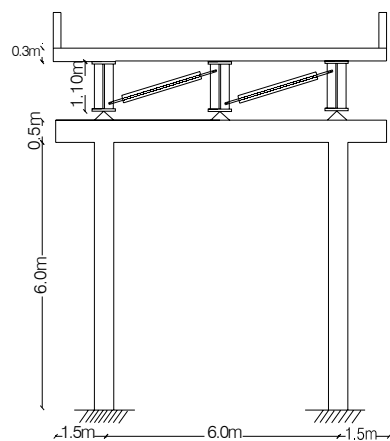
شکل ۲- مقایسه رفتار هیسترسیس مهاربند تسلیم شونده بدون کمانش و مهاربند معمولی

۲. بیان مسئله

در این مقاله به بررسی اثر مهاربندهای بدون کمانش در اصلاح پاسخ پل در جهت عرضی آن پرداخته می شود. بدین منظور مدل پلی نمونه انتخاب شد، تا اثر این نوع مهاربند بر روی رفتار آن بررسی شود. سازه پل شامل دو پایه دو ستونه بتن آرمه می باشد که ابعاد ستون و تیر سرستون آن شامل مقاطع $50 \times 50 \text{ cm}$ می باشد، و در شکل ۳ نشان داده شده است. قسمت روسازه پل شامل سه عدد شایهتیر فولادی است که در محل پایه پل ها توسط مهاربندهای ضربدیری تشکیل دیاگرام انتهایی پل را داده و توسط تکیه گاه مفصلی بر روی تیر سرستون پایه نشسته اند. مقطع بکار رفته برای مهاربندهای دیاگرام، مقاطع دوپل ناودانی (2UPA320) می باشد. ابتدا سازه مذکور توسط روش تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار می گیرد، سپس با جایگزینی مهاربندهای معمولی ضربدیری توسط مهاربندهای بدون کمانش، سازه پایه پل مجدد مورد تحلیل قرار می گیرد. در انتها نتایج حاصل از این دو تحلیل با یکدیگر مورد مقایسه قرار خواهند گرفت. مهاربندهای بدون کمانش در کشش و فشار رفتار یکسانی را از خود نشان می دهند، به همین دلیل می توان در هر دهانه دیاگرام انتهایی پل از یک عضو تک قطری استفاده کرد. در شکل ۴ جایگزینی مهاربندهای معمولی ضربدیری توسط مهاربندهای بدون کمانش نشان داده شده است.



شکل ۳- مشخصات هندسه و ابعاد مقاطع پایه پل



شکل ۴- بهسازی پل توسط مهاربندهای تسلیم شونده بدون کمانش



۳. تحلیل غیرخطی سازه پل

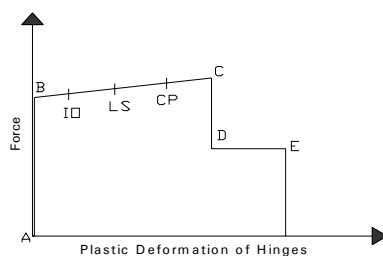
به منظور انجام تحلیل غیرخطی در نرم افزار Sap می توان به تعداد دلخواه مفاصل پلاستیک در طول دهانه خالص المان های قاب تعریف کرد. هر مفصل غیر خطی بیانگر احتمال وجود رفتار غیرخطی (رسیدن به حد تسلیم و ...) در یک نقطه خاص برای یک یا چند درجه آزادی خاص می باشد. مفاصل غیرخطی مستقلی برای لنگرهای خمشی، پیچشی، نیروهای محوری و برشی می توان تعریف کرد. همچنین امکان معرفی مفاصل غیرخطی مرکب برای لنگرهای خمشی و نیروهای محوری نیز مهیا می باشد. این نوع مفاصل قابلیت در نظر گرفتن اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی را دارا می باشد. برای هر درجه آزادی دارای رفتار غیرخطی بایستی منحنی نیرو- تغییر مکان (لنگر- انحناء) که بیانگر مقادیر نیرو و تغییر مکان متناظر با تسلیم مقطع و همچنین مقادیر تسلیم می باشد، معرفی گردد. معرفی این منحنی با مشخص کردن مختصات منحنی در پنج نقطه A، B، C، D، E که در شکل ۵ نشان داده شده اند، صورت پذیرد [6]. برای معرفی رفتار نیرو- تغییر مکان مفاصل از معیارهای ATC-40 استفاده شده است [7]، بدین صورت که:

نقطه B متناظر با نقطه تسلیم مقطع می باشد، بطوریکه میلگردهای طولی کششی مقطع جاری می شوند.

