

Seismic evaluation of the concrete bridge piers reinforced with the combination of SMA rebar and FRP sheet under near field earthquakes

Reza Babaei¹, Fereshteh Emami^{2*}, Mohammad Reza Mansoori³

1- Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

During an earthquake, Bridges are very important as a lifeline in providing aid and relief. In many existing bridges, many non-linear design criteria were not considered or were not available in the bridge design codes at that time. Because with Pier damage, the entire bridge structure is damaged, Strengthening the Pier of existing bridges using new methods such as fiber reinforcement polymer (FRP) sheets and shape memory alloy (SMA) bars is very important. In this study, three-column piers of bridge were investigated at three heights of 7.5, 10 and 15 meters. The piers were analyzed by incremental dynamic analysis (IDA). The utilized earthquake ground motions were 14 pulsed near field records of FEMA-P695 code. These acceleration records were applied once as a combination of horizontal components and another time as a combination of horizontal components along with the vertical component on the bridge pier. The investigated specimens included 12 reinforcement specimens with CFRP sheets and SMA bars with two diameters of 12 and 16 mm. Finally, 5 seismic parameters were evaluated, including spectral acceleration of the first period, ductility, Fragility curve, Maximum displacement, Residual displacement. The results show that the seismic performance has improved by using of 3 layers of CFRP sheets and SMA rebar with a diameter of 16 mm at 5 seismic parameters in both short and long pier. As an example, the ductility index in the pier with a height of 7.5 meters has improved by 25.5% compared to the unreinforced state, and the residual displacement index of the above of the pier in the pier with a height of 7.5 meters has improved by 561.5% compared to the unreinforced state

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 June 2024

Revise Date: 02 November 2024

Accept Date: 17 November 2024

Keywords:

Pier retrofit
IDA analysis
Residual displacement
Near Field
Fragility curve
Vertical component

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.462263.3436](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.462263.3436)

*Corresponding author: Fereshteh Emami.
Email address: f-emami@srbiau.ac.ir

ارزیابی لرزه‌های پایه پل‌های بتنی تقویت‌شده با ترکیب میلگرد SMA و ورق FRP تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

رضا بابائی^۱، فرشته امامی^{۲*}، محمدرضا منصوروی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه سازه و زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه سازه و زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

در هنگام زلزله، پل‌ها به عنوان شریان حیاتی در کمک‌رسانی و امداد، از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند. در بسیاری از پل‌ها، در زمان طراحی، بسیاری از ضوابط غیرخطی طراحی یا لحاظ نگردیده و یا در آئین‌نامه طراحی آن زمان، موجود نبوده است. از آنجائیکه با آسیب پایه، کل سازه پل آسیب می‌بیند، تقویت پایه پل‌های موجود با استفاده از شیوه‌های نوین مانند الیاف مسلح پلیمری (FRP) و میلگردهای حافظه دار شکلی (SMA) از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مطالعه، پایه پل سه ستونی در ۳ ارتفاع ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ متری مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل مورد استفاده، تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) بوده است. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده، ۱۴ رکورد حوزه نزدیک پالس‌دار FEMA-P695 می‌باشد. این شتاب‌نگاشت‌ها یک‌بار به صورت ترکیب مولفه‌های افقی و بار دیگر ترکیب مولفه‌های افقی به همراه مولفه قائم روی پایه پل اعمال گردید. نمونه‌های مورد بررسی شامل ۱۲ نمونه تقویت با ورق‌های الیاف مسلح پلیمری کربن (CFRP) و میلگردهای SMA با دو قطر ۱۲ و ۱۶ میلیمتر بوده است و در نهایت ۵ پارامتر لرزه‌ای، شامل شتاب طیفی پی‌ریود اول، شکل‌پذیری، منحنی شکنندگی، جابجایی ماکزیمم و جابجایی ماندگار نوک پایه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از ۳ لایه ورق CFRP و میلگرد SMA به قطر ۱۶ میلیمتر در ۵ پارامتر لرزه‌ای هم در پایه با ارتفاع کوتاه و هم در پایه با ارتفاع بلند باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای گردیده است. به‌عنوان نمونه، شاخص شکل‌پذیری در پایه با ارتفاع ۷/۵ متر به میزان ۲۵/۵٪ نسبت به حالت بدون تقویت بهبود یافته است و شاخص جابجایی ماندگار نوک پایه در پایه با ارتفاع ۷/۵ متر به میزان ۵۶۱/۵٪ نسبت به حالت بدون تقویت بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: تقویت پایه پل، تحلیل IDA، جابجایی ماندگار، حوزه نزدیک، منحنی شکنندگی، مولفه قائم

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2024.462263.3436	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۸/۲۷	۱۴۰۳/۰۸/۲۷	۱۴۰۳/۰۸/۱۲	۱۴۰۳/۰۳/۳۰
فرشته امامی f-emami@srbiau.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

پل‌ها به عنوان شریان حیاتی کشور محسوب می‌شوند و به عنوان سازه‌های استراتژیک لحاظ می‌گردند، تخریب و آسیب آن‌ها منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیر انسانی و مالی می‌گردد. عدم تخریب پل و خارج نشدن از بهره‌برداری پس از یک زمین‌لرزه شدید از بسیاری از تلفات جانی و اقتصادی پس از حادثه خواهد کاست. همچنین در بسیاری از مواقع هزینه جمع‌آوری یک پل آسیب دیده و ساخت یک پل جدید با هزینه‌های جانبی آن تا چندین برابر هزینه ساخت یک پل جدید، بار مالی به یک کشور تحمیل می‌کند. مثلاً در زلزله میچوآکن^۱ در مکزیک و زلزله نورثریج^۲ در آمریکا، بسیاری از سازه‌ها پس از وقوع زلزله به دلیل تغییر شکل‌های ماندگار زیاد بازسازی توجیه نداشته و بنابراین تخریب و دوباره احداث شدند [۱]. لذا بحث حفظ و مقاوم‌سازی سازه پل، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. سازه‌های بتنی مانند پل‌ها به دلایل مختلفی از جمله قرار گرفتن در شرایط نامناسب و تغییر آئین نام‌ها و... نیاز به تقویت دارند [۲]. با مطالعه رفتار سازه‌های بتنی مشخص می‌شود عوامل متعددی مانند: اشتباهات طراحی، عدم اجرای مناسب، از دوام آن‌ها می‌کاهد، ضمناً تغییر آئین نام‌های طراحی (باعث تغییر در بارگذاری و ضرایب اطمینان می‌شود) نیز سبب ارزیابی و بازنگری مجدد طرح و سازه پل می‌گردد تا در صورت لزوم، بهسازی و تقویت شود. خرابی‌های مشاهده شده در سازه پل‌ها طی زلزله‌های اخیر، نیاز مبرم به مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های موجود را نشان می‌دهد.

متأسفانه با وجود پیشرفت‌های فن‌آوری در مهندسی مواد در دنیا، هنوز سازه پل‌ها با گذشت زمان به دلایل مختلف از جمله شرایط محیطی نامناسب و ترافیک سنگین و حوادث طبیعی دچار آسیب‌های متعددی می‌گردند. این مسأله اهمیت استفاده از مصالح جدید در ساخت و نگهداری و بهسازی پل‌ها به منظور حفظ ایمنی استفاده‌کنندگان از پل و جلوگیری از هدر رفتن سرمایه‌های کشور را نمایان می‌سازد. پایه پل‌های سواره‌رو به عنوان عامل انتقال بار عرشه پل به فونداسیون از اهمیت بسزایی برخوردار است. این بارها شامل بارهای قائم، عمدتاً شامل بارهای ثقیلی (مرده و زنده) و بارهای جانبی، عمدتاً شامل بارهای زلزله و باد می‌شود.

مسأله حائز اهمیت در پایه پل‌ها، بهسازی پایه پل‌های موجود می‌باشد، روش‌های مختلفی برای انجام این بهسازی وجود دارد، مانند مرمت موضعی، استفاده از روکش بتنی، استفاده از روکش فولادی و غیره. به این شیوه‌ها روش‌های کلاسیک بهسازی گفته می‌شود. این روش‌ها ایراداتی مانند خوردگی، اجرای سخت، افزایش ابعاد و وزن سازه را دارند [۳]. یکی از روش‌های نوینی که در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسی قرار گرفته است، مقاوم‌سازی پایه پل‌های موجود با استفاده از صفحات مسلح پلیمری (FRP) می‌باشد. FRPها باعث محدود شدن انبساط عرضی ستون می‌گردد. این شیوه علاوه بر جلوگیری از کمناش آرماتورهای طولی ستون، با به تعویق انداختن جداشدگی پوسته بتنی، انهدام پایه را نیز به تاخیر می‌اندازد. FRPها به علت ویژگی‌های مطلوبشان مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی، تنش کششی بالا و وزن کم، به طور گسترده برای ترمیم سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴]. روش دیگر برای تقویت و مقاوم‌سازی پایه پل‌ها به خصوص در طول ناحیه مفصل پلاستیک، استفاده از میلگردهای حافظه‌دار شکلی (SMA) می‌باشد. SMAها گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که قادرند شکل اصلی خود را پس از تغییر شکل باز یابند. و این به خاطر خاصیت برگشت‌پذیری انتقال فاز بین فازهای مختلف این ماده می‌باشد. این آلیاژها دارای ویژگی‌هایی نظیر بازیابی کرنش‌های بزرگ با حداقل تغییر شکل ماندگار، مقاومت در برابر خوردگی بالا، ظرفیت جذب انرژی بالا و توانایی مطلوب در برابر خستگی می‌باشند [۵]. در زمینه استفاده از FRP و SMA از طرف محققین، مطالعات زیادی صورت پذیرفته است.

منتصر بالله^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۲ تأثیر میلگردهای SMA و FRP به صورت میلگردهای طولی در ناحیه مفصل پلاستیک و سایر نواحی پایه‌های بتنی مربعی را مورد بررسی تجربی و تحلیلی قرار دادند. نتایج نشان داد که پایه دارای مقاوم‌سازی ترکیبی (ترکیب SMA و FRP) علاوه بر مقاومت در برابر خوردگی، می‌توانند جابجایی‌های ماندگار ناشی از زلزله را به میزان قابل توجهی کاهش دهند و

