

Effect of dimensional aspect ratio and gravity load intensity on the cyclic behavior of single-column piers of concrete bridges reinforced with shape memory alloy

Farshad Homaei^{1*}, Reza Abbasifar², Seyed Hesam Madani³, Abbas Sivandipour⁴

1-Associate professor, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2-M.Sc. student, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

3-Associate professor, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

4-Associate professor, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

ABSTRACT

In this article, the performance of single-column circular concrete bridge piers, using steel materials and shape memory alloys, was examined under the influence of cyclic loads. A set of bridge piers with various height-to-diameter ratios of 0.2, 0.4, and 0.6 was considered under gravity load-to-axial capacity ratios of 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6. A comparison was made between two scenarios: using shape memory alloy and conventional steel as the reinforcing bars for the piers. The analysis of the piers was conducted based on their lateral displacement in a cyclic manner, and the reactions at their supports were recorded. According to the results obtained, it was observed that the maximum shear capacity of the bridge piers increases with an increase in the height-to-diameter ratio. Furthermore, by employing reinforcement made from shape memory alloys, the maximum shear capacity of the piers decreases by 5% to 15% compared to a similar model with steel reinforcement. Additionally, using reinforcement made from shape memory alloys enhances the ductility capacity of the bridge piers, and the normalized hysteresis energy is a function of the diameter and the intensity of the gravity load applied to the piers. The use of reinforcement made from shape memory alloys resulted in a reduction of 30% to 80% in the amount of normalized hysteresis energy of the piers.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 December 2024

Revise Date: 28 February 2025

Accept Date: 06 April 2025

Keywords:

Shape memory alloy,
Bridge pier,
Cyclic quasi-static analysis,
Ductility capacity, Normalized
hysteretic energy

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.489185.3577

*Corresponding author: Farshad Homaei.

Email address: f.homaei@kgut.ac.ir

تأثیر نسبت ابعادی و شدت بار ثقلی در رفتار چرخه‌ای پایه‌های تک ستونی پل‌های بتنی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار

فرشاد همائی^{۱*}، رضا عباسی فر^۲، سید حسام مدنی^۳، عباس سیوندی پور^۴

۱-دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۳-دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

در این مقاله، عملکرد پایه پل‌های بتنی دایره‌ای شکل تک ستونی، با استفاده از مصالح فولادی و آلیاژهای حافظه‌دار، تحت اثر بارهای چرخه‌ای بررسی شده است. مجموعه‌ای از پایه‌های پل با نسبت قطر به ارتفاع مختلف شامل ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶، تحت نسبت بار ثقلی به ظرفیت محوری ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است. مقایسه بین دو حالت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار و فولادی معمولی به عنوان آرماتور تقویتی پایه‌ها صورت می‌پذیرد. تحلیل پایه‌ها در اثر تغییر مکان جانبی آن‌ها و به صورت چرخه‌ای و ثبت عکس‌العمل تکیه‌گاهی آن‌ها صورت می‌گیرد. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که بیاشینه ظرفیت پایه‌های پل با افزایش نسبت قطر به ارتفاع افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با بکارگیری آرماتور ساخته شده با آلیاژهای حافظه‌دار، بیاشینه ظرفیت برشی پایه‌ها بین ۵٪ تا ۱۵٪ نسبت به مدل مشابه با آرماتور فولادی کاهش می‌یابد. همچنین با بکارگیری آرماتور ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار، میزان ظرفیت شکل‌پذیری پایه‌های پل افزایش می‌یابد و میزان انرژی هیستریزس نرمال شده تابعی از قطر و شدت بار ثقلی وارد بر پایه‌ها است. استفاده از آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار باعث کاهش ۳۰ تا ۸۰ درصدی در مقدار انرژی هیستریزس نرمال شده پایه‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار، پایه پل، تحلیل شبه استاتیکی چرخه‌ای، ظرفیت شکل‌پذیری، انرژی هیستریزس نرمال شده.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: 10.22065/jsce.2025.489185.3577	۱۴۰۳/۰۹/۲۶	۱۴۰۳/۱۲/۱۰	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۴/۱۰/۳۰
10.22065/jsce.2025.489185.3577					
		*نویسنده مسئول:		فرشاد همائی	
		پست الکترونیکی:		f.homaei@kgut.ac.ir	

۱- مقدمه

پل‌ها، اجزای کلیدی در شبکه‌های حمل و نقل می‌باشند که آسیب رسیدن به آن‌ها در اثر زلزله‌های شدید می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر ظرفیت بخش‌های جاده‌ای گردد. امروزه، ساخت پل‌ها با استفاده از مصالح بتنی رو به افزایش بوده به نحوی که در اکثر شهرها، پل‌های جدیدالاحداث با این مصالح ساخته می‌شوند. برای این نوع از پل‌ها، پایه‌ها به عنوان المانی در نظر گرفته می‌شوند که علاوه بر تحمل بارهای ثقیلی، وظیفه تحمل بارهای جانبی ناشی از زلزله را نیز بر عهده داشته و از این رو باید به طراحی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای پایه پل‌ها توجه فراوانی شود. در اثر وقوع زلزله‌های بزرگ، معمولاً سطح عملکرد پایه‌ها فراتر از حالت بهره‌برداری بی‌وقفه رفته که به موجب آن، معمولاً تغییرشکل‌های بزرگ و ماندگار در پایه‌ها اتفاق می‌افتد. این مسئله در پایه پل‌های بتن مسلح تقویت شده با فولاد معمولی امری طبیعی است. با این حال، آلیاژ جدیدی از مواد هوشمند به نام آلیاژهای حافظه‌دار^۱ (SMA) به عنوان یک مصالح تقویت‌کننده برای افزایش عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتنی معرفی شده است. آلیاژهای حافظه‌دار، به دلیل توانایی بالای آن‌ها در حفظ تغییرشکل‌های بزرگ (افزایش کرنش تا ۸ درصد) و قابلیت بازگشت به شکل اولیه هنگام گرم کردن [۱] به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از آلیاژ حافظه‌دار (که به آلیاژهای سوپر الاستیک نیز معروف است)، می‌تواند جایگزین مطلوبی برای حذف تغییرشکل‌های باقی مانده ناشی از زلزله‌های شدید در سازه‌ها باشد.