نقطه C بیانگر حداکثر ظرفیت مقطع می باشد. در این مرحله اثر سخت شدگی میلگردهای مقطع در نظر گرفته شده است.

نقطه D نشان دهنده وضعیت و مقاومت پسماند عضو می باشد.

نقطه E بیانگر گسیختگی مقطع می باشد.



شکل ۵- معرفی رفتار نیرو- تغییر مکان (لنگر- انحناء) مفاصل غیرخطی

علاوه بر موارد فوق می توان مقدار تغییر شکل های متناظر با معیارهای کیفی وضعیت سازه مانند IO (امنیت مکانی)، LS (امنیت جانی) و CP (جلوگیری از انهدام) را نیز معرفی کرد. این معیارهای کیفی تاثیری بر رفتار سازه در عملیات تحلیل ندارند و فقط در ارائه اطلاعات خروجی تحلیل و در طراحی عملکرد سازه بکار می رود [6].

۴. بارگذاری سازه پل

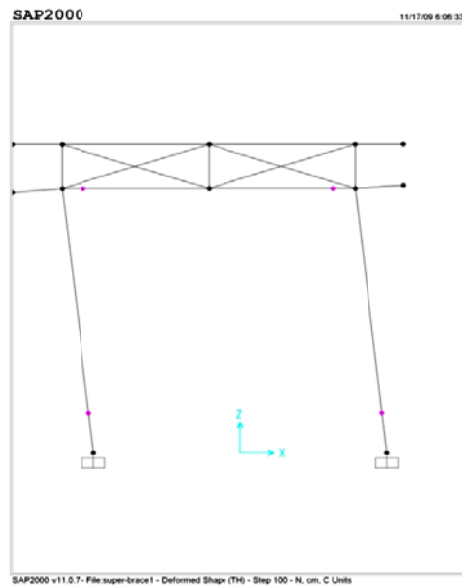
بارگذاری ثقلی پل که شامل بارهای مرده و زنده پل می باشد. بارهای مرده آن با توجه به دتایل های رایج پل سازی و بارهای زنده آن که شامل بارهای متحرک بر روی سازه پل می باشد، توسط یافتن بحرانی ترین حالت بارهای متحرک مشخص می شود. برای اعمال بارگذاری لرزه ای پل، از شتاب نگاشت زلزله ال سنترو که در اکثر کارهای پژوهشی بعنوان زلزله مرجع بکار می رود، استفاده می شود. بدین منظور سازه پایه پل را در جهت عرضی آن تحت اثر شتاب پایه زلزله ال سنترو با ضریب مقیاس های متفاوتی از آن مورد بررسی قرار می دهیم.

۵. ارزیابی لرزه ای سازه پل قبل از انجام بهسازی

ابتدا تحلیل سازه پل توسط ضریب مقیاس های متفاوتی از این زلزله انجام می پذیرد. سپس رفتار سازه پل با توجه به مفاصل معرفی شده برای سازه مذکور مورد بررسی قرار می گیرد. برای انجام تحلیل سازه پل از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. تحلیل تاریخیچه زمانی یک نوع تحلیل گام به گام برای برآورد پاسخ دینامیکی سازه تحت یک بارگذاری خاص می باشد که ممکن است متغیر با زمان باشد [8].



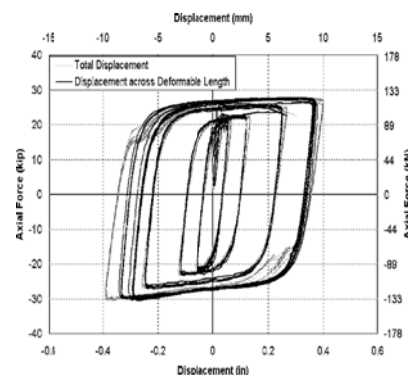
با انجام تحلیل های غیرخطی تاریخچه زمانی مشخص شد که سازه پل تا زلزله ای برابر با 0.85 Elcentro می تواند بصورت الاستیک رفتار نماید، بدین معنا که با این مقدار شتاب پایه هیچ کدام از مفاصل معرفی شده برای سازه به حد تسلیم نمی رسند. همچنین معلوم شد که با زلزله ای برابر با 1.40 Elcentro، مفاصل انتهایی تیر سرستون پایه و همچنین انتهای ستون ها به حد گسیختگی رسیده است، در نتیجه سازه پل فرو می ریزد.