¹ Michoacan

² Northridge

³ Muntasir Billah

ظرفیت اتلاف انرژی پایه را افزایش دهند [۶]. شریستا^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی عددی و آزمایشگاهی اعضا سازه‌ای تقویت شده با میلگرد SMA پرداختند. نتایج نشان داد که اعضا تقویت شده با میلگرد SMA نسبت به اعضا تقویت شده با فولاد معمولی، قابلیت بازیابی ۸۹٪ جابجایی‌های ایجاد شده را داشته است [۷]. امیدیان^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی رفتار سازه‌های بتنی که با آلیاژ SMA تقویت شده بودند پرداختند. سازه‌های مورد بررسی در حالت‌های منظم، نامنظمی زیاد و نامنظمی شدید پیچشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از میلگرد SMA در سازه‌های نامنظم، سبب کاهش اثرات مخرب نامنظمی از جمله تغییرمکان نسبی حداکثر و تغییرمکان نسبی ماندگار می‌شود [۸]. وانگ^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مطالعه تجربی بر روی عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتنی دایره‌ای با مقاومت بالا که با الیاف کربن مسلح پلیمری (CFRP) محصور شده‌اند، پرداختند. نتایج آزمایش نشان داد که روکش‌های CFRP در نواحی مستعد مفصل پلاستیک به‌طور قابل توجهی منجر به بهبود شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی حتی تحت تراکم محوری بالا می‌شود [۹]. منتصر بالله و همکاران در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی خطر لرزه‌ای احتمالی پایه‌های پل بتنی مسلح با انواع مختلف میلگردهای SMA پرداختند. برای دستیابی به این هدف، پایه‌های پل با رویکرد مبتنی بر عملکرد طراحی گردیدند و از تحلیل دینامیکی افزایشی استفاده گردید. در این تحقیق ماکزیمم جابجایی و جابجایی ماندگار به‌عنوان پارامترهای تقاضا در نظر گرفته شد. در این تحقیق مشخص گردید از نظر شاخص جابجایی ماندگار، میلگرد SMA با آلیاژ FeNCATB عملکرد بهتری داشته است [۱۰]. محمودآبادی^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی مقاومت سازه‌های ستون‌های بتنی مستطیلی با ابعاد مختلف با ورق‌های CFRP پرداختند. نتایج به‌دست آمده از تحلیل مدل‌های اجزای محدود نشان داد که شکل مقطع ستون بر ظرفیت باربری محوری اثری ندارد ولی بر ظرفیت باربری جانبی مؤثر می‌باشد. همچنین افزایش لایه‌های CFRP بر ظرفیت باربری جانبی ستون اثر زیادی داشته و مخصوصاً لایه دوم CFRP بسیار مؤثر بوده است. با افزایش نسبت طول به عرض مقطع در نمونه‌های مستطیلی، تأثیر تعداد لایه‌های CFRP بر ظرفیت باربری محوری، جانبی و انرژی جذب شده توسط ستون کاهش داشته است [۱۱]. میرعالمی^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تجربی و تحلیلی پایه بتنی دایره‌ای شکل در مقیاس یک چهارم که با ورق CFRP و میلگردهای SMA تقویت شده بود، پرداختند. در این تحقیق ۶ حالت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد، نمونه تقویت شده با میلگرد طولی SMA به قطر ۸ میلی‌متر و روکش CFRP با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بیشترین میزان شکل‌پذیری را داشته و نسبت به نمونه بدون تقویت به میزان ۲۴۰ درصد شکل‌پذیری بیشتری داشته است [۱۲]. زیانگ^۹ و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلگردهای جفت شده (کوپل) با فولاد و SMA را به عنوان تقویت‌کننده در پایه‌های پل پیشنهاد دادند. در این مطالعه، برای ارزیابی نقاط ضعف لرزه‌ای پل، پایه پل در حالت‌های میلگرد فولادی تنها، SMA تنها و ترکیب میلگرد فولادی و SMA تحت تحلیل شکست احتمالی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. طی این مطالعه مشخص گردید، آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل با قرار دادن میلگرد SMA در ناحیه مفصل پلاستیک پایه به وضوح کاهش می‌یابد [۱۳]. سالخورده^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۲۱ روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و جابجایی‌های ماندگار پایه‌های پل مطالعه مقایسه‌ای انجام دادند. در این مطالعه با شبیه‌سازی تحلیلی، ترکیبات سه حالت میلگردگذاری پایه پل شامل میلگرد با مقاومت معمولی، میلگرد با مقاومت بالا و میلگرد SMA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد میلگردگذاری ترکیبی شامل میلگرد معمولی با SMA نسبت به سایر ترکیبات عملکرد لرزه‌ای پل را از نظر میزان جابجایی، شکل‌پذیری و پتانسیل نشست در پایه‌ها بهبود بخشیده است [۱۴]. هیوکیوان^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی تجربی عملکرد لرزه‌ای پایه پل که با میلگرد SMA و بتن انعطاف‌پذیر (ECC^{۱۲}) تا ارتفاع مفصل پلاستیک تقویت شده بود پرداختند. نتایج آزمایش نشان داد که میلگرد SMA می‌تواند به‌طور قابل توجهی جابجایی ماندگار سازه را کاهش دهد. مواد ECC می‌تواند به‌طور مؤثر شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی سازه را بهبود ببخشد و سرعت ترک‌خوردگی را کاهش دهد [۱۵]. گلشن^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی اجزای محدود ستون بتنی که با میلگرد و ورق‌های FRP مقاوم‌سازی شده بود تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. در این پژوهش شاخص‌هایی مانند ظرفیت باربری و دوام لرزه‌ای، شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت.

⁴ Sharestha

⁵ Omidian

⁶ Wang

⁷ Mahmoodabadi

⁸ Miralam

⁹ Xiang

¹⁰ Salkhordeh

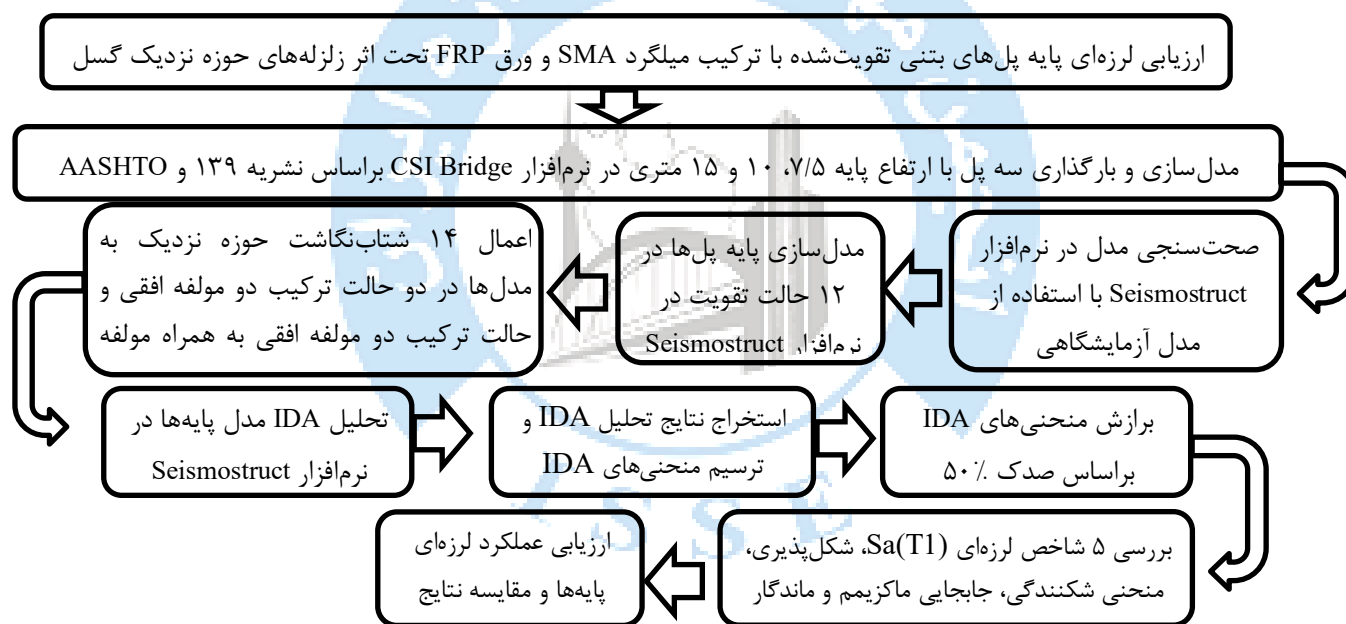
¹¹ Hui Qian

¹² Engineered Cementitious Composite

¹³ Golshan

نتایج نشان داد که بطور میانگین استفاده از میلگرد FRP به همراه ورق‌های FRP می‌تواند تا ۳۰٪ دوام لرزه‌ای ستون را افزایش دهد [۱۶]. واحدی^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی تجربی تاثیر میلگرد SMA در تقویت پایه پل پرداختند. در این تحقیق پایه پل در مقیاس یک سوم ابعاد واقعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از میلگرد SMA در پایه پل باعث کاهش میزان دررفت^{۱۵} ماندگار به میزان ۴۵٪ نسبت به نمونه بدون تقویت شده است [۱۷].

بسیاری از تحقیقات صورت پذیرفته روی تقویت لرزه‌ای پایه پل، درخصوص استفاده از روکش FRP بوده است و تحقیقات دیگر استفاده از میلگردهای SMA را در تقویت پایه پل مورد بررسی قرار داده اند و مطالعات کمی درخصوص استفاده از هر دو تقویت روکش FRP و میلگرد SMA انجام شده است. همچنین تحقیقات صورت پذیرفته عمدتاً متمرکز روی پایه‌های دایره‌ای شکل و مستطیل شکل بوده است و تحقیقات در خصوص پایه بیضی شکل که در ایران بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد بسیار کم بوده است، لذا در این مطالعه برای آنکه موضوع تقویت و مقاوم‌سازی پایه بتنی پل‌های سواره‌رو به‌طور دقیق و جامع مورد بررسی قرار گیرد، پایه پل بیضی شکل با ارتفاع‌های مختلف در نرم افزار Seismostruct [۱۸] مدل‌سازی شده و تحت مولفه‌های افقی و قائم زلزله و بدون تقویت و نیز با انواع تقویت با صفحات CFRP در چند لایه و میلگردهای SMA با قطرهای مختلف، تحت تحلیل‌های دینامیکی افزایشی قرار گرفته و عملکرد آن‌ها تحت پارامترهای تقاضاهای مختلف مانند شکل‌پذیری، منحنی شکنندگی و جابجایی ماکزیمم و جابجایی ماندگار مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. روند انجام تحقیق در قالب فلوچارتی در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱: فلوچارت روند انجام تحقیق

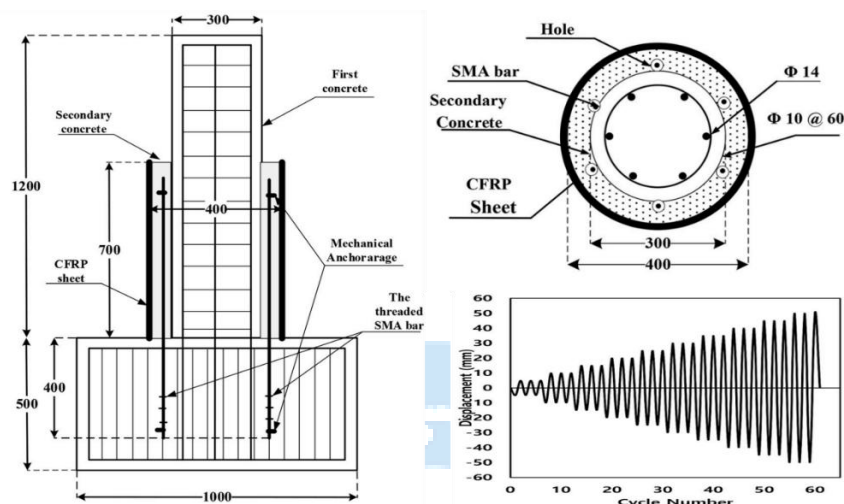
۲- صحت‌سنجی مدل‌ها

بررسی مدل اجزای محدود قابل اطمینان برای یک پژوهش امری ضروری می‌باشد. بازبینی اعتبار مدل، یکی از مهمترین و ضروری‌ترین گام‌ها در یک مطالعه عددی می‌باشد. بدین‌منظور مدل تجربی میرعالمی و همکاران [۱۲] در این مطالعه بررسی گردیده است. این مدل توسط میرعالمی و همکاران به صورت عددی در نرم‌افزار Abaqus [۱۹] نیز تحلیل شده است. در تحقیق مذکور برای مقاوم‌سازی محل اتصال ستون بتن مسلح دایره‌ای به فونداسیون از میلگرد SMA و روکش پلیمری فیبر کربن مسلح شده (CFRP) استفاده گردیده است. یک ستون دایره‌ای بتنی در مقیاس یک چهارم نسبت به مدل واقعی، با قطر ۳۰ سانتیمتر و به ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتر که دارای یک

¹⁴ Vahedi

¹⁵ Drift

فونداسیون $50 \times 50 \times 100$ سانتیمتر می باشد مورد بررسی قرار گرفته است. روی این ستون یک نیروی محوری قائم به میزان ۳۰۰ کیلونیوتن و یک بار جانبی سیکلی افقی رفت و برگشتی به طور همزمان اعمال گردیده است. بار جانبی اعمالی شامل ۶۰ چرخه جابجایی جانبی بین ۵ میلیمتر تا ۵۰ میلیمتر با نرخ ۵ میلیمتری به صورت چرخه‌ای بوده است. در شکل ۲ جزئیات مربوط به شکل مدل پایه و بارگذاری چرخه‌ای در مطالعه میرعالمی و همکاران [۱۲] نمایش داده شده است.