دسراج و دلمونت [۲] به بررسی اثر بخشی میل مهارهای ساخته شده با آلیاژ حافظه‌دار در کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها، مطالعاتی صورت دادند. مشاهده گردید که میله‌های مهار کننده از جنس آلیاژ حافظه‌دار در محدود کردن جابه‌جایی نسبی در پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها موثر هستند. در پژوهش دیگری [۳] قابلیت فوق الاستیسیته و میرایی آلیاژ برای توسعه یک سیستم تکمیلی جدید و اتلاف انرژی برای پل‌های کابلی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که میراگرهای ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار می‌توانند رفتار لرزه‌ای پل را به طور قابل توجهی کنترل نمایند. سعیدی و همکارانش [۴] به صورت آزمایشگاهی از طریق آزمون میز لرزه، بر روی تقویت ناحیه پلاستیک در پایه پل‌ها با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار، مطالعاتی را انجام دادند. نتایج نشان داد که پایه پل‌های بتن مسلح تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار تقریباً تمام تغییرشکل‌های پلاستیک را پس از جابجایی به حالت اولیه باز می‌گرداند. همچنین ترکیب آلیاژ حافظه‌دار و بتن انعطاف‌پذیر با کامپوزیت سیمانی می‌تواند عملکرد بهتری برای پایه پل به همراه داشته باشد که توسط یکسری از آزمایش‌های چرخه‌ای مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. لیو و همکارانش [۵] در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از کابل‌های ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار در پایه پل‌ها به عنوان تقویت‌کننده و المانی در جهت کاهش لرزش پایه‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این کابل‌ها می‌تواند لرزش را به‌طور موثری کاهش دهد. شرسا و همکارانش [۶] بر روی آلیاژهای حافظه‌دار در ناحیه مفصل پلاستیک و عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌ها مطالعاتی انجام دادند. نتایج نشان داد که حداکثر تغییرشکل پایه‌ها به دلیل مدول الاستیسیته پایین آلیاژ مربوطه و ظرفیت اتلاف انرژی پایین می‌باشد. منتصر بالله و شهریاعلم [۷] به ارزیابی احتمالی خطر لرزه‌ای پایه پل‌های بتن مسلح تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. نتایج بیانگر این بود که تمامی پایه پل‌های تقویت شده با آلیاژ مربوطه در حداکثر سطح زلزله، احتمال ریزش بسیار پایینی دارد. جونگ و همکاران [۸] از یک تکنیک محصورسازی پایه پل‌های بتن مسلح، با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار، به عنوان موثرترین روش برای جایگزین کردن محصورسازی انجام دادند. نتایج نشان داد که محصور کردن پایه پل‌ها با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در کاهش آسیب‌های لرزه‌ای و بهبود عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌های بتن مسلح مقاوم‌سازی شده و تقویت شده، که در معرض زلزله‌های شدید هستند، بسیار مؤثر است. شرسا و همکاران [۹] آزمایش‌هایی بروی مهارهایی از جنس آلیاژهای حافظه‌دار در پایه پل‌ها برای ارزیابی اثر بخشی در کاهش پاسخ پل انجام دادند. مشاهده گردید که مهارکننده‌های فوق الاستیک می‌توانند به طور موثر جابجایی‌ها و شدت ضربه را در پایه‌ها کاهش دهند و همچنین به دلیل فوق الاستیک بودن، مهارکننده‌ها پس از رخدادهای لرزه‌ای قوی، نیازی به تعویض ندارند. لیو و همکارانش [۱۰] کاربرد کابل‌های ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار سوپر الاستیک در پایه پل‌های بتن مسلح پیش تنیده را برای بهبود عملکرد لرزه‌ای آن‌ها مورد بررسی قرار دادند. مشاهده گردید که افزایش نسبت نیروی پیش تنیدگی و حداکثر نسبت نیروی کششی در محدوده‌های مشخص در پایه‌ها می‌تواند

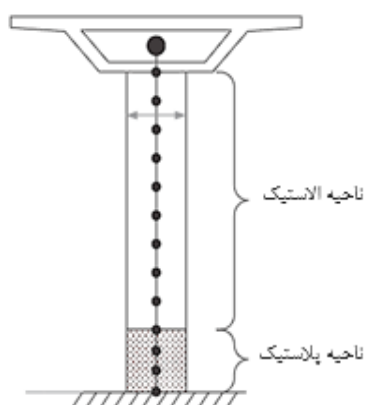
¹ Shape memory alloy

قابلیت برگشت پذیری را افزایش دهد. هاچا و همکاران [۱۱] بر روی ستون‌های بتن مسلح محصور شده با آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار مطالعاتی انجام دادند. مشاهده شد که ستون‌های بتن مسلح محصور شده با مارپیچ آلیاژ حافظه‌دار افزایش چشمگیری در شکل‌پذیری و مقاومت، نسبت به ستون‌های بتن مسلح محصور نشده دارد. کیان و همکاران [۱۲] برای بهبود ظرفیت تغییرشکل و اتلاف انرژی، کاهش تغییرشکل باقیمانده و آسیب پلاستیک، و از سرگیری عملکرد عادی بدون تعمیر یا با حداقل تعمیر پس از زلزله، یک پایه قابلیت خود محوری مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار و سیمان مهندسی کامپوزیتی پیشنهاد دادند. لی و همکاران [۱۳] یک سیستم جدید پل با پایه‌های تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار مهارکننده کابل با آلیاژ حافظه‌دار پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که با نصب مهارکننده‌های ساخته شده با آلیاژ حافظه‌دار در پل، می‌توان نیروی کوبنده بین عرشه‌های مجاور را به طور موثر کاهش داد. وانیاچی و همکاران [۱۴] به طور کامل عملکرد لرزه‌ای یک پل تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار را با در نظر گرفتن سه پیکربندی آرماتورگذاری مختلف ارزیابی کردند. رسول‌پور و همکارانش [۱۵] در مطالعه خود، رفتار لرزه‌ای پایه پل‌های بتن مسلح را از طریق منحنی‌های شکنندگی ارائه دادند. نتایج نشان داد که پایه‌های تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار با محدود کردن کرنش‌های باقی مانده، عملکرد پایه پل را پس از زلزله حفظ می‌کند، همچنین حداکثر جابجایی‌های ماندگار در سیستم را نیز کاهش می‌دهد.

همانطور که در مطالعات بالا دیده شد، کاربرد مصالح آلیاژ حافظه‌دار در تقویت پایه‌های بتنی پل‌ها نقش مؤثری دارد. با این حال، اثرات ناشی از نسبت ابعادی پایه‌ها و شدت بارهای وارد بر آن، بر روی عملکرد پایه‌های تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار مورد بررسی چندانی قرار نگرفته است. از این رو، در این مقاله، به بررسی رفتار چرخه‌ای پایه پل‌های بتنی دایره‌ای شکل، با نسبت قطر به ارتفاع ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶، تحت نسبت بار ثقلی به ظرفیت محوری ۰/۰۵، الی ۰/۶ پرداخته می‌شود. در این راستا، دو حالت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار و فولادی معمولی به عنوان آرماتور تقویتی پایه‌ها مقایسه می‌شود. ابتدا پایه‌ها تحت اثر شدت بار ثقلی وارد بر آن‌ها تحلیل می‌شوند. در گام بعد، تحلیل پایه‌ها در اثر تغییرمکان جانبی آن‌ها و به صورت چرخه‌ای و بر اساس الگوی ارائه شده توسط دستورالعمل ATC-24 [۱۶] صورت می‌پذیرد و در هر گام، عکس‌العمل تکیه‌گاهی پایه ثبت می‌گردد. سپس بر اساس نمودارهای به دست آمده، در خصوص ظرفیت نیرویی هر پایه (V_{max}) و جابجایی متناظر با آن (δ_{Vmax})، بیشینه جابجایی ممکن (δ_{max}) در هر حالت، ظرفیت شکل‌پذیری (μ) و انرژی هیستریزس نرمال شده پایه‌ها بحث و بررسی صورت می‌گیرد و تأثیر استفاده از آلیاژ SMA مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- معرفی مدل پایه‌های پل مورد مطالعه