شکل ۶- نمایش رفتار مفاصل معرفی شده در سازه تحت اثر زلزله 1.0 Elcentro

۶. مدل سازی مهاربند تسلیم شونده بدون کماتش

همانطور که پیشتر مطرح شد، بعلت اینکه از عمل کماتش در این نوع از مهاربندها جلوگیری شده است، در نتیجه رفتار یکسانی در کشش و فشار خواهد داشت. طبق نتایج آزمایشگاهی این مهاربند در صورتی در معرض بارهای سیکلیک قرار می گیرد، رفتار هیستریسیس متقارنی را از خود نشان می دهد. (شکل ۷).



شکل ۷- رفتار هیستریسیس متقارن مهاربند بدون کماتش تحت اثر بارهای سیکلیک آزمایشگاهی [5]



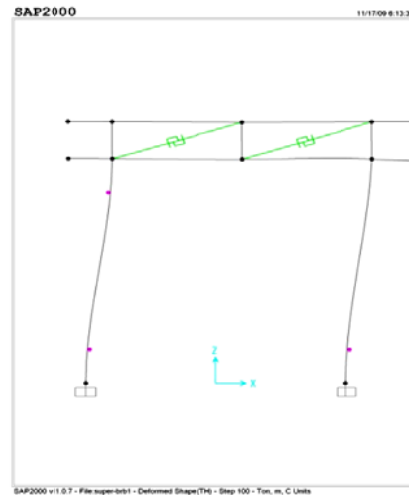
به منظور مدل کردن این نوع مهاربند در نرم افزار Sap2000 بایستی از المان Link استفاده نمود و از میان رفتارهای متفاوتی که برای این نوع المان تعریف شده است، المان plastic(wen) رفتاری متناسب و هماهنگ با مهاربند بدون کمناش دارد. برای معرفی مشخصات این مهاربند داشتن سه پارامتر مورد نیاز می باشد [6].

- ۱- سختی اولیه
- ۲- نیروی تسلیم
- ۳- نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه

برای معین کردن سختی اولیه از رابطه سختی محوری $K=EA/L$ استفاده می شود، چرا که سختی حاکم بر رفتار مهاربندها از نوع محوری می باشد. A سطح مقطع هسته فولادی مهاربند، E و L بترتیب مدول الاستیسیته و طول هسته فولادی مهاربند می باشد. نیروی تسلیم مهاربند نیز از حاصلضرب سطح مقطع در تنش تسلیم هسته فولادی قابل محاسبه می باشد. نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه هسته فولادی مطابق مطالعات آزمایشگاهی انجام شده، مقداری بین 0.02-0.05 می باشد [9] که در این مقاله از مقدار 0.03 استفاده شده است.

۷. ارزیابی لرزه ای سازه پل بهسازی شده

ابتدا بایستی از کوچکترین سطح مقطع ممکن برای هسته فولادی آنالیز مدل را انجام داده و با بیشتر کردن سطح مقطع به رفتار مطلوب سازه دست یافت. در این مقاله رفتار مطلوب این طور مطرح می شود که سازه بتواند تا زلزله 1.70.Elcentro بصورت الاستیک رفتار نماید یعنی در زلزله ای با شدت بیشتر از حالتی که سازه پل با دیافراگم معمولی فرو می ریزد. البته محدودیتی در خصوص تغییر مکان نسبی روسازه پل (اختلاف تغییر مکان جانبی عرشه نسبت به تیر سرستون پایه پل) بایستی در نظر گرفت که مقدار حداکثر آن در این مقاله به 5cm محدود می شود. با توجه به مواردی که ذکر شد مشخص شد که برای رسیدن به این وضعیت، می توان با سطح مقطعی به مساحت حدود 7.0 cm^2 به جواب رسید. این سطح مقطع را می توان معادل با پلیتی به ابعاد $7.0 \times 1.0 \text{ cm}$ یا $4.5 \times 1.5 \text{ cm}$ و ... در نظر گرفت. با توجه شرایط حاضر، سازه تحت اثر ضرایب بالاتری از زلزله ال سنترو قرار می گیرد تا سرانجام در زلزله 2.20 Elcentro مشاهده می شود که برخی از مفاصل تعریف شده برای سازه پل به حد گسیختگی می رسند و سازه پل در آستانه فرو ریختن قرار می گیرد (شکل ۸).