شکل ۲: مدل مورد بررسی توسط میرعالمی و همکاران به همراه بارگذاری [۱۲].

سه نمونه مرتبط در تحقیق میرعالمی و همکاران [۱۲] با نام‌های RCC، S8-RCC و S8-C-RCC دارای مشخصات ابعادی، میلگرد و نوع تقویت به شرح جدول ۱ می باشد.

جدول ۱: مشخصات ابعادی، میلگرد و نوع تقویت نمونه‌های مطالعه میرعالمی و همکاران [۱۲]

مشخصات	RCC	S8-RCC	S8-C-RCC
قطر ستون تا ارتفاع ۷۰۰ میلیمتر	300	400	400
میلگرد اصلی	6 Φ 14	6 Φ 14	6 Φ 14
خاموت	10@60mm Φ	10@60mm Φ	10@60mm Φ
میلگرد SMA	---	6 Φ 8	6 Φ 8
ورق CFRP به ضخامت ۰/۵ میلیمتر	---	---	۱ لایه

در جدول ۲ مقایسه ماکزیمم بار جانبی بین نتایج تجربی و نتایج اجزای محدود (تحلیل با نرم افزار Abaqus) تحقیق میرعالمی و همکاران [۱۲] نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که نتایج اجزا محدود در همبستگی خوبی با نتایج تجربی می باشد.

جدول ۲: مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج تحلیلی ماکزیمم بار جانبی نمونه‌های مورد بررسی توسط میرعالمی و همکاران [۱۲]

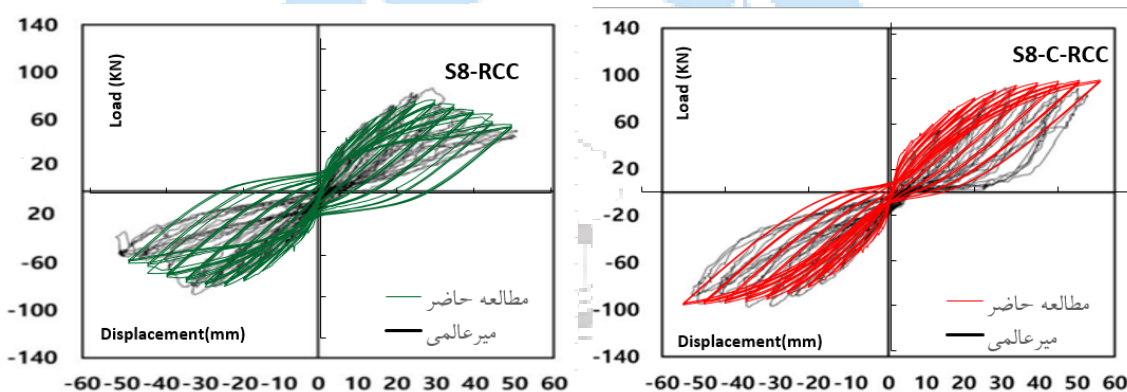
نمونه	نتایج تجربی (KN)	نتایج تحلیلی (KN)	اختلاف نتایج تجربی و تحلیلی (KN)	درصد اختلاف نتایج تجربی و تحلیلی
RCC	۵۵/۰۰	۴۶/۷۸	۸/۲۲	۱۴/۹۵
S8-RCC	۸۶/۸۶	۷۹/۲۴	۷/۶۲	۸/۷۷
S8-C-RCC	۹۶/۹۱	۸۹/۱۵	۷/۷۶	۸/۰۱

در جدول ۳ مقایسه ماکزیمم بار جانبی بین نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی تحقیق میرعالمی و همکاران [۱۲] نشان داده شده است. درصد اختلاف مطالعه حاضر با نمونه تجربی تحقیق مذکور کم (زیر ۵ درصد) و قابل قبول می‌باشد. لذا صحت‌سنجی قابل قبول است.

جدول ۳: مقایسه بین ماکزیمم بار جانبی مطالعه حاضر با تحقیق میرعالمی و همکاران [۱۲]

نمونه	نتایج تجربی تحقیق میرعالمی و همکاران (KN)	مطالعه حاضر (KN)	اختلاف نتایج تجربی و مطالعه حاضر (KN)	درصد اختلاف نتایج تجربی و مطالعه حاضر
RCC	۵۵/۰۰	۵۲/۸۳	۲/۱۷	۳/۹۵
S8-RCC	۸۶/۸۶	۹۰/۷۰	-۳/۸۴	-۴/۴۲
S8-C-RCC	۹۶/۹۱	۹۹/۲۰	-۲/۲۹	-۲/۳۶

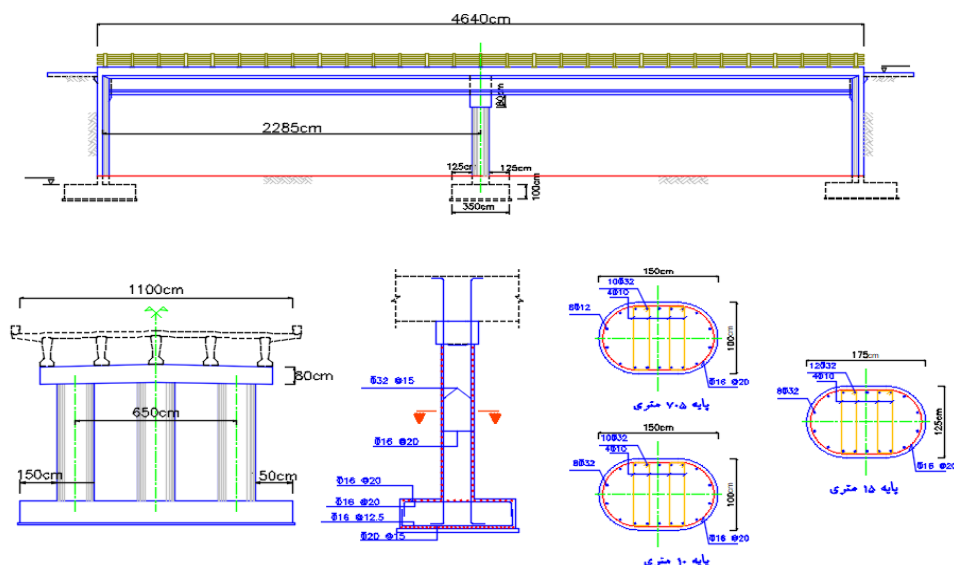
نمودارهای هیسترتیک مطالعه حاضر در کنار تحقیق میرعالمی و همکاران [۱۲] در شکل ۳ نمایش داده شده و با یکدیگر مقایسه گردیده است. همانطور که مشخص می‌باشد، با مقایسه نمودارها مشاهده می‌گردد که نمودارها چندان اختلافی با یکدیگر ندارد و در حد قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۳: مقایسه نمودارهای هیسترتیک مطالعه حاضر با تحقیق میرعالمی و همکاران [۱۲].

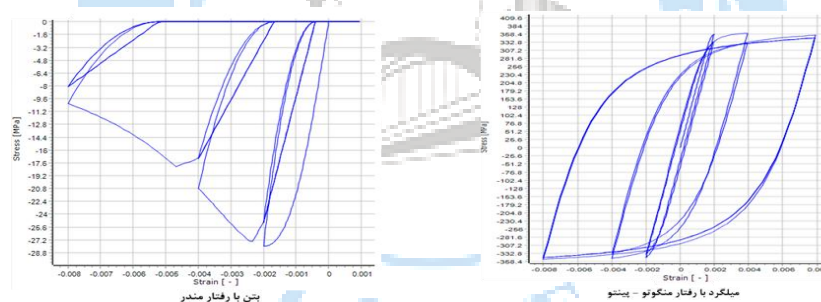
۳- مشخصات سازه‌های مورد بررسی

برای این مطالعه، پایه پل بتنی سه ستونی، بر اساس مشخصات ارائه شده در نشریه ۲۹۴ [۲۰]، در سه ارتفاع ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ متری مدل‌سازی گردیده است. ابعاد و مشخصات پل و جزئیات مقاطع آن در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: نقشه سازه پل [۲۰].

مصالح مصرفی پایه پل مطابق نشریه ۲۹۴ [۲۰] می‌باشد. بتن پایه پل با رده C25 با مدل رفتاری ارائه شده به وسیله مندر^{۱۶} و همکاران که در سال ۱۹۸۸ ارائه گردید [۲۱] در نظر گرفته شده است. میلگردها از نوع AIII بوده و مدل رفتاری آن جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار، از نوع مینگوتو - پینتو^{۱۷} می‌باشد [۲۲]. مدل بتن با رفتار مندر و مدل میلگرد با رفتار مینگوتو - پینتو در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵: مدل رفتاری بتن مندر و میلگرد مینگوتو - پینتو

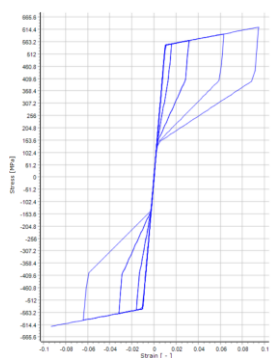
در این مطالعه برای تقویت و مقاوم‌سازی پایه پل از ورق‌های CFRP به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و تا ۳ لایه و از نوع ورق‌های با مقاومت بالا^{۱۸} استفاده شده است. مشخصات مصرفی مطابق مشخصات مکانیکی ارائه شده در نشریه ۳۴۵ [۲۳] می‌باشد. از آنجائیکه خصوصیات مصالح FRP که بوسیله سازندگان آن‌ها ارائه می‌شود، مانند مقاومت کششی نهایی، عموماً به صورت خصوصیات اولیه بوده و اثر قرارگیری در معرض شرایط محیطی طی زمان‌های طولانی بر روی این خصوصیات در نظر گرفته نمی‌شود. لذا مقاومت نهایی طراحی با تعیین یک ضریب کاهش می‌بایست در نظر گرفته شود. این کاهش مقاومت مطابق نشریه ۳۴۵ [۲۳] شامل دو ضریب جزئی ایمنی و ضریب کاهش محیطی می‌شود. این دو ضریب برای مطالعه حاضر هر کدام به میزان ۰/۸۵ بدست می‌آید. لذا برای این مطالعه این ضریب کاهش به میزان ۰/۷۳ در نظر گرفته شده است. مشخصات مکانیکی و مقاومتی ورق CFRP در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴: مشخصات مکانیکی ورق CFRP [۲۳]

¹⁶ Mander¹⁷ Menegotto-Pinto¹⁸ High-strength carbon

مقدار	مشخصه مکانیکی و مقاومتی
$E_1 = 240 * 10^3 MPa$	مدول الاستیسیته در جهت الیاف
$\sigma_{11} = 3518 MPa$	مقاومت نهایی کششی در جهت الیاف
1.4%	حداقل کرنش گسیختگی در جهت اصلی
0.5 mm	ضخامت ورق CFRP
$16000 \frac{KN}{m^3}$	وزن ورق CFRP

آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMA)، دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که می‌توانند شکل اولیه خود را به خاطر بسپارند. این مواد پس از خم شدن، با اعمال حرارت، دوباره شکل اولیه خود را باز خواهند یافت. در واقع SMAها از خاصیت الاستیسیته بالایی برخوردار هستند. این آلیاژهای حافظه دار، بسیار انعطاف پذیر هستند و معمولاً آن را متریا ل سوپر الاستیسیته نیز می‌نامند. بوهلر^{۱۹} و همکاران در سال ۱۹۶۳ در آزمایشگاه تسلیحات نیروی دریایی آمریکا اثر حافظه شکلی را در آلیاژ نیکل - تیتانیوم کشف کردند و نام آن را نیتینول^{۲۰} نهادند [۲۴]. میلگرد SMA استفاده شده در این مطالعه از نوع نیتینول می‌باشد. مشخصات میلگرد SMA این مطالعه مطابق تحقیق میرعالمی و همکاران [۱۲] می‌باشد (جدول ۵). در شکل ۶ مدل رفتاری SMA نمایش داده شده است.