مدل مورد استفاده در این مقاله در شکل ۱ نمایش داده شده است که مشخصات هندسی آن از کار تحقیقاتی ژیانگ و همکاران [۱۷] اقتباس شد. مطابق شکل، پایه تک ستونی مرجع دارای ارتفاع ۱۰ متر بوده که در بالای آن (موقعیت قرار گیری عرشه)، بار ثقلی وارد شده و در پایین، تکیه‌گاه گیردار قرار می‌گیرد. در این پایه، درصد آرماتور استفاده شده به ۱٪ محدود می‌گردد. توجه شود که با توجه به قیمت بالای آلیاژهای حافظه‌دار، سعی می‌گردد تا میزان استفاده از آن‌ها در سازه به حداقل ممکن برسد. از این رو، در پایه‌ای که از این آلیاژ در آن به کار می‌رود، موقعیت قرارگیری آلیاژها به ناحیه مفصل پلاستیک پایه محدود می‌شود. مطابق روابط پیشنهادی [۱۸]، در فاصله حدود ۲ متری از پایین آن، پتانسیل تشکیل مفصل پلاستیک وجود دارد. در مطالعه حاضر، پایه مرجع مذکور در قطرهای ۲، ۴ و ۶ متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، نسبت بار ثقلی به ظرفیت محوری در کلیه قطرهای مورد مطالعه با مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود.



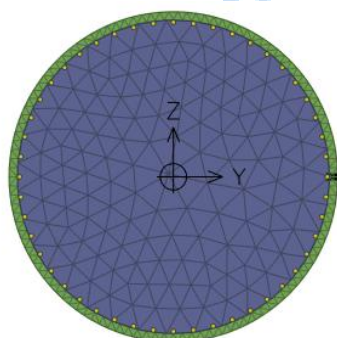
شکل ۱ - شمای کلی پایه‌های تک ستونی

۳- مدل سازی

مدل‌سازی پایه‌ها در نرم‌افزار OpenSees [۱۹] صورت پذیرفت. در این خصوص، پس از ایجاد هندسه پایه، مقاطع و المان‌های مناسب به آن اختصاص داده شد. برای مقاطع پایه، از مدل فایبری استفاده گردید. همانطور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، مقطع پایه از یک هسته بتنی که در محدوده آرماتورهای طولی محصور شده است تشکیل شده که در پیرامون آن، پوشش بتنی قرار می‌گیرد. مدل رفتاری بتن هسته و پوشش بر مبنای مدل Concrete01withSITC از کتابخانه مصالح نرم‌افزار ایجاد گردید. این مدل بر مبنای مدل تک محوری Kent-Scott-Park بوده که در آن اثرات ترک خوردگی و نیز افت سختی تحت سیکل‌های بارگذاری و باربرداری لحاظ می‌گردد. در جدول ۱، مشخصات مصالح بتنی مورد استفاده نمایش داده شده است که مشخصات آن از کار تحقیقاتی ژیانگ و همکاران [۱۷] اقتباس شد.

جدول ۱ - مشخصات مصالح بتنی [۱۷]

پارامتر	نماد	هسته (محصور شده)	کاور (نامحصور)
بیشینه مقاومت فشاری	f_{cc}	۳۳/۵ مگاپاسکال	۲۶/۸ مگاپاسکال
کرنش در بیشینه مقاومت	ϵ_{cc}	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲
مقاومت نهایی	f_{cu}	۲۲/۸ مگاپاسکال	۵/۴ مگاپاسکال
کرنش در مقاومت نهایی	ϵ_{cu}	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵



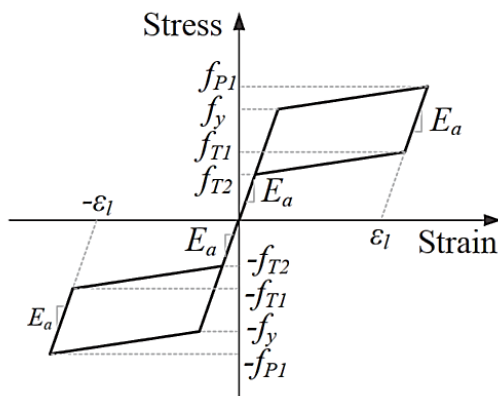
شکل ۲ - نمای کلی مقطع پایه پل‌ها

آرماتورها نیز با تعبیه فایبر مربوطه در موقعیت مشخص شده در مقطع، مدل سازی شدند. برای آرماتورهای فولادی از مدل رفتاری *ReinforcingSteel* از کتابخانه مصالح نرم افزار استفاده شد که این مدل قابلیت شبیه سازی کمانش موضعی، خستگی در سیکل های پایین و نیز سخت شوندگی ایزوتروپیک را داراست. در جدول ۲، مشخصات مورد استفاده برای این مصالح نمایش داده شده است.

جدول ۲- مشخصات آرماتورهای فولادی [۱۷]

مقدار	نماد	پارامتر
۴۰۰ مگاپاسکال	f_y	تنش تسلیم
۶۰۰ مگاپاسکال	f_u	تنش نهایی
۲۰۰ گیگاپاسکال	E_s	مدول الاستسیته اولیه
۶ گیگاپاسکال	E_{sh}	مدول الاستسیته در شروع سخت شوندگی کرنشی
۰/۰۱	ϵ_{sh}	کرنش در شروع سخت شوندگی کرنشی
۰/۱	ϵ_{ult}	کرنش در بیشینه تنش
۱۰	l_{sr}	نسبت لاغری
۱/۰	β	ضریب بزرگنمایی برای منحنی تنش-کرنش در حالت کمانش
۰/۶	r	ضریب کاهش کمانشی
۰/۸	γ	ثابت کمانش

برای آرماتورهای ساخته شده از آلیاژهای حافظه دار، از مدل رفتاری *Self-Centring* استفاده گردید. مطابق جزئیات نمایش داده شده در شکل ۳، مصالح مورد نظر قابلیت شبیه سازی رفتار هیستریزس مربوط به آلیاژهای حافظه دار که عمدتاً به صورت پرچمی است را داراست. در این مطالعه، آلیاژ مورد نظر از جنس نیکل-تیتانیوم [۲۰] انتخاب گردید که مشخصات مکانیکی مربوط به آن در جدول ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- مدل رفتاری SMA در نرم افزار OpenSees

جدول ۳- مشخصات آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ حافظه دار (Ni-Ti) [۲۰]

مقدار	نماد	پارامتر
۶۲/۵ گیگاپاسکال	E_a	مدول اولیه SMA
۴۰۱ مگاپاسکال	f_y	تنش های شروع آستنیت به مارتنزیت SMA
۵۱۰ مگاپاسکال	f_{P1}	تنش های تکمیلی آستنیت به مارتنزیت SMA
۳۷۰ مگاپاسکال	f_{T1}	تنش های شروع SMA مارتنزیت به آستنیت
۱۳۰ مگاپاسکال	f_{T2}	تنش های نهایی SMA مارتنزیت به آستنیت
۶/۰	$\epsilon_l (\%)$	طول کرنش سوپر الاستیک

برای مدل المان پایه، از المان force-based beam column استفاده شد که در آن، از پلاستیسیتة توزیع شده (ناشی از مقاطع فایبری) در طول المان استفاده می‌شود. همچنین اثرات P- Δ نیز برای آن در نظر گرفته شد. به منظور بررسی نقش سربار ناشی از بارهای ثقیل، مقدار آن (LF) به صورت نسبتی از ظرفیت پایه و به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته شد:

$$LF = P / f_{cc} A_g \quad (1)$$

در این مطالعه، مقادیر LF به صورت ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود.