شکل ۸- نمایش رفتار مفاصل معرفی شده در سازه تحت اثر زلزله 2.0 Elcentro



۸. ارزیابی و مقایسه نتایج تحلیل لرزه ای دو مدل پل

در این مرحله به ارزیابی دو مدل پل تحت اثر زلزله هایی با مقادیر 0.5 EL، 1.0 EL، 1.5 EL، 2.0 EL پرداخته می شود و پارامترهایی از قبیل تشکیل نوع مفصل، برش پایه و تغییر مکان جانبی تراز تیر سرستون پایه این دو مدل پل با یکدیگر مورد مقایسه قرار می گیرند و نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده بر روی دو مدل پل در جداول ۱ تا ۴ تهیه و تنظیم شده است. منظور از برش پایه، برش عرضی منتقل شده از روسازه پل به قسمت زیرسازه پل می باشد که ناشی از بارهای وارده جانبی می باشد. در این مقاله بررسی می شود که نوع دیافراگم روسازه پل چه اثری بر روی برش منتقل شده از روسازه پل به زیرسازه آن دارد. بدیهی است در صورتی که هر چه برش پایه سازه پل را بیشتر بتوان کاهش داد، احتمال آسیب اعضای زیر سازه پل کاهش می یابد. حال در بررسی تشکیل مفاصل در دو مدل پل برای زلزله 0.5 EL، هیچ کدام از مفاصل معرفی شده به حد جاری شدن نمی رسند و سازه پل در هر دو حالت در محدوده الاستیک رفتار می کند. در زلزله 1.0 EL سازه پل در حالت بهسازی شده تشکیل مفصل نمی دهد، ولی در صورت عدم بهسازی پل هم در تیرسرستون پایه و همچنین در ستون پل، مفاصل نوع B ایجاد می شود. در زلزله با شدت 1.5 EL مشاهده می شود که مفاصل ایجاد شده در پایه پل بهسازی نشده از نوع E بوده، یعنی اینکه در این مرحله مقطع مورد نظر به مرحله گسیختگی رسیده است. در ستونهای بعدی جداول ذکر شده، اندازه برش پایه سازه پل و نیز تغییر مکان جانبی تیرسرستون پایه آورده شده است که می توان کاهش مقادیر برش پایه و نیز تغییر مکان مذکور در بعد از عمل بهسازی پل مشاهده کرد. همانطور که در جداول مشاهده می شود، برش پایه پل بهسازی شده در زلزله 0.5 EL به مقدار 17.7 ton کاهش پیدا کرده است و تغییر مکان جانبی تراز تیر سرستون پایه از 2.8 cm در حالت بهسازی نشده به مقدار 1.5 cm کاهش پیدا کرده است. در زلزله 1.0 EL برش پایه پل به 26.6 ton می رسد، در حالی که در وضعیت بهسازی نشده مقدار برش پایه 38.1 ton می باشد. در این مقیاس از زلزله ال سترو تغییر مکان جانبی برای وضعیت بهسازی شده 2.3 cm و برای حالت بهسازی نشده 5.8 cm می باشد. همانطور که مطرح شد، سازه پل بهسازی نشده در زلزله 1.5 EL فرو می ریزد و این در حالی است که برش پایه و تغییر مکان جانبی سازه پل بهسازی شده برترتیب برابر با 31.1 ton و 2.7 cm می باشند.

جدول ۱- پارامترهای محاسبه شده برای زلزله 0.5 EL

مدل پل	تشکیل نوع مفصل در تیر	تشکیل نوع مفصل در ستون	برش پایه	تغییر مکان جانبی تیرسرستون
پل بهسازی شده	تشکیل نمی شود	تشکیل نمی شود	17.7 ton	1.5 cm
پل بهسازی نشده	تشکیل نمی شود	تشکیل نمی شود	21.8 ton	2.8 cm

جدول ۲- پارامترهای محاسبه شده برای زلزله 1.0 EL

مدل پل	تشکیل نوع مفصل در تیر	تشکیل نوع مفصل در ستون	برش پایه	تغییر مکان جانبی تیرسرستون
پل بهسازی شده	تشکیل نمی شود	تشکیل نمی شود	26.6 ton	2.3 cm
پل بهسازی نشده	B	B	38.1 ton	5.8 cm

جدول ۳- پارامترهای محاسبه شده برای زلزله 1.5 EL

مدل پل	تشکیل نوع مفصل در تیر	تشکیل نوع مفصل در ستون	برش پایه	تغییر مکان جانبی تیرسرستون
پل بهسازی شده	تشکیل نمی شود	تشکیل نمی شود	31.1 ton	2.7 cm
پل بهسازی نشده	سازه فرو می ریزد (E)	سازه فرو می ریزد (E)	---	---

جدول ۴- پارامترهای محاسبه شده برای زلزله 2.0 EL

مدل پل	تشکیل نوع مفصل در تیر	تشکیل نوع مفصل در ستون	برش پایه	تغییر مکان جانبی تیرسرستون
پل بهسازی شده	تشکیل نمی شود	B	36.6 ton	3.2 cm
پل بهسازی نشده	سازه فرو می ریزد (E)	سازه فرو می ریزد (E)	---	---