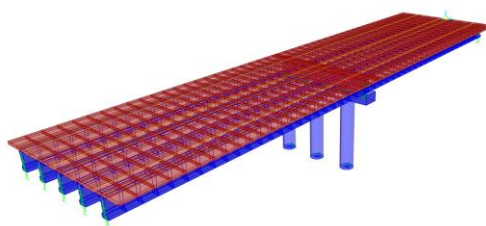
SMA ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸

جدول ۵: مشخصات مقاومتی میلگرد SMA [۱۲].

مقدار	مشخصه مقاومتی
53.9 GPa	مدول الاستیسیته
11.5 %	کرنش نهایی
549 MPa	تنش آغازین آستنیت به مارتنزیت
652 MPa	تنش پایانی آستنیت به مارتنزیت
406 MPa	تنش آغازین مارتنزیت به آستنیت
140 MPa	تنش آغازین مارتنزیت به آستنیت

در این مطالعه رفتار پایه در برابر زلزله مطرح می‌باشد و معمولاً در اکثر مواقع عرشه پل به دلیل دارا بودن سختی زیاد به خصوص در عرشه با طول کوتاه (مانند پل‌های مورد بررسی در این مطالعه) دارای رفتار خطی می‌باشند، لذا مدل سازی کل پل (شامل عرشه و پایه) در نرم افزار اجزا محدود نیازی نمی‌باشد. لذا فقط مدل سازی المان‌ها از قبیل پایه و سرستون که از نوع غیرخطی می‌باشند در نرم افزار اجزا محدود مدل می‌گردد [۱۲]. پل‌های مورد بررسی در این مطالعه پل‌های اجرا شده بر اساس مشخصات ارائه شده در نشریه ۲۹۴ [۲۰] می‌باشد، لذا برای آنکه نیروهای وارده بر پایه (به جزء زلزله) را در نرم افزار اجزا محدود اعمال نمائیم، ابتدا پل‌های مورد بررسی شامل عرشه و پایه در نرم افزار CSI Bridge [۲۵] مدل سازی گردید (شکل ۷) و بر اساس نشریه ۱۳۹ [۲۶] بارگذاری شد. ضرائب ترکیبات بارگذاری در نشریه ۱۳۹ [۲۶] مطابق آئین نامه AASHTO [۲۷] می‌باشد. بارهای اعمالی شامل مرده، زنده با اعمال ضریب ضربه برای کامیون، جریان آب، اثر ترمز و تغییرات دما می‌باشد (جدول ۶). سپس در نرم افزار اجزا محدود Seismostruct 2022 پایه به همراه سرستون مدل گردید و حداکثر نیروهای بدست آمده از نرم افزار CSI Bridge که مربوط به ترکیب بار یک (جدول ۷) می‌باشد به همراه شتاب‌نگاشت‌ها به مدل اجزا محدود اعمال شد. در واقع در نظر گرفتن بار زنده همراه با زلزله در نظر گرفتن حالت فوق العاده در پل می‌باشد.

¹⁹ Buehler
²⁰ Nitinol



شکل ۷: مدل سه بعدی پل در نرم افزار CSI Bridge [۲۵].

جدول ۶: مقادیر بارگذاری براساس نشریه ۱۳۹ [۲۶]

نوع بار	نماد	مقدار بار
		۵ سانتیمتر آسفالت روی عرشه
مرده	D	پیاده‌روسازی به عرض ۱/۵ متر و ضخامت ۲۰ سانتیمتر در دو طرف نرده به وزن واحد طول ۲۵۰ کیلو نیوتن در متر طول عرشه در دو طرف عرشه وزن دال کف عرشه و شاه‌تیرهای طولی پل که در نرم‌افزار CSI Bridge اعمال گردیده است
زنده	L	بار کامیون
جریان آب	SF	$66 \frac{kN}{m^2}$
اثر ترمز	LF	360kN
تغییرات دما	T	$35^{\circ}C$

جدول ۷: ترکیبات بارگذاری براساس نشریه ۱۳۹ [۲۶] و آئین‌نامه AASHTO [۲۷]

Combo	γ	D	L	SF	LF	T	EQ
I	1.3	1	1.67	1	0	0	0
II	1.3	1	0	1	0	0	0
III	1.3	1	1	1	1	0	0
IV	1.3	1	1	1	0	1	0
V	1.25	1	0	1	0	1	0
VI	1.25	1	1	1	1	1	0
VII	1.3	1	0	1	0	0	1
VIII	1.3	1	1	1	0	0	0
IX	1.2	1	0	1	0	0	0
X	1.3	1	1.67	0	0	0	0

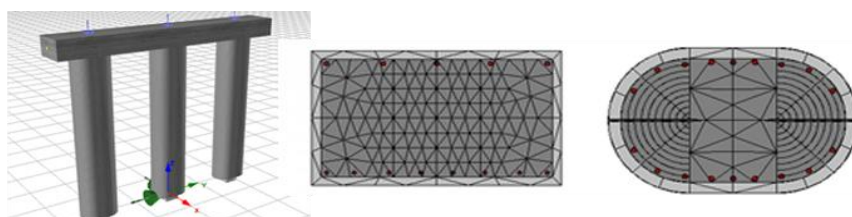
ماکزیم نیرو و لنگر به دست آمده در نقاط بالایی پایه‌ها که براساس ترکیب بار جدول ۷ به دست آمده است در جدول ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۸: ماکزیم نیرو و لنگر به دست آمده در نقاط بالایی پایه‌ها در نرم‌افزار CSI Bridge [۲۵]

پایه	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)	Mx(KN.m)	My(KN.m)	Mz(KN.m)
کناری	۳۳۵	۲۵۶	-۳۵۸۹	۲	۲۹۳۰	۲
میانی	۳۰۱	۱۳۲	-۲۳۴۶	۱	۲۸۶	۱

۴- مدل سازی پایه‌ها به روش اجزا محدود

از آنجائیکه نرم افزار CSI Bridge [۲۵] برای مدل سازی و بررسی رفتار غیرخطی سازه دارای محدودیت است (در این نرم افزار امکان تعریف مش یا فایبر^{۲۱} برای یک مقطع وجود ندارد) لذا برای بررسی دقیق اعضای سازه‌ای با رفتار غیرخطی بهتر است از نرم افزار اجزای محدود استفاده نمود، لذا در این مطالعه برای مدل سازی مدل اجزا محدود پایه سه ستونی، از نرم افزار Seismostruct 2022 [۱۸] استفاده گردیده است. نوع غیرخطی المان‌ها، از نوع فایبر در نظر گرفته شده که در این نرم افزار این قابلیت به خوبی قابل تعریف است. برای بالا بردن دقت مدل سازی از ۲۰۰ عدد فایبر برای پایه و سرستون استفاده شده است. مدل اجزا محدود پایه و سرستون در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: مدل اجزا محدود پایه و سرستون و تعداد فایبرها.

در این مطالعه برای تقویت پایه پل از ورق‌های CFRP که مشخصات طراحی و مقاومتی آن مطابق نشریه ۳۴۵ [۲۳] می‌باشد استفاده گردیده است (جدول ۴). ضخامت ورق‌های CFRP مطابق نشریه مذکور ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد و تعداد لایه‌های ورق در سه حالت یک لایه، دو لایه و سه لایه در این مطالعه در نظر گرفته شده است. تعداد بیشتر لایه CFRP (بیش از سه لایه) به دلیل اجرایی توسط سازندگان و مجریان این ورق‌ها پیشنهاد نمی‌گردد. در خصوص مشخصات و ضوابط طراحی میلگردهای SMA در حال حاضر آئین‌نامه و نشریه مدونی در ایران و جهان وجود ندارد، لذا محققین در این خصوص معمولاً از مشخصات مقالات معتبر که در این زمینه ارائه گردیده است استفاده می‌نمایند. در این مطالعه از مشخصات مقاومتی و طراحی ارائه شده در مقاله میرعالمی و همکاران [۱۲] که در جدول ۵ ارائه گردیده است استفاده شده است. از آنجائیکه هزینه و قیمت میلگردهای SMA بالا می‌باشد استفاده از میلگردهای با قطر بالا در تقویت سازه‌ها معمولاً عرف نمی‌باشد. در این مطالعه از دو قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر میلگرد SMA استفاده گردیده است. از آنجائیکه در این مطالعه ورق‌های CFRP در حالت یک لایه، دو لایه و سه لایه استفاده شده است و میلگردهای SMA در دو قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر می‌باشند، لذا با احتساب حالت بدون تقویت، ۱۲ حالت تقویت به شرح جدول ۹ در نظر گرفته شده است. این حالت‌های تقویت تحت نیروی زلزله تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی افزایشی قرار گرفته و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۹: حالت‌های تقویت در نظر گرفته شده برای پایه پل

ردیف	نماد	نوع تقویت پایه پل
۱	NONE	بدون تقویت
۲	1CFRP	تقویت با یک لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm
۳	2CFRP	تقویت با دو لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm
۴	3CFRP	تقویت با سه لایه ورق به ضخامت 0.5mm CFRP
۵	SMA-D12	تقویت با میلگرد SMA (Φ12@25cm)
۶	SMA-D16	تقویت با میلگرد SMA (Φ16@25cm)
۷	1CFRP-SMA-D12	تقویت با یک لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm و میلگرد SMA (Φ12@25cm)
۸	2CFRP-SMA-D12	تقویت با دو لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm و میلگرد SMA (Φ12@25cm)
۹	3CFRP-SMA-D12	تقویت با سه لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm و میلگرد SMA (Φ12@25cm)
۱۰	1CFRP-SMA-D16	تقویت با یک لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm و میلگرد SMA (Φ16@25cm)
۱۱	2CFRP-SMA-D16	تقویت با دو لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm و میلگرد SMA (Φ16@25cm)
۱۲	3CFRP-SMA-D16	تقویت با سه لایه ورق CFRP به ضخامت 0.5mm و میلگرد SMA (Φ16@25cm)

²¹ Fiber

۵- تحلیل دینامیکی افزایشی پل

در تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) چند شتاب‌نگاشت به وسیله ضرائبی به‌طور تدریجی مقیاس می‌شوند، بطوریکه در نتیجه این افزایش مقیاس، تمام محدوده رفتاری سازه، از خطی تا حالت ناپایداری جانبی یا ایجاد مکانیزم فروریزش را در بر بگیرد. تحلیل IDA روشی است که طی آن شدت مقیاس شده یک رکورد زلزله که منجر به نقض یک یا چند حالت حدی تعریف شده در سازه می‌شود، به روش افزایش تدریجی ضریب مقیاس زلزله و تعیین پاسخ سازه در برابر زلزله مقیاس شده به‌دست می‌آید. تحلیل IDA برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط وامواتسیکوس^{۲۲} و همکاران پیشنهاد گردید [۲۸]. این تحلیل یک تحلیل دینامیکی غیرخطی است که به کمک آن می‌توان مقدار خسارت وارد به سازه را برحسب شدت تحریک زلزله وارده شده، مشخص نمود. در این روش با توجه به اینکه رفتار مصالح غیرخطی در نظر گرفته می‌شود و نیز ماهیت دینامیکی دارد، لذا در مقایسه با روش‌های استاتیکی مانند تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون (پوش‌آور) و روش‌های دینامیکی مانند تحلیل دینامیکی طیفی دقیق‌ترین روش در تخمین رفتار سازه‌ها می‌باشد.