۴- روش تحلیل و ارزیابی

پس از ایجاد مدل اجزاء محدود از پایه‌ها، تحلیل آن‌ها در نرم‌افزار OpenSees و در دو مرحله صورت می‌پذیرد. در گام نخست، پایه‌ها تحت اثر شدت بار ثقیل وارد بر آن‌ها تحلیل می‌شوند. در این مرحله، کل بار ثقیل به تدریج و در ۱۰ مرحله به پایه وارد می‌گردد. در گام بعد، تحلیل پایه‌ها در اثر تغییرمکان جانبی آن‌ها و به صورت چرخه‌ای صورت می‌پذیرد. برای این منظور، بالای پایه‌ها تحت الگوی تغییرمکان پیشنهاد شده در دستورالعمل ATC-24 [۱۶] جایجا شده و در هر گام تحلیل، عکس‌العمل تکیه‌گاهی پایه ثبت می‌گردد. لازم به ذکر است که تحلیل مرحله دوم در ۱۰۰۰۰ گام بارگذاری صورت پذیرفته است.

نتایج حاصل از تحلیل، در قالب نمودارهای نیرو-تغییرمکان پایه‌ها استخراج می‌شود که از روی آن‌ها می‌توان در خصوص ظرفیت نیرویی هر پایه (V_{max}) و جابجایی متناظر با آن ($\delta_{V_{max}}$)، و نیز بیشینه جابجایی ممکن (δ_{max}) در هر حالت بحث و بررسی نمود. همچنین، ظرفیت شکل‌پذیری هر پایه به صورت رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y} \quad (2)$$

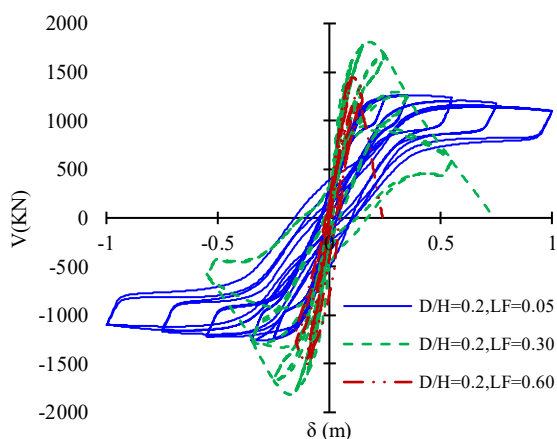
که در آن، δ_y جابجایی متناظر با حد تسلیم پایه است. علاوه بر این، انرژی هیستریزس نرمال شده پایه‌ها به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه خواهد بود:

$$E_N = \frac{\int dE_h}{V_y \delta_y} \quad (3)$$

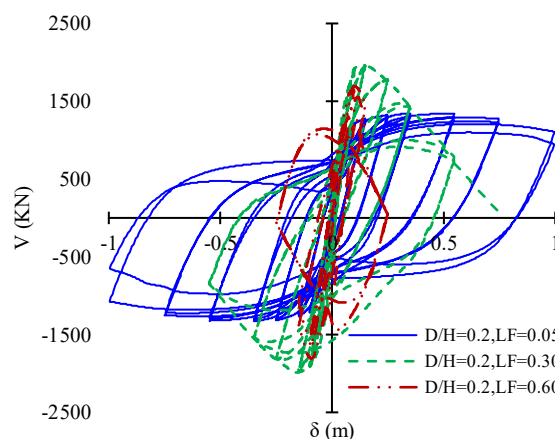
که در آن، V_y ظرفیت نیرویی حد تسلیم پایه بوده که از نمودار دوخطی پوش جانبی پایه‌ها قابل محاسبه است و $\int dE_h$ میان انرژی هیستریزس تجمعی پایه است که از محاسبه مساحت زیر نمودارهای هیستریزس سازه قابل محاسبه می‌باشد.

۵- بحث و بررسی بر روی نتایج

پس از انجام تحلیل‌های مربوطه، نمودار نیرو-تغییرمکان مربوط به هر پایه استخراج گردید. برای نمونه، در شکل ۴-الف و ب، به ترتیب، نمودار نیرو-تغییرمکان مربوط به پایه‌های تقویت شده با آرماتور فولادی و. آلیاژ شکل‌پذیر، با نسبت قطر به ارتفاع ۰/۲ تحت سه شدت بار نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که کلیه نتایج ارائه شده در این بخش بر مبنای مدل‌های مورد مطالعه در این مقاله (پایه‌های بتنی تک ستونی) بوده و تعمیم آن‌ها به سایر پایه‌های پل بایستی با احتیاط و ارزیابی‌های دقیق صورت پذیرد.



(ب)

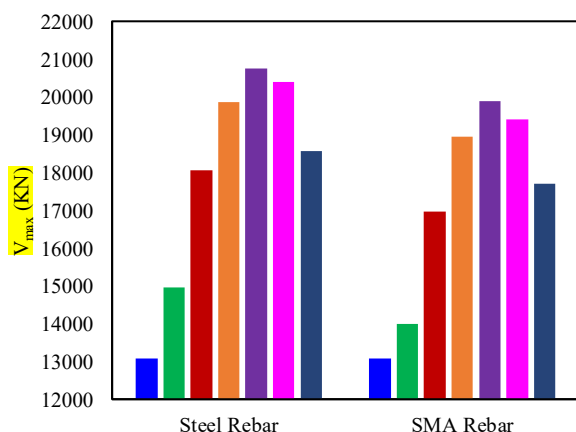


(الف)

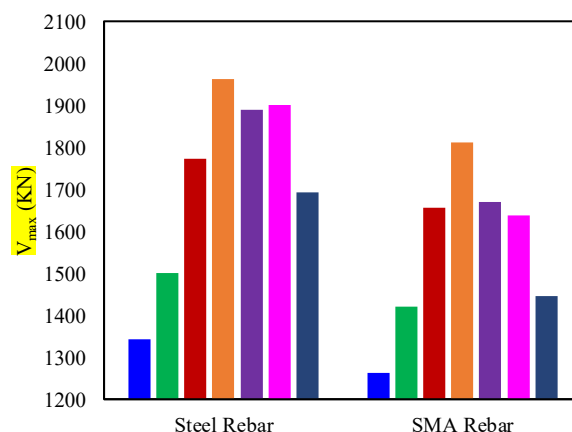
شکل ۴ - نمودار نیرو-تغییر مکان برای پایه با $D/H=0.2$ و تحت نسبت بار ثقلی های $LF=0.05, 0.3, 0.6$. (الف) پایه تقویت شده با آرماتور فولادی (ب) پایه تقویت شده با آرماتور SMA

۵-۱- بیشینه ظرفیت نیرویی پایه ها (V_{max})

