

The effect of shape memory alloys in improving the seismic behavior of cable-stayed bridges

Hossein Khosravi^{1,*}, Arezoo Ayesteh², Hamid Pirmoghan³

1- Assistant Professor, Faculty Member, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

2- MSc, Department of Civil Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

3- PhD Student, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMAs), as intelligent materials with reversible deformation capability, high ductility, and exceptional energy dissipation capacity, have recently emerged as effective solutions for enhancing the seismic performance of structures—particularly cable-stayed bridges. This study investigates the impact of incorporating SMA elements into the cables of a cable-stayed bridge featuring A-shaped towers and a box-girder deck. A detailed numerical model of the bridge was developed in ABAQUS, and nonlinear dynamic analysis was performed under the El Centro earthquake record. In the proposed model, NiTi-based SMA components were embedded at the cable anchorage zones to utilize their superelastic behavior and damping properties in the bridge's seismic response. Compared to conventional energy dissipation systems, SMAs offer unique advantages such as corrosion and fatigue resistance, self-centering capability through thermal activation, and no need for replacement after seismic events. The results indicate that the use of SMA leads to an average 18% reduction in deck displacement, a 22% decrease in bending moments at tower bases, and a 27% increase in effective damping. Furthermore, comparison with a reference bridge confirms the accuracy of the numerical model in replicating natural frequencies, mode shapes, and internal force distributions. Overall, the integration of SMA into cable systems presents a