در تحلیل IDA دو کمیت اساسی اندازه شدت (IM) و اندازه خسارت (DM) استفاده می‌گردد. معیارهای مختلفی نظیر ماکزیمم شتاب زلزله (PGA)، ماکزیمم سرعت زمین (PGV) و یا شتاب طیفی پریود اول (Sa(T1)) برای شدت زلزله یا IM پیشنهاد شده است. در این مطالعه Sa(T1) انتخاب گردیده است. اندازه خسارت یا DM یک کمیت قابل مشاهده است که از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی به‌دست می‌آید. انتخاب یک کمیت مناسب برای اندازه خسارت با توجه به نوع کاربرد سازه تعیین می‌گردد. در این مطالعه به‌دلیل آن‌که جابجایی ماکزیمم نوک پایه اهمیت بسزائی در پل دارد، لذا ماکزیمم جابجایی نوک پایه پل به‌عنوان معیار خرابی در نظر گرفته شده است. روش تحلیل IDA توسط راهنماهای سازمان مدیریت بحران کل آمریکا (FEMA) پذیرفته شده است [۲۹] و به‌عنوان روشی برای تعیین ظرفیت فروپاشی کل سازه به کار برده می‌شود. در این مطالعه از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی افزایشی استفاده گردیده است میزان ضریب PGA از مقدار 0.05g شروع شده و با گام‌های 0.05g تغییر یافته تا سازه فروریزش کند.

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده در این مطالعه، از نوع شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک پالس‌دار می‌باشد. در آیین‌نامه بارگذاری آمریکا [۳۰] مرز بین حوزه دور و حوزه نزدیک در بخش شانزدهم مشخص گردیده است. در آیین‌نامه مذکور، این فاصله برابر ۵ کیلومتر از گسل فعال در نظر گرفته است. همچنین در سال ۲۰۱۱ گزارشی توسط موسسه NEHRP منتشر شد که عدد ۱۶ کیلومتر را مرز ناحیه حوزه نزدیک و دور عنوان کرد [۳۱]. مطابق آئین‌نامه FEMA-P695 [۳۲] این فاصله برابر ۱۰ کیلومتر می‌باشد. گزینش شتاب‌نگاشت‌های درست از جمله پراهمیت‌ترین گام‌های تحلیل IDA است، زیرا پاسخ‌های غیرخطی سازه بسیار به شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده وابسته هستند و اشتباه در انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب می‌تواند در نتیجه‌گیری حاصل از تحلیل اختلال ایجاد کند. به همین دلیل زلزله‌های انتخاب شده باید مشخصات مشابهی با زلزله محتمل در سایت مورد بررسی داشته باشند. از این مشخصات می‌توان به این موارد اشاره کرد: بزرگا (Magnitude)، فاصله از گسل (Distance)، مکانیزم عملکرد گسل (Fault Mechanism)، نوع خاک (Soil/Rock Type)، اثر جهت داری (Directivity).

در آئین‌نامه FEMA-P695 [۳۲] لیستی از زلزله‌های حوزه نزدیک پیشنهاد شده است که شامل دو نوع زلزله پالس‌دار و بدون پالس می‌باشد. در این مطالعه از لیست زلزله‌های پالس‌دار حوزه نزدیک استفاده شده است (جدول ۱۰). در خصوص تعداد شتاب‌نگاشت‌ها، مطابق توصیه شوم^{۲۳} تعداد ۱۰ تا ۲۰ رکورد، دقت قابل قبولی در برآورد تقاضای لرزه‌ای می‌دهند [۳۳]. بنابراین در این مطالعه از تمام ۱۴ شتاب‌نگاشت جدول ۱۰ استفاده گردیده است. شتاب‌نگاشت‌های زلزله، از سایت PEER Ground Motion Database [۳۴] استخراج گردیده است.

جدول ۱۰: زلزله‌های پالس‌دار حوزه نزدیک مطابق FEMA-P695 [۳۲]

²² Vamvatsikos
²³ Shome

ID	Name	M	Distance(Km)	شماره در دیتابیس سایت PEER (NTPS)	Year	Station Name
1	01-Imperial Valley06-#6	6.53	1.35	7815	1979	El Centro Array #6
2	02-Imperial Valley06-#7	6.53	0.56	7372	1979	El Centro Array #7
3	03-Irpinia, Italy-01	6.90	6.78	16392	1980	Sturmo (STN)
4	04-Superstition Hills-02	6.54	0.95	7880	1987	Parachute Test Site
5	05-Loma Prieta	6.93	7.58	7999	1989	Saratoga - Aloha Ave
6	06-Erzican ,Turkey	6.69	4.38	4156	1992	Erzincan
7	07-Cape Mendocino	7.01	8.18	1800	1992	Petrolia
8	08-Landers	7.28	2.19	9625	1992	Lucerne
9	09-Northridge01-Rinaldi	6.69	6.5	1991	1994	Rinaldi Receiving Sta
10	10-Northridge01-Sylmar	6.69	1.74	2000	1994	Sylmar - Olive View Med FF
11	11-Kocaeli, Turkey	7.51	3.62	6000	1999	Izmit
12	12-Chi-Chi-Tcu065	7.62	0.59	18000	1999	TCU065
13	13-Chi-Chi-Tcu102	7.62	1.49	18000	1999	TCU102
14	14-Duzce,Turkey	7.14	6.58	5177	1999	Duzce

در بسیاری از مقالات تحقیقاتی برای تحلیل‌های دینامیکی سازه‌ها در برابر زلزله و بررسی رفتار غیرخطی آن‌ها هر دو مولفه افقی استفاده شده است و بعضاً و به‌خصوص در زلزله‌های حوزه نزدیک علاوه بر مولفه‌های افقی زلزله، مولفه قائم آن هم‌زمان به سازه اعمال گردیده و نتیجه آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است [۳۵] و [۳۶]. لذا در این تحقیق هم همین مساله مورد توجه قرار گرفته است.

در این مطالعه جهت اعمال زلزله، سه مولفه (X, Y, Z) ۱۴ شتاب‌نگاشت FEMA-P695 [۳۲] به دو صورت زیر در نظر گرفته شد.

- ترکیب دو مولفه افقی.
- ترکیب دو مولفه افقی به همراه مولفه قائم.
- از آنجائیکه در این مطالعه، ۱۴ شتاب‌نگاشت و هر کدام در دو ترکیب و ۱۲ حالت تقویت و سه ارتفاع مختلف پایه در نظر گرفته شده است، لذا در این مطالعه ۱۰۰۸ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی IDA مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

۶- ارزیابی عملکرد پایه پل

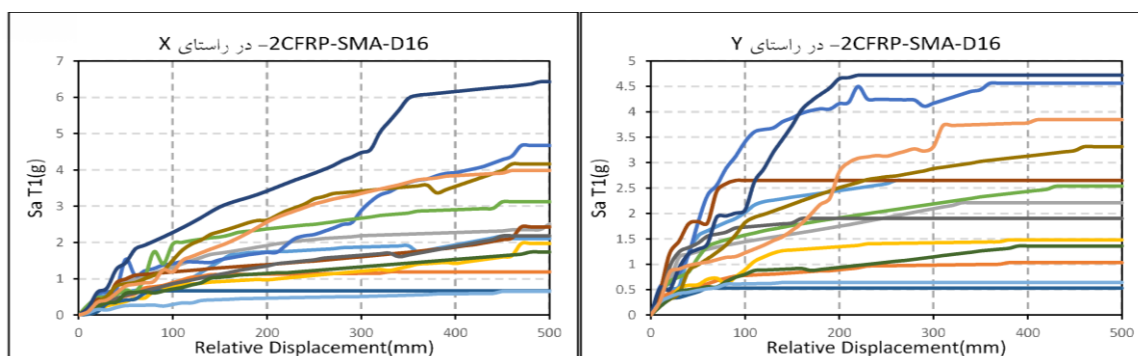
در این مطالعه ۱۴ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک پالس‌دار در نرم‌افزار Seismostruct [۱۸] به پایه‌ها اعمال گشته و تحت تحلیل IDA قرار گرفته است، در مرحله بعدی ۵ شاخص لرزه‌ای زیر برای پایه‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

- شتاب طیفی برای پریود اول $S_a(T_1)$ بر حسب g (شتاب ثقل)
- شکل‌پذیری
- منحنی شکنندگی
- جابجایی ماکزیمم
- جابجایی ماندگار

در ادامه پایه‌های پل برای سه ارتفاع ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ متری برای ۱۲ حالت تقویت در دو راستای طولی پل (X) و عرضی پل (Y) برای ۵ شاخص عملکردی، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

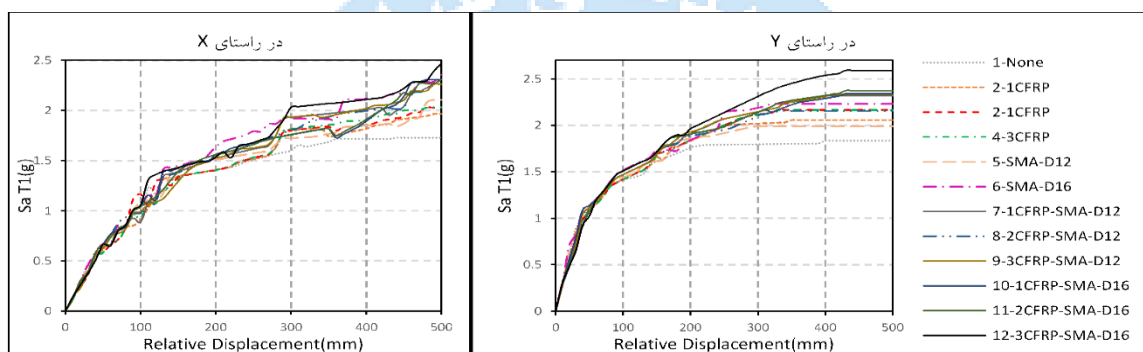
۶-۱- منحنی‌های $S_a(T_1)$ بر اساس g (شتاب ثقل)

در شکل ۹ دو نمونه از منحنی‌های IDA برای ۱۴ شتاب‌نگاشت در حالت ترکیب دو مولفه افقی برای تقویت 2CFRP-SMA-D16 برای پایه پل به ارتفاع ۷/۵ متر در دو جهت طولی پل (X) و عرضی پل (Y) نمایش داده شده است



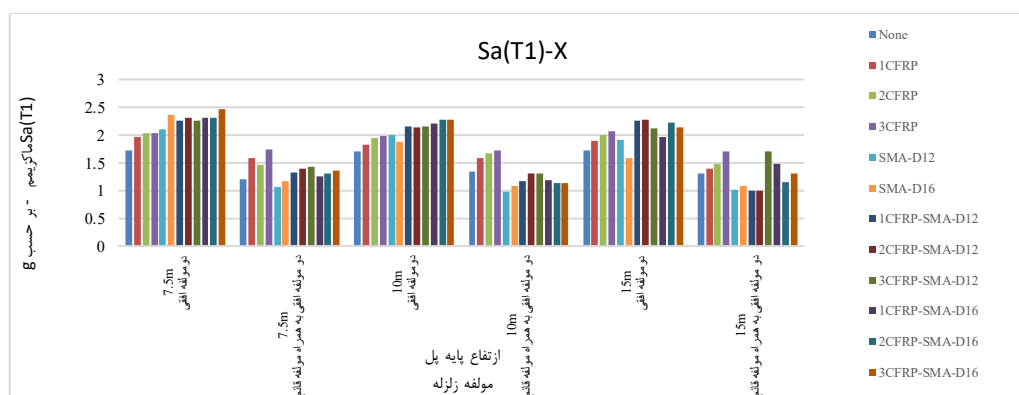
شکل ۹: منحنی‌های IDA، برای حالت تقویت 2CFRP-SMA-D16 برای ۱۴ شتاب‌نگاشت برای پایه ۷/۵ متری.