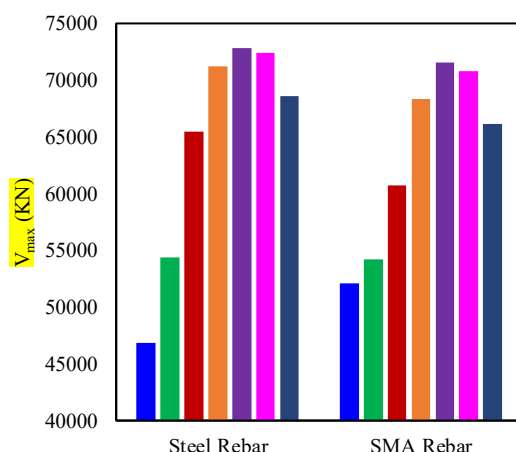
در نمودارهای نمایش داده شده در شکل، بیشینه ظرفیت نیرویی هر پایه متناظر با یک نسبت قطر به ارتفاع، نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، فارغ از نوع آرماتور مورد استفاده در پایه ها، ظرفیت برشی پایه با افزایش شدت بار وارده، افزایش می یابد به نحوی که بیشترین مقدار در حالت $LF=0.3$ دیده می شود. با این حال، برای شدت های بزرگتر برای LF ، روند کاهش در میزان ظرفیت برشی پایه ها دیده می شود. در مقایسه تأثیر استفاده از آرماتور فولادی و آلیاژ حافظه دار می توان عنوان نمود که، در حالت $D/H=0.2$ ، با بکارگیری آرماتور SMA، بیشینه ظرفیت برشی پایه ها بین ۵٪ (برای $LF=0.1$) تا ۱۵٪ (برای $LF=0.6$) نسبت به مدل مشابه با آرماتور فولادی کاهش می یابد. با این حال، با افزایش قطر پایه، میزان تغییر در ظرفیت برشی پایه کاهش می یابد به نحوی که با در نظر گرفتن $D/H=0.4$ ، با بکارگیری آرماتور SMA، بیشینه کاهش در ظرفیت برشی پایه ها به ۶٪ (نسبت به مدل مشابه با آرماتور فولادی) محدود می شود. در حالت $D/H=0.6$ ، مشاهده می شود که علی رغم کاهش ۵٪ در ظرفیت برشی پایه ها تحت $LF \geq 0.2$ ، در حالت $LF=0.05$ ، ظرفیت پایه به میزان ۱۰٪ نسبت به مدل مشابه با آرماتور فولادی افزایش می یابد. همچنین برای حالت $LF=0.10$ ، ظرفیت برشی تقریباً مشابهی با پایه تقویت شده با آرماتور فولادی مشاهده می گردد.



(ب)



(الف)



(ج)

■ LF=0.05 ■ LF=0.1 ■ LF=0.2 ■ LF=0.3 ■ LF=0.4 ■ LF=0.5 ■ LF=0.6

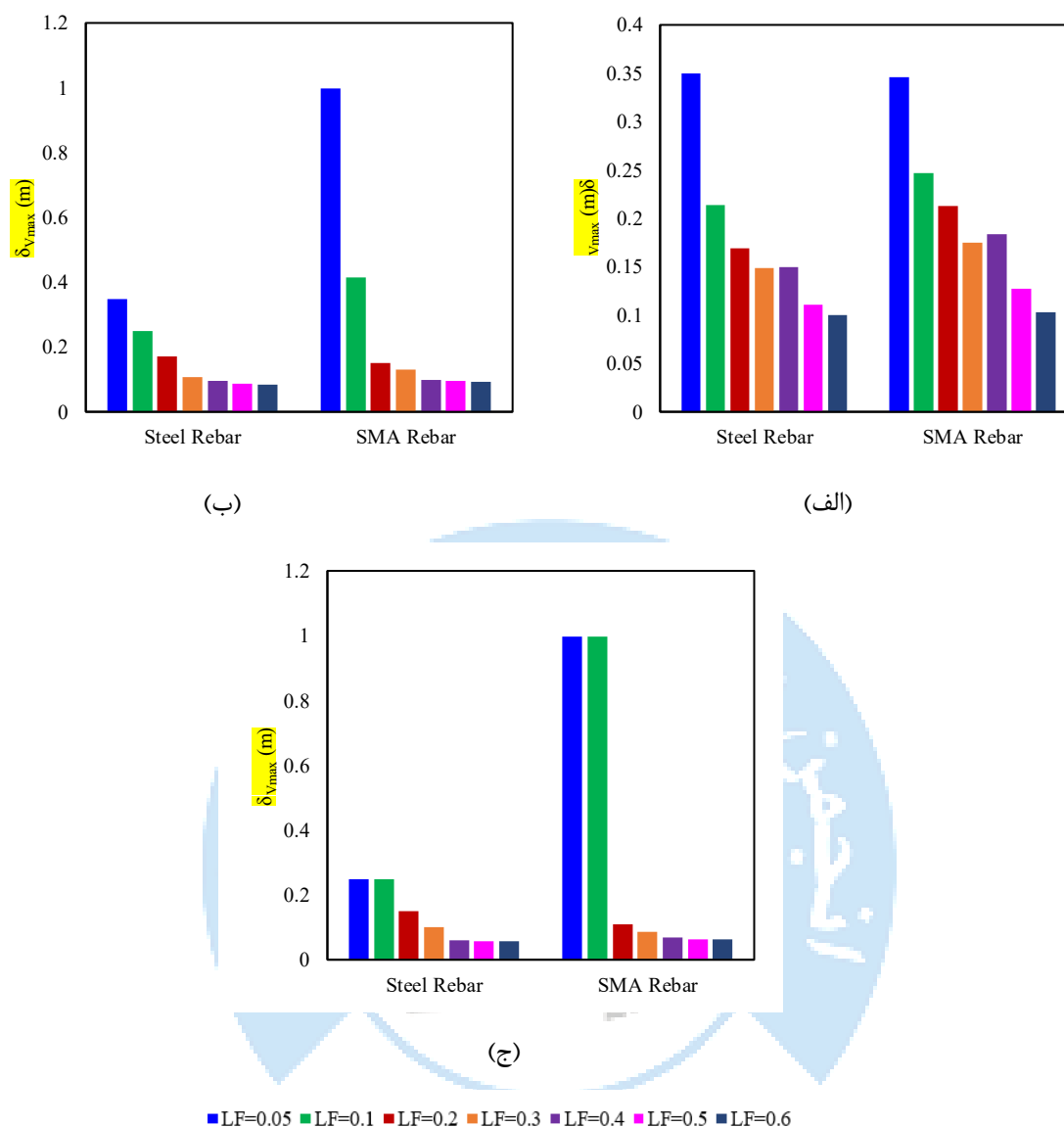
شکل ۵ - بیشینه ظرفیت نیرویی پایه‌ها با (الف) $D/H=0.2$ (ب) $D/H=0.4$ (ج) $D/H=0.6$

۵-۲- جابجایی متناظر با بیشینه ظرفیت نیرویی پایه‌ها (δV_{max})

در روش‌های طراحی بر اساس عملکرد، لازم است تا برآوردی از میزان خسارت در نقطه عملکردی مورد نظر در سازه صورت پذیرد. از این رو، در این بخش، میزان جابجایی (خسارت) در نقطه بیشینه ظرفیت نیرویی پایه‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۶-الف مشاهده می‌گردد که سیر تغییرات جابجایی متناظر با بیشینه ظرفیت پایه‌ها در هر دو نوع آرماتور فولادی و SMA روند یکسانی را دنبال می‌کند به نحوی که در حالت $LF=0.05$ بیشترین جابجایی در پایه‌ها (حدود ۳۵ سانتیمتر) دیده می‌شود اما، با افزایش شدت بار ثقلی، از میزان δV_{max} کاسته می‌شود. با مقایسه تأثیر نوع آرماتور استفاده شده در میزان جابجایی پایه‌ها مشاهده می‌شود که، علی‌رغم یکسان بودن δV_{max} در پایه‌های تحت شدت بار $LF=0.05, 0.60$ ، برای سایر شدت‌های بار وارده، متوسط افزایش ۲۰ درصدی در جابجایی بالای پایه به واسطه استفاده از آلیاژ SMA در پایه‌ها دیده می‌شود.