۹. نتیجه گیری

در این مقاله، به ارائه روشی جهت بهسازی لرزه ای پلها پرداخته شد. در این روش از طریق جایگزین کردن مهاربندهای معمولی موجود در دیافراگم انتهایی پلها با مهاربندهای تسلیم شونده بدون کمانش، سعی در اصلاح پاسخ سازه پل در جهت عرضی پل شد. در این بررسی که به ارزیابی سازه پایه پل در قبل و بعد از عمل بهسازی پرداخته شد، فرضیات و اصول اولیه کار مدلسازی این نوع مهاربند بر اساس نتایج مستند آزمایشگاهی استوار می باشد. قبل از شروع مدلسازی مهاربند بدون کمانش و عمل بهسازی، سازه پل بهسازی نشده، با انجام تحلیل های دینامیکی غیرخطی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. از نتایج تحلیل این طور مشخص می شود که در زلزله با شدت 0.85 EL، مفاصل معرفی شده برای زیرسازه پل به مرحله جاری شدن می رسند. در صورتی که برای حالتی که سازه پل بهسازی شده است، مرحله جاری شدن این مفاصل در زلزله ای با شدت 1.70 EL اتفاق می افتند. حال انجام آنالیزها را تا آنجایی ادامه می دهیم که مفاصل معرفی شده به سازه به مرحله گسیختگی برسند. برای سازه پل در قبل از عمل بهسازی، رسیدن به وضعیت گسیختگی مقطع در زلزله با شدت 1.40 EL رخ می دهد، در حالی که در سازه پل بهسازی شده این حالت در زلزله با شدت 2.20 EL به وقوع می پیوندد. زمانی که مفاصل معرفی شده به سازه پل به مرحله گسیختگی برسند، سازه پل بتدریج ناپایدار شده و فرومی ریزد. برای ارزیابی کمی و کیفی سازه پل قبل و بعد از بهسازی پل، دو مدل پل تحت زلزله های 0.5 EL، 1.0 EL، 1.5 EL و 2.0 EL قرار گرفتند. با توجه به نتایج آنالیزهای انجام شده می توان به این نتیجه رسید که مقدار برش عرضی منتقل شده از روسازه به زیر سازه در زلزله با شدت 1.0 EL نسبت به حالت بهسازی شده، حدود 30% کاهش داشته است و نیز میزان تغییر مکان جانبی تراز تیر سرستون پایه، در این بهسازی به میزان حدود 60% کاهش یافته است. بهبود قابل توجه شاخص های ذکر شده حاکی از مکانیزم استهلاک انرژی بسیار مطلوب و توانایی بسیار بالای سیستم مهاربند تسلیم شونده بدون کمانش در اصلاح پاسخ سازه پل می باشد.

۱۰. مراجع

1. Carden, L.P., Itani A, Buckle I, Aiken I. (2004). Buckling restrained braces for ductile end cross frames in steel plate girder bridges. In: 13th world conference on earthquake engineering. Paper no. 503.
2. Yoshino, T., and Y. Karino. (1971). "Experimental study on shear wall with braces: Part 2." Summaries of technical papers of annual meetings, vol. 11, Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, (in Japanese).
3. Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Yogoyama, H., and T. Morisono. (1973). "Experimental Study on the Elasto-Plastic Behavior of Braces Enclosed by Precast Concrete Panels Under Horizontal Cyclic Loading – Parts 1 & 2." Summaries of technical papers of annual meeting, Vol. 10, Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, pp 1041-1044 [in Japanese].
4. Watanabe A., Hitomi Y., Saeki E., Wada A., Fujimoto M. (1988). Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. In: Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering, vol. IV. 1988, pp. 719-24.
5. Carden, L. P., Itani, A. M., and Buckle, I. G. (2006). "Seismic performance of Steel Girder Bridges with ductile cross frames using buckling restrained braces," J. Struct. Eng., 132_3_, 338-345.
6. باجی، ح. و هاشمی، ج. (۱۳۸۶)، "برنامه عمومی تحلیل و طراحی سازه ها، مرجع جامع نرم افزار SAP2000."
7. Applied Technology Council, ATC-40. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Vols. 1 and 2, California, 1996.
8. باجی، ح. و هاشمی، ج. (۱۳۸۲)، "تکنیک های مدلسازی، تحلیل و طراحی کامپیوتری سازه ها"، دانشگاه هرمزگان.
9. Black C, Makris N, Aiken L. (2002). Component testing, stability analysis characterization of buckling-restrained unbonded braces. Pacific Earthquake Engineering Research Center report PEER 2002/08.