برای بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر حالت‌های مختلف تقویت، ۱۴ شتاب‌نگاشت بر اساس صدک ۵۰٪ معیار مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۱۰ منحنی‌های IDA مربوط به صدک ۵۰٪ برای ۱۲ حالت تقویت در دو راستای طولی (X) و عرضی (Y) برای پایه پل به ارتفاع ۷/۵ متر به‌عنوان نمونه به جهت مقایسه روی هم قرار گرفته است.

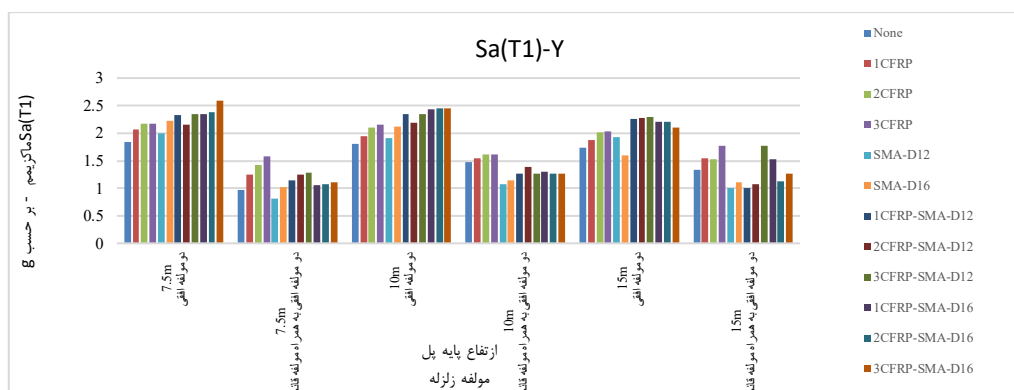


شکل ۱۰: منحنی IDA مربوط به صدک ۵۰٪ برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه ۷/۵ متری برای حالت ترکیب دو مولفه افقی.

در اشکال ۱۱ و ۱۲ نمودار میله‌ای Sa(T1) ماکزیمم برای جابجایی ۵۰ سانتیمتر برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل به ارتفاع ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ متر برای حالت ترکیب دو مولفه افقی و حالت ترکیب دو مولفه قائم در دو راستای طولی (X) و عرضی (Y) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: نمودار میله‌ای Sa(T1) ماکزیمم برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای طولی پل.

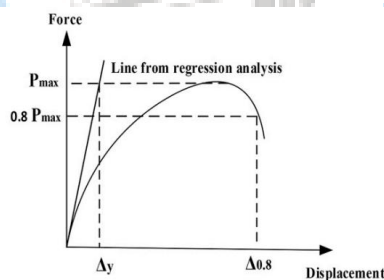


شکل ۱۲: نمودار میله‌ای $Sa(T1)$ ماکزیمم برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای عرضی پل.

نمودارهای ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند در خصوص شاخص $Sa(T1)$ ، در پایه با ارتفاع کوتاه (مانند ۷/۵ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر زیادی داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۷/۵ متری تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۴۳/۱٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۲۵/۴٪ نسبت به حالت تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است. در پایه بلند (مانند ۱۵ متری) تقویت 3CFRP-SMA-D16 در بهبود عملکرد تاثیر داشته است البته نه به اندازه پایه کوتاه. به عنوان نمونه در پایه ۱۵ متری تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۲۲/۱٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۵/۱٪ نسبت به حالت تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است.

۲-۶ - شکل پذیری

به قابلیت جذب انرژی توسط مصالح، سیستم سازه‌ای، اعضا و اتصالات یک سازه در محدوده تغییر شکل‌های غیرالاستیک شکل‌پذیری گفته می‌شود. معیار بررسی شکل‌پذیری، نسبت جابجایی مربوط به بار معادل ۸۰ درصد بار ماکزیمم به جابجایی مربوط به بار تسلیم می‌باشد [۱۲]. در شکل ۱۳ نمودار محاسبه ضریب شکل‌پذیری نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار محاسبه ضریب شکل‌پذیری [۱۲].

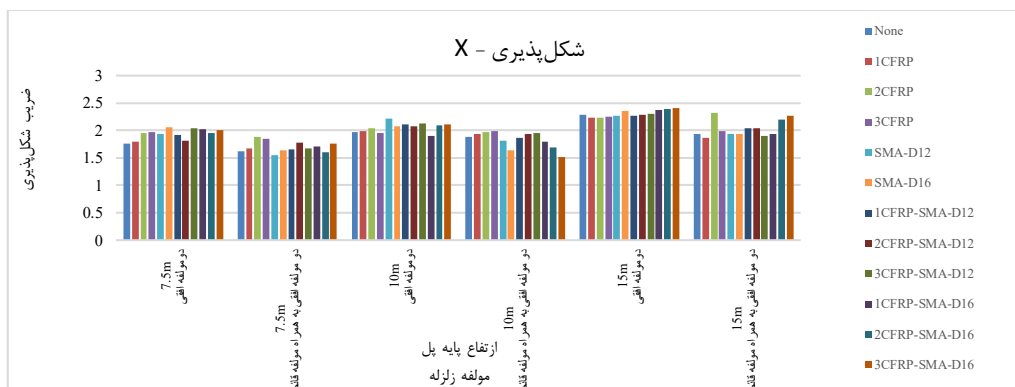
در این مطالعه برای بررسی شکل‌پذیری پایه، معیار جابجایی تسلیم حالت عملکرد بی‌وقفه و معیار جابجایی ماکزیمم حالت آستانه فروریزش بر اساس سطوح عملکردی سازه‌ای ارائه شده برای سازه بتنی توسط آئین‌نامه FEMA356 [۳۷] در نظر گرفته شده است (جدول ۱۱).

جدول ۱۱: سطوح عملکردی و وضعیت خرابی سازه بتنی مطابق آئین‌نامه FEMA356 [۳۷]

میزان Drift(%)	نماد	سطح عملکردی مطابق FEMA356
1	IO	Immediate Occupancy ²⁴

قابلیت استفاده بی‌وقفه²⁴

در اشکال ۱۴ و ۱۵ ضریب شکل پذیری برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل به ارتفاع ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ متر برای حالت ترکیب دو مولفه افقی و حالت ترکیب دو مولفه افقی به همراه مولفه قائم در دو راستای طولی (X) و عرضی پل (Y) نمایش داده شده است.



شکل ۱۴: نمودار میله‌ای شکل پذیری برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای طولی پل.



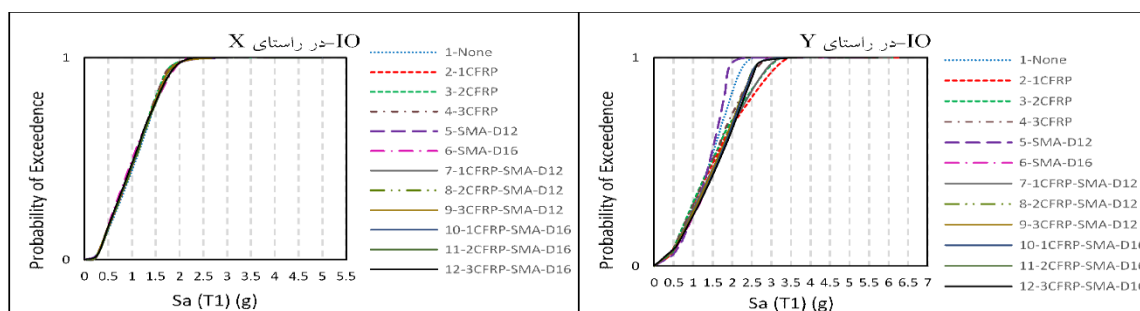
شکل ۱۵: نمودار میله‌ای شکل پذیری برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای عرضی پل.

نمودارهای ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند در خصوص شاخص شکل پذیری، در پایه با ارتفاع کوتاه (مانند ۷/۵ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر زیادی داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۷/۵ متری 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۲۵/۵٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۶/۴٪ نسبت به حالت تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است. در پایه بلند (مانند ۱۰ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر داشته است البته نه به اندازه پایه کوتاه. به عنوان نمونه در پایه ۱۰ متری تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۱۷/۵٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۳/۵٪ نسبت به حالت تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است.

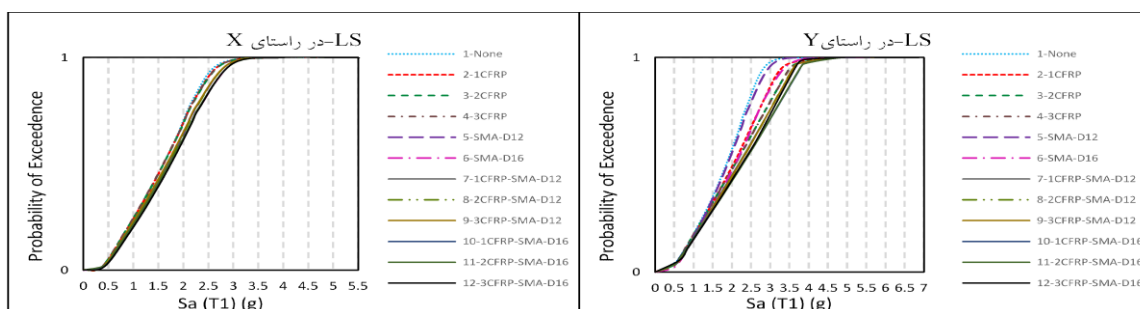
۳-۶- منحنی شکنندگی

به منظور پیش بینی خسارت ناشی از زلزله و برای کم کردن آن، برای سازه منحنی شکنندگی تهیه می‌گردد که در آن محور افقی نمایش‌دهنده عامل تغییر حالت مثلا شتاب بیشینه زلزله (PGA) و یا شتاب طیفی برای پرئود اول (Sa(T1)) و محور قائم آن احتمال گذشتن از یک سطح خطر مشخص است. در این مطالعه، برای بررسی موضوع منحنی شکنندگی از سه سطح عملکردی برای سازه بتنی FEMA356 [۳۷] به شرح جدول ۱۱ استفاده شده است. برای نمونه در اشکال ۱۶ تا ۱۸ منحنی شکنندگی برای پایه ۷/۵ متری با ترکیب دو مولفه افقی برای ۱۲ حالت تقویت برای سه سطح عملکردی IO و LS و CP در دو راستای X و Y نمایش داده شده است.

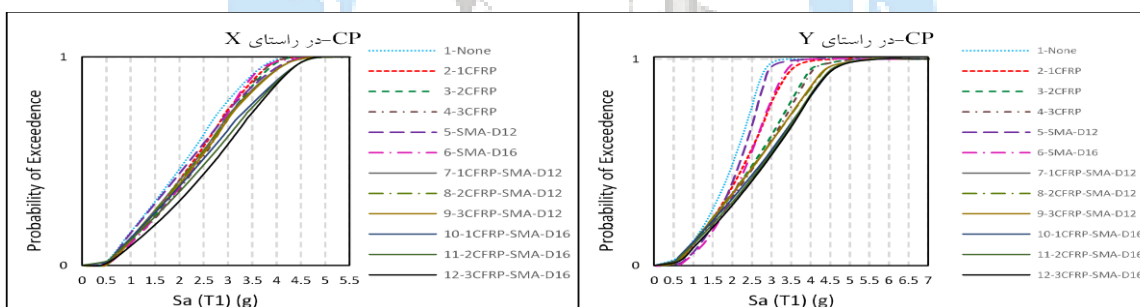
²⁵ ایمنی جانی
²⁶ آستانه فروریزش



شکل ۱۶: منحنی شکنندگی برای ۱۲ حالت تقویت برای سطح عملکردی IO در دو راستای X و Y.