با افزایش نسبت قطر به ارتفاع پایه‌ها به 0.4 (شکل ۶-ب) مشاهده می‌شود که میزان جابجایی در پایه‌های دارای آرماتور SMA نسبت به مدل مشابه با فولاد معمولی افزایش می‌یابد اما، این میزان افزایش برای پایه‌های تحت شدت بار کمتر به مراتب بیشتر از سایر حالات بارگذاری است. مطابق نتایج حاصله، در حالت $LF=0.05$ بیشترین δV_{max} حاصل می‌شود که در مقایسه به مدل مشابه با آرماتور فولادی، به میزان $2/85$ برابر شده است. این میزان افزایش برای پایه تحت شدت بار $LF=0.1$ به $1/66$ برابر محدود می‌شود و برای شدت بارهای بیشتر تقریباً با مدل دارای آرماتور فولادی برابری می‌کند.

در شکل ۶-ج جابجایی متناظر با بیشینه ظرفیت نیرویی پایه‌ها با نسبت $D/H=0.6$ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مقایسه با سایر نسبت قطر، افزایش ۳ برابری در جابجایی مربوطه برای شدت بارهای $LF=0.05, 0.1$ در حالت استفاده از آلیاژ SMA دیده می‌شود. با این حال، برای شدت بارهای بیشتر، مقادیر δV_{max} برای هر دو حالت استفاده از آلیاژ SMA و فولادی تقریباً یکسان خواهد بود.

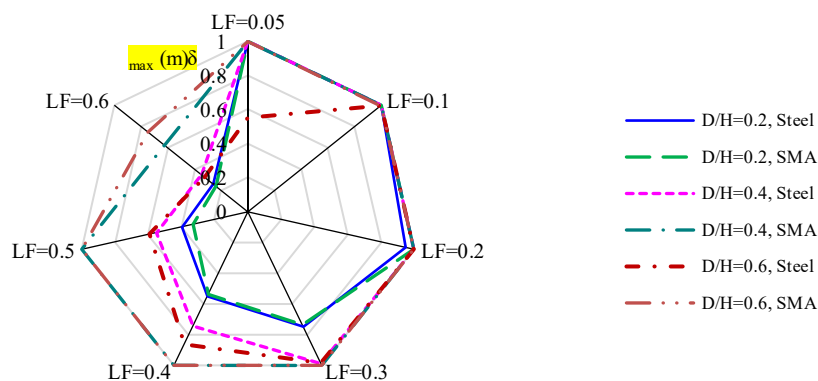


شکل ۶ - جابجایی متناظر با بیشینه ظرفیت نیرویی پایه‌ها با (الف) $D/H=0.2$ (ب) $D/H=0.4$ (ج) $D/H=0.6$

۵-۳ - بیشینه جابجایی ممکن در پایه‌ها (δ_{max})

همانطور که در بالا ذکر شد، در این پژوهش، کلیه تحلیل‌های انجام شده تحت تغییر مکان جانبی چرخه‌ای پیشنهاد شده در دستورالعمل ATC-24 [۱۶] صورت پذیرفته است که مقدار بیشینه دامنه جابجایی در چرخه‌های متوالی از کم به زیاد تغییر می‌کند. با این حال، مشاهده گردید که در بسیاری از پایه‌ها، قبل از اعمال تمامی چرخه‌های بارگذاری، ظرفیت نیرویی پایه صفر شده و تحلیل متوقف می‌شود. از این رو، در این قسمت بیشینه جابجایی پایه‌ها (δ_{max}) گزارش می‌گردد. مطابق نتایج ارائه شده در شکل مشاهده می‌گردد که برای پایه‌های تقویت شده با آرماتور فولادی و SMA دارای $D/H=0.2$ ، بیشینه جابجایی ۱ متری در تحلیل برای شدت بارهای $0.05 \leq LF \leq 0.2$ قابل حصول است اما، با افزایش شدت بار وارده، دامنه δ_{max} کاهش می‌یابد. میزان کاهش δ_{max} برای کلیه شدت بارهای وارده به جز $LF=0.5$ برای هر دو مدل تقویت شده با آرماتور فولادی و SMA تقریباً با هم برابر است. در حالت $LF=0.5$ ، کاهش بیشتری در پایه دارای آلیاژ SMA دیده می‌شود به نحوی که در مقایسه با مدل مشابه با آرماتور فولادی مقدار δ_{max} در حدود ۱۵٪ کاهش بیشتری پیدا می‌کند. با افزایش قطر پایه‌ها، مشاهده می‌شود که قابلیت تحمل پایه‌ها برای بیشینه جابجایی اعمال شده در تحلیل افزایش می‌یابد. با این

حال، میزان افزایش در δ_{max} برای پایه‌های تقویت شده با آلیاژ SMA نسبت به مدل مشابه فولادی بیشتر است. براساس مقایسه‌های صورت گرفته، در حالت $D/H=0.4$ ، افزایش ۳۵ الی ۸۰ درصدی در δ_{max} برای شدت بارهای $LF \geq 0.4$ مشاهده می‌شود که این مقدار در حالت $D/H=0.6$ ، به دو برابر مقادیر مذکور نیز می‌رسد.



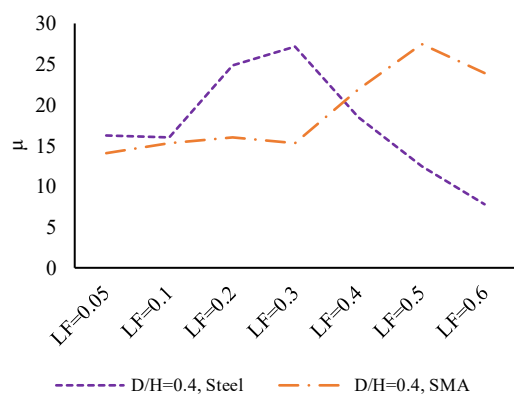
شکل ۷ - جابجایی بیشینه پایه‌ها

۴-۵ - ظرفیت شکل‌پذیری پایه‌ها (μ)

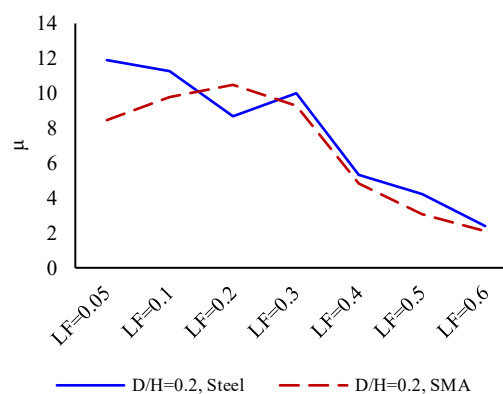
در شکل مقادیر ظرفیت شکل‌پذیری پایه‌های مورد مطالعه تحت شدت بارهای ثقیلی گوناگون نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت $D/H=0.2$ ، با افزایش نسبت LF ، از میزان ظرفیت شکل‌پذیری پایه‌های تقویت شده با آرماتور فولادی کاسته شده اما، در پایه‌های تقویت شده با آرماتور SMA، این مقدار ابتدا در بازه $0.05 \leq LF \leq 0.30$ افزایش یافته تا به بیشینه مقدار $1.0/5$ می‌رسد و سپس برای $LF > 0.30$ کاهش می‌یابد. در مقایسه با آرماتورهای فولادی، استفاده از آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ SMA باعث تغییرات ۵ تا ۴۰ درصدی در میزان ظرفیت شکل‌پذیری می‌شود که بسته به شدت بار وارده، به صورت افزایشی یا کاهش‌ی تغییر می‌نماید.

در حالت $D/H=0.4$ مشاهده می‌گردد که در حالت استفاده از آرماتور فولادی، مقدار ظرفیت شکل‌پذیری پایه‌ها تحت $0.05 \leq LF \leq 0.10$ ثابت بوده و به مقدار حدودی $\mu=15$ محدود می‌شود. این مقدار در حالت استفاده از آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ SMA برای بازه $0.05 \leq LF \leq 0.30$ به دست می‌آید. برای $0.20 \leq LF \leq 0.30$ مقدار ضریب شکل‌پذیری در حالت استفاده از آرماتور فولادی افزایش یافته اما، برای مقادیر بیشتر LF ، روند نزولی در پیش می‌گیرد. این مسئله در حالت استفاده از آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ SMA صرفاً افزایشی می‌باشد. با مقایسه μ بین مدل‌های مشابه با آرماتور فولادی و SMA، نتیجه می‌شود که برای $0.05 \leq LF \leq 0.40$ کاهش ظرفیت شکل‌پذیری در حالت استفاده از آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ SMA بین ۲۵٪ تا ۶۰٪ نسبت به مدل مشابه با آرماتور فولادی دیده می‌شود اما، برای نسبت بار به ظرفیت‌های بزرگ‌تر، افزایش ۶۰ تا ۹۰ درصدی در μ مشاهده می‌شود.

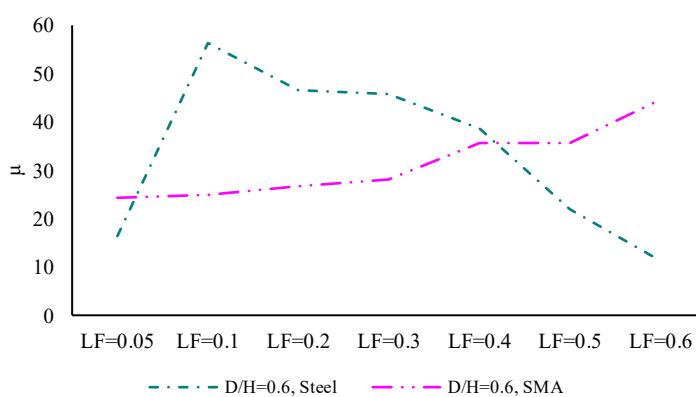
در حالت $D/H=0.6$ مشاهده می‌گردد که در حالت استفاده از آرماتور فولادی، مقدار ظرفیت شکل‌پذیری پایه‌ها با افزایش شدت LF کاهش می‌یابد. با این حال، این روند برای پایه‌های تقویت شده با آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ SMA صرفاً افزایشی می‌باشد. همچنین مقایسه μ بین مدل‌های مشابه با آرماتور فولادی و SMA، نتیجه مشابه به حالت $D/H=0.4$ را به دست می‌دهد که در مقایسه با آرماتورهای فولادی، مقدار μ بسته به شدت بار ثقیلی، $0.4/1$ تا $1/1$ برابر خواهد شد.



(ب)



(الف)



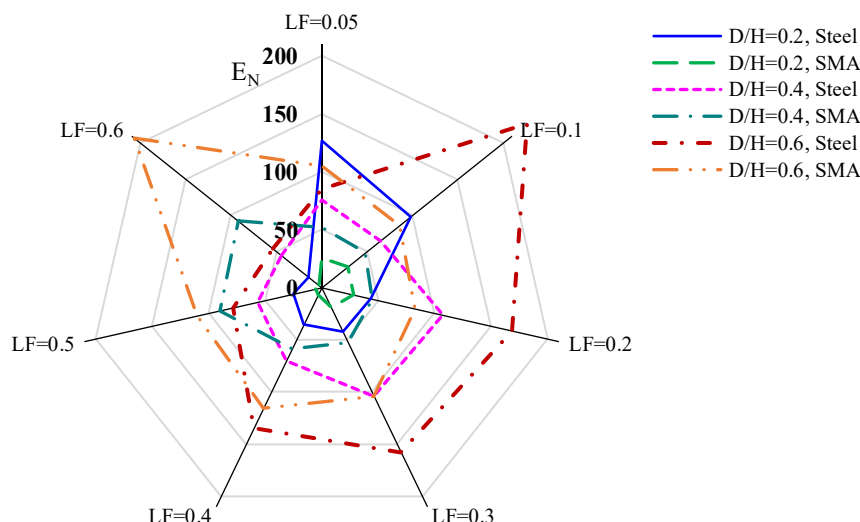
(ج)

شکل ۸ - ظرفیت شکل پذیری پایه‌ها، (الف) $D/H=0.2$ ، (ب) $D/H=0.4$ ، (ج) $D/H=0.6$

۵-۵- انرژی هیستریزس نرمال شده پایه‌ها (E_N)

میزان جذب و استهلاک انرژی در سازه به واسطه رفتار غیرخطی آن، در قالب مفهوم انرژی هیستریزس بیان می‌شود. نتایج حاصله برای E_N در پایه‌های مورد مطالعه در شکل ۹ نمایش داده شده است. برای حالت $D/H=0.2$ مشاهده می‌گردد که با افزایش شدت LF ، مقدار E_N کاهش می‌یابد. این مسئله برای هر دو حالت استفاده از آرماتور فولادی و SMA صادق است. با این حال، پایه‌های تقویت شده با آرماتور SMA به مراتب مقادیر کوچکتری از E_N را در مقایسه با حالت تقویت شده با آرماتور فولادی به دست می‌دهند. در این راستا، کاهش ۴۵ تا ۸۰ درصدی در میزان انرژی هیستریزس نرمال شده دیده می‌شود.