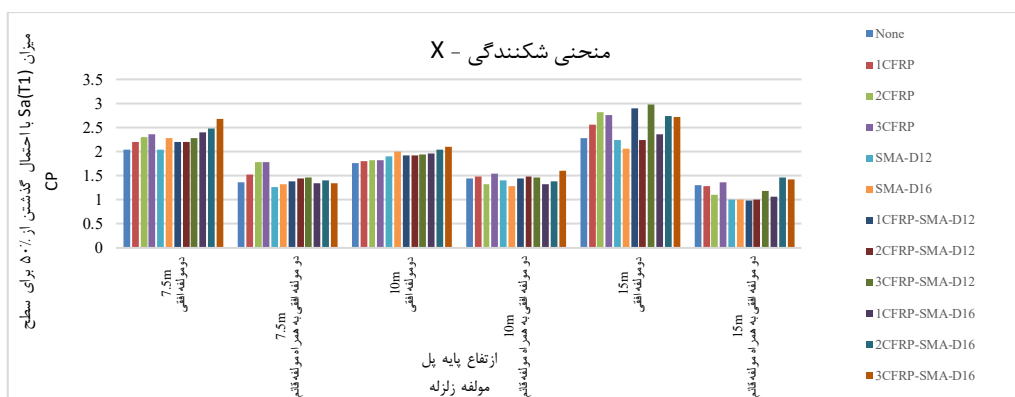


شکل ۱۷: منحنی شکنندگی برای ۱۲ حالت تقویت برای سطح عملکردی LS در دو راستای X و Y.

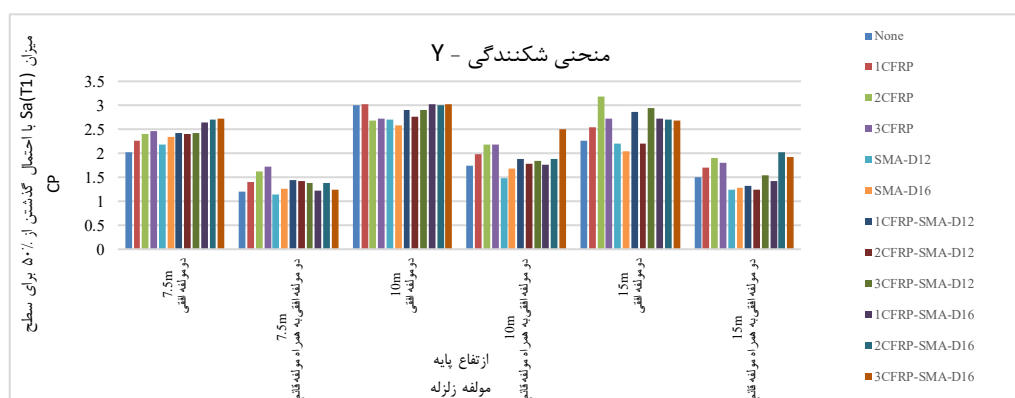


شکل ۱۸: منحنی شکنندگی برای ۱۲ حالت تقویت برای سطح عملکردی CP در دو راستای X و Y.

برای مقایسه منحنی‌های شکنندگی در اشکال ۱۹ و ۲۰ میزان $Sa(T1)$ با احتمال گذشتن از ۵۰٪ برای سطح CP برای تمامی پایه‌ها و ترکیبات برای دو راستای طولی (X) و راستای عرضی (Y) نمایش داده شده است.



شکل ۱۹: نمودار میله‌ای میزان Sa(T1) با احتمال گذشتن از ۵٪ برای سطح CP تمامی پایه‌ها برای راستای طولی پل.

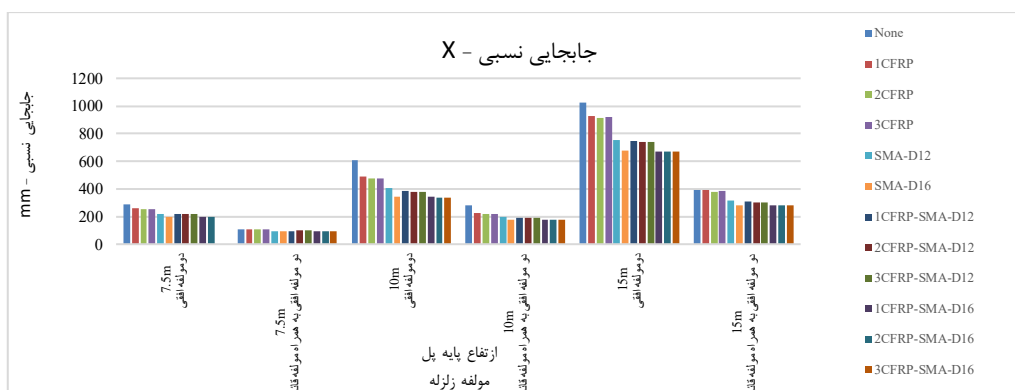


شکل ۲۰: نمودار میله‌ای میزان Sa(T1) با احتمال گذشتن از ۵٪ برای سطح CP تمامی پایه‌ها برای راستای عرضی پل.

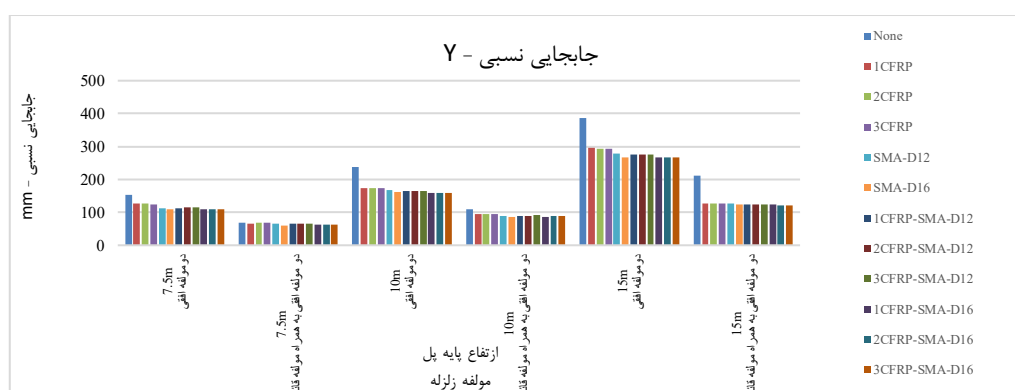
نمودارهای ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهند در خصوص شاخص منحنی شکنندگی، در پایه با ارتفاع کوتاه (مانند ۷/۵ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر زیادی داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۷/۵ متری تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۳۵/۱٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۱۲/۸٪ نسبت به حالت تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است. در پایه با ارتفاع بلند (مانند ۱۵ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر داشته است البته نه به اندازه پایه کوتاه. به عنوان نمونه در پایه ۱۵ متری تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۲۶/۸٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۷٪ نسبت به تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است.

۴-۶- جابجایی ماکزیمم

میزان جابجایی ماکزیمم بالای پل تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف اهمیت بسزایی دارد. لذا در ادامه میزان جابجایی ماکزیمم در نوک پایه مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی بهتر و دقیق‌تر میزان این تغییرات، در اشکال ۲۱ و ۲۲ میزان این جابجایی ماکزیمم در نوک پایه برای ۱۲ حالت تقویت برای تمامی پایه‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۲۱: نمودار میله‌ای جابجایی نوک پایه برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای طولی پل.

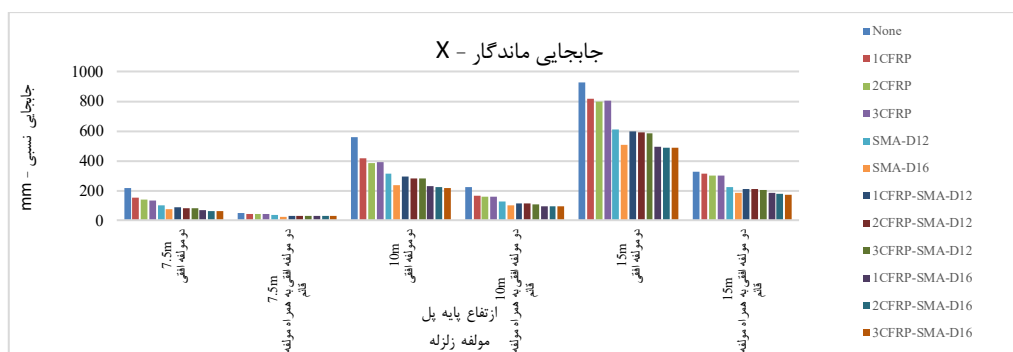


شکل ۲۲: نمودار میله‌ای جابجایی نوک پایه برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای عرضی پل.

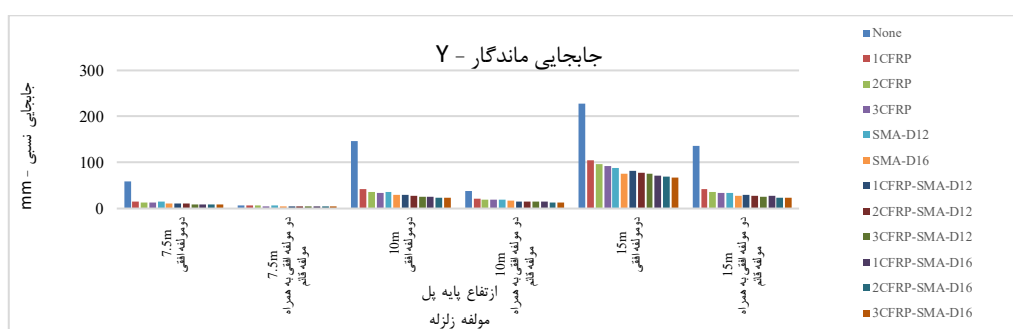
نمودارهای ۲۱ و ۲۲ نشان می‌دهند در خصوص شاخص جابجایی ماکزیمم نوک پایه، در پایه با ارتفاع کوتاه (مانند ۷/۵ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر زیادی داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۷/۵ متری، تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۴۱/۵٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۱۸/۵٪ نسبت به حالت تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است. در مورد پایه با ارتفاع بلند (مانند ۱۵ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر زیادی داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۱۵ متری تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۴۳/۸٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۱۲/۳٪ نسبت به تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است.

۶-۵- جابجایی ماندگار

مطالعات صورت گرفته در زلزله‌ها نشان می‌دهد، تغییر مکان‌های ماندگار بزرگ در پایه پل، منجر به تخریب پل می‌شود و حتی در مواردی (مانند زلزله کوپه ژاپن) با وجود اینکه پل، تحت زلزله تخریب نشد، اما به دلیل جابجایی‌های بزرگ ماندگار پایه پل، بهره‌برداری از پل دیگر مقدور نگردید. اکثر سازه‌های موجود طوری طراحی شده‌اند که جابجایی‌های ماندگار را حفظ می‌کنند. جابجایی ماندگار به دلیل آنکه تعمیر و بازسازی سازه را پس از زلزله سخت می‌کند نامطلوب می‌باشد. بزرگی جابجایی ماندگار نشان‌دهنده درجه آسیب سازه می‌باشد و یک شاخص مهم قابلیت تعمیر سازه‌ها پس از زلزله می‌باشد. هرچه جابجایی ماندگار بزرگتر باشد، بازسازی سازه دشوارتر است [۳۸]. در اشکال ۲۳ و ۲۴ میزان این جابجایی ماندگار نوک پایه برای ۱۲ حالت تقویت برای تمامی پایه‌های پل نمایش داده شده است.