با افزایش نسبت قطر به ارتفاع به مقدار $0/4$ مشاهده می‌گردد که بیشترین میزان E_N برای پایه‌های تقویت شده با آرماتور فولادی، تحت شدت بار $LF=0.2, 0.3$ رخ می‌دهد. این مسئله برای حالت استفاده از آرماتور SMA در شدت بار $LF=0.5, 0.6$ دیده می‌شود. در مقایسه با آرماتورهای فولادی، استفاده از آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ SMA باعث کاهش ۳۰ تا ۶۰ درصدی در مقدار E_N ، تحت شده بار $0.05 \leq LF \leq 0.40$ و در حالت استفاده از آرماتور SMA شده اما، برای شدت بارهای بیشتر، افزایش ۶۰ تا ۹۰ درصدی در مقدار E_N به وقوع می‌پیوندد. این مسئله کمابیش در حالت $D/H=0.6$ نیز مشاهده می‌گردد.



شکل ۹- انرژی هیستریزس نرمال شده پایه‌ها

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی تأثیر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار به عنوان آرماتور تقویتی در پایه‌های پل‌ها پرداخته شد. در این راستا اثرات ثانویه ناشی از نسبت ابعادی پایه‌ها و شدت بارهای وارد بر آن، بر روی عملکرد پایه‌های نیز مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن نسبت قطر به ارتفاع ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ و نسبت بار ثقلی به ظرفیت محوری ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ برای پایه‌ها، در خصوص ظرفیت نیرویی هر پایه (V_{max}) و جابجایی متناظر با آن ($\delta_{V_{max}}$)، بیشینه جابجایی ممکن (δ_{max}) در هر حالت، ظرفیت شکل‌پذیری (μ) و انرژی هیستریزس نرمال شده پایه‌ها بحث و بررسی صورت پذیرفت. بر اساس نتایج حاصله، موارد زیر به عنوان جمع‌بندی نهایی، گزارش می‌شوند:

۱. بیشینه ظرفیت پایه‌های پل با افزایش نسبت D/H افزایش می‌یابد، این در حالی است که اثر نسبت بار به ظرفیت در مقدار بیشینه ظرفیت پایه‌ها تأثیر گذار خواهد بود. همچنین، با بکارگیری آرماتور SMA، بیشینه ظرفیت برشی پایه‌ها بین ۵٪ تا ۱۵٪ نسبت به مدل مشابه با آرماتور فولادی کاهش می‌یابد.
۲. با افزایش قطر پایه‌های پل، جابجایی متناظر با نقطه بیشینه ظرفیت افزایش پیدا می‌کند. در این راستا، افزایش شدت بار ثقلی باعث تشدید این میزان جابجایی می‌شود.
۳. با بکارگیری آرماتور SMA میزان بیشینه جابجایی ممکن در پایه‌های پل، در مقایسه با نمونه‌های مشابه فولادی افزایش می‌یابد.
۴. با بکارگیری آرماتور SMA میزان ظرفیت شکل‌پذیری پایه‌های پل افزایش می‌یابد. ظرفیت شکل‌پذیری در قطرهای بزرگتر پایه و تحت شدت‌های بار ثقلی بالاتر، افزایش بیشتری پیدا می‌کند.
۵. میزان انرژی هیستریزس نرمال شده تابعی از قطر و شدت بار ثقلی وارد بر پایه‌ها است. استفاده از آرماتورهای ساخته شده از آلیاژ SMA باعث کاهش ۳۰ تا ۸۰ درصدی در مقدار انرژی هیستریزس نرمال شده پایه‌ها می‌شود.

منابع

[۱] Janke L, Czaderski C, Motavalli M, Ruth J. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—Overview, limits and new ideas. *Materials and Structures*. 2005;38:578-92.

- [۲] DesRoches R, Delemont M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. *Engineering Structures*. 2002;24:325-32.
- [۳] Sharabash AM, Andrawes BO. Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges. *Engineering Structures*. 2009;31:607-16.
- [۴] Saiidi MS, O'Brien M, Sadrossadat-Zadeh M. Cyclic Response of Concrete Bridge Columns Using Superelastic Nitinol and Bendable Concrete. *ACI Structural Journal*. 2009;106.
- [۵] Liu A-R, Liu C-H, Fu J-Y, Pi Y-L, Huang Y-H, Zhang J-P. A method of reinforcement and vibration reduction of girder bridges using shape memory alloy cables. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2017;17:1750076.
- [۶] Shrestha B, Li C, Hao H, Li H. Performance-based seismic assessment of superelastic shape memory alloy-reinforced bridge piers considering residual deformations. *Journal of Earthquake Engineering*. 2017;21:1050-69.
- [۷] Billah AHMM, Alam MS. Probabilistic seismic risk assessment of concrete bridge piers reinforced with different types of shape memory alloys. *Engineering Structures*. 2018;162:97-108.
- [۸] Jung D, Wilcoski J, Andrawes B. Bidirectional shake table testing of RC columns retrofitted and repaired with shape memory alloy spirals. *Engineering Structures*. 2018;160:171-85.
- [۹] Shrestha B, He L-X, Hao H, Bi K, Ren W-X. Experimental study on relative displacement responses of bridge frames subjected to spatially varying ground motion and its mitigation using superelastic SMA restrainers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;109:76-88.
- [۱۰] Liu X, Li J, Tsang H-H, Wilson J. Enhancing seismic performance of unbonded prestressed concrete bridge column using superelastic shape memory alloy. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018;29:3082-96.
- [۱۱] El-Hacha R, Abdelrahman K. Behaviour of circular SMA-confined reinforced concrete columns subjected to eccentric loading. *Engineering Structures*. 2020;215:110443.
- [۱۲] Qian H, Ye Y, Yan C, Jin G, Li C, Shi Y. Experimental study on the seismic performance of self-centering bridge piers incorporating ECC and superelastic SMA bars in the plastic hinge regions. *Structures*. 2022;46:1955-67.
- [۱۳] Li S, Wang J-q, Shahria Alam M. Multi-criteria optimal design and seismic assessment of SMA RC piers and SMA cable restrainers for mitigating seismic damage of simply-supported highway bridges. *Engineering Structures*. 2022;252:113547.
- [۱۴] Wanniarachchi S, Prabatha T, Karunathilake H, Li S, Alam MS, Hewage K. Life Cycle Thinking-Based Decision Making for Bridges under Seismic Conditions. II: A Case Study on Bridges with Superelastic SMA RC Piers. *Journal of Bridge Engineering*. 2022;27:04022044.
- [۱۵] Rassoulpour S, Shiravand MR, Safi M. Proposed seismic-resistant dual system for continuous-span concrete bridges using self-centering cores. *Engineering Structures*. ۲۷۴:۱۱۵۱۸۱;۲۰۲۳.
- [۱۶] Applied Technology Council (ATC). Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures (ATC-24). Redwood City, CA1992.
- [۱۷] Xiang N, Chen X, Alam MS. Probabilistic seismic fragility and loss analysis of concrete bridge piers with superelastic shape memory alloy-steel coupled reinforcing bars. *Engineering Structures*. 2020;207:110229.
- [۱۸] Billah AHMM, Shahria Alam M. Plastic hinge length of shape memory alloy (SMA) reinforced concrete bridge pier. *Engineering Structures*. 2016;117:321-31.
- [۱۹] McKenna F. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*. 2011;13:58-66.
- [۲۰] Alam MS, Youssef MA, Nehdi M. Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements. *Engineering Structures*. 2008;30:3399-411.