شکل ۲۳: نمودار میله‌ای جابجایی ماندگار نوک پایه برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای طولی پل.



شکل ۲۴: نمودار میله‌ای جابجایی ماندگار نوک پایه برای ۱۲ حالت تقویت برای پایه پل در راستای عرضی پل.

نمودارهای ۲۳ و ۲۴ نشان می‌دهند در خصوص شاخص جابجایی ماندگار نوک پایه، در پایه با ارتفاع کوتاه (مانند ۷/۵ متری) تقویت با ورق CFRP و میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر بسیار زیادی داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۷/۵ متری تقویت 3CFRP بلند (مانند ۱۵ متری) تقویت با ورق CFRP و هم میلگرد SMA در بهبود عملکرد تاثیر بسیار زیادی داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۱۵ متری تقویت 3CFRP-SMA-D16 به میزان ۲۳۹/۱٪ نسبت به حالت بدون تقویت و ۹۳/۷٪ نسبت به حالت تقویت 3CFRP بهبود عملکرد داشته است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر استفاده از ورق الیاف مسلح پلیمری کربن (CFRP) تا سه لایه و میلگردهای حافظه‌دار شکلی (SMA) در دو سایز ۱۲ و ۱۶ میلیمتر به عنوان تقویت در پایه‌های بتنی پل‌ها با ارتفاع مختلف تحت مولفه‌های افقی و قائم زلزله مورد بررسی عددی قرار گرفت. نتایج حاصل شده به شرح زیر می‌باشد:

۱- در صورتی که در پایه پل صرفاً از ورق‌های CFRP برای تقویت استفاده گردد، این ورق‌ها باعث بهبود عملکرد ظرفیت پایه پل در ۵ شاخص Sa(T1)، شکل‌پذیری، منحنی شکنندگی، جابجایی ماکزیمم و جابجایی ماندگار می‌گردد. با افزایش تعداد لایه‌های ورق CFRP از یک لایه به دو لایه این بهبود عملکرد در اکثر نمونه‌ها افزایش قابل توجهی داشته است اما با افزایش لایه‌های ورق از دو لایه به سه لایه این بهبود عملکرد پایه کم تاثیر می‌باشد. به عنوان نمونه در خصوص شاخص Sa(T1) در پایه ۱۵ متری، یک لایه ورق CFRP باعث افزایش ۹٪، دو لایه ۱۶٪ و سه لایه ۱۷٪ این شاخص نسبت به حالت بدون تقویت گردیده است. همچنین در خصوص شاخص جابجایی ماندگار، یک لایه ۳۲۸٪، دو لایه ۳۸۵٪ و سه لایه ۴۰۵٪ نسبت به حالت بدون تقویت بهبود یافته است. لذا با توجه به هزینه‌بر بودن

اجرای ورق های CFRP، در صورتی که در یک پایه، صرفاً از ورق های CFRP برای تقویت استفاده گردد، بهترین نوع تقویت دو لایه CFRP می باشد.

۲- در صورتی که در پایه پل صرفاً از میلگردهای SMA برای تقویت استفاده گردد، در خصوص ۳ شاخص Sa(T1)، شکل پذیری و منحنی شکنندگی استفاده از این میلگردها تاثیرگذار بوده است. به عنوان نمونه در پایه ۷/۵ متری شاخص Sa(T1) برای تقویت با میلگرد SMA با سایز ۱۲ میلیمتر، ۲۲٪ و برای تقویت با میلگرد SMA با سایز ۱۶ میلیمتر، ۳۶٪ نسبت به حالت بدون تقویت بهبود یافته است. در خصوص دو شاخص جابجایی ماکزیمم و جابجایی ماندگار، استفاده از میلگرد SMA، تاثیر بسیار زیادی در بهبود عملکرد داشته است. به عنوان نمونه در پایه ۱۵ متری شاخص جابجایی ماندگار برای تقویت با میلگرد SMA با سایز ۱۲ میلیمتر ۴۱٪ و برای تقویت با میلگرد SMA با سایز ۱۶ میلیمتر، ۴۷٪ نسبت به حالت بدون تقویت بهبود یافته است. بنابراین در صورتی که پایه پل صرفاً با میلگرد SMA تقویت شده باشد، بهترین نوع تقویت، میلگرد SMA با سایز ۱۶ میلیمتر می باشد.

۳- در صورتی که در پایه پل برای تقویت هم از ورق CFRP و هم میلگرد SMA استفاده گردد، در خصوص ۲ شاخص Sa(T1) و شکل پذیری این نوع تقویت تاثیرگذار و در خصوص ۳ شاخص منحنی شکنندگی، جابجایی ماکزیمم و جابجایی ماندگار، بسیار تاثیرگذار می باشد. به عنوان نمونه در پایه ۷/۵ متری شاخص جابجایی ماندگار برای تقویت با سه لایه CFRP و میلگرد قطر ۱۶ میلیمتر به میزان ۵۶۱/۵٪ نسبت به حالت بدون تقویت بهبود یافته است. بنابراین در صورتی که پایه پل هم با ورق CFRP و هم با میلگرد SMA تقویت شده باشد، بهترین نوع تقویت سه لایه CFRP به همراه میلگرد SMA با سایز ۱۶ میلیمتر می باشد.

مراجع

- [1] Comartin, C., Greene, M., and Tubbesing, S. (1995). The Hyogo-Ken Nanbu earthquake preliminary reconnaissance report. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute
- [2] Huang, Y.R., Mao, I.S. (2010). Exploring the Deterioration Factors of RC Bridge Decks: A Rough Set Approach. *Computer Aided-Civil and Infrastructure*, 10.1111/j.1467-8667.2010.00665.x.
- [3] Hollaway, L.C., and Teng, G.J. (2008), *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites*. Elsevier, pp. 352-385.
- [4] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., Lam, L. (2002). FRP : Strengthened RC Structures, *Frontiers in Physics*, 266. ui.adsabs.harvard.edu.
- [5] Daghash, S. M., Ozbulut, O. D. (2017). Bond-slip behavior of superelastic shape memory alloys for near-surface mounted strengthening applications. *Smart materials and structures*. 26(3)035020.
- [6] Muntasir Billah A.H.M., Shahria, M., Alam. (2012). Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars. *J.conbuildmat*.2011.10.020.
- [7] Shrestha, K.C., et al. (2013). Feasibility of Cu-Al-Mn superelastic alloy bars as reinforcement elements in concrete beams. *Smart Materials and Structures*, 22(2): p. 025025.
- [8] Omidian, P., Saffari, H. (2014). Fragility curves for seismic assessment of reinforced concrete buildings with shape memory alloy in regular, torsional irregularity and extreme torsional irregularity. *Journal of Structural and Construction* 10.22065/jsce.2018.121215.1485.
- [9] Daiyu Wang, Zhenyu Wang. (2016). Seismic performance of CFRP-confined circular high-strength concrete columns with high axial compression ratio. *J.conbuildmat*.2016.12.108.
- [10] Muntasir Billah, A.H.M, Alam, S. (2018). Probabilistic seismic risk assessment of concrete bridge piers reinforced with different types of shape memory alloys. *J.engstruct*.2018.02.034.
- [11] Mahmoudabadi, M., Sakhaeipour, F. (2018). Numerical Analysis on the Influence of the Cross Section of Ultimate Capacity of Reinforced Concrete Columns Reinforced with CFRP. *Journal of Structural and Construction*, 10.22065/JSCE.2018.138522.1603.
- [12] Miralami, M. Esfahani, M. (2019). Strengthening of circular RC column-foundation connections with GFRP/ SMA bars and CFRP wraps. *J.compositesb*.2019.05.063.
- [13] Xiang, N., Chen, Xu. (2020). Probabilistic seismic fragility and loss analysis of concrete bridge piers with superelastic shape memory alloy-steel coupled reinforcing bars. *J.engstruct*.2020.110229.
- [14] Salkhordeh, M., Govahi, E., Mirtaheri, M. (2021). Seismic fragility evaluation of various mitigation strategies proposed for bridge piers. *J.istruc*.2021.05.041.j.istruc.2021.05.04.

- [15] Hui Q, Yixiang Y, Changbin Y. (2022). Experimental study on the seismic performance of self-centering bridge piers incorporating ECC and superelastic SMA bars in the plastic hinge regions. *Structures*, doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.031.
- [16] Golshan, M., Yousefinezhad, H., Mansoori, B., Bazae, A. (2023). Investigating the Finite Elements of Reinforced Concrete Column Reinforcement Under Cyclic Loading Using NSM Method and FRP Wrap in Different Installation Situations. *Journal of Structural and Construction*, 10.22065/jsce.2023.392039.3076.
- [17] Vahedi, M. Zolfagharysaravi, S. Ebrahimian, M. Saiidi, S. (2024). Experimental-analytical investigation of accelerated bridge construction concrete columns with self-centering Fe-SMA bars subjected to near-fault ground motions. *Engineering Structures*. doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117127.
- [18] Seismostruct, static and dynamic nonlinear analysis of framed structures software. (2022). seismosoft.com.
- [19] Abaqus, G. (2011). Abaqus 6.11. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA
- [20] Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, (2014). Similar maps of bridges and bridge decks with spans of 10 to 25 meters, No, 294.
- [21] Mander, J. B., M. J. Priestley, and R. Park. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8).
- [22] Menegotto M., Pinto P.E. (1973). Method of Analysis for Cyclically Loaded R. C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending.
- [23] Office of Technical Affairs Deputy Technical, Criteria Codification and Earthquake Risk Reduction Affairs Bureau. (2006). The Guideline for Design Specification of Strengthening RC Buildings Using Fiber Reinforced Polymers (FRP), No, 345.
- [24] Song, G., N. Ma, and H.-N. Li. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures*, 28(9), 1266-1274.
- [25] CSI Bridge, Bridge Analysis, Design and Rating. (2021). Version 23.3.1, Build 1784. Csiamerica.com, USA.
- [26] Office of the Deputy for Technical Affairs Bureau of Technical Affairs and Standards. (2000). Standard Load of Bridges, No, 139.
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). AASHTO. Publication Code: LRFDUS-6
- [28] Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. (2002). Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural dynamics, the Joun Blume Earthquake Engineering center, Report NO.151, 31(2002) 491-514.
- [29] Fema, Federal Emergency Management Agency, <https://www.fema.gov/>.
- [30] Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. (2016). ASCE 7-16, 2016, American Society of Civil Engineers.
- [31] Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses. (2011). Venture NCJ.2011. NIST GCR. 2011:11-917.
- [32] Federal Emergency Management Agency. November (2009). FEMAP695, Applied Technology council, Quantification of Building Seismic Performance.
- [33] Shome, N., Cornell, CA. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. Ph.D. dissertation, Stanford University.
- [34] PEER Ground Motion Database - PEER Center, The Pacific Earthquake Engineering Research Center, <https://ngawest2.berkeley.edu/site>.
- [35] Abdoul R. Ghotbi. (2016). Response sensitivity analyses of skewed bridges with and without considering soil-structure interaction. *Structures*. doi.org/10.1016/j.istruc.2015.12.002.
- [36] Atmaca, B. Yurdakul, M. Ates, S. (2014). Nonlinear dynamic analysis of base isolated cable-stayed bridge under earthquake excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.07.013.
- [37] Washington, Federal Emergency Management Agency. November, (2000). FEMA-356, Applied Technology council, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of building.
- [38] Xing, E., Yan, Z., Li, T., & Yang, L. (2017). Research on residual drift response of steel frames under strong earthquakes. *Journal of Vibroengineering*, 19(6), 4365-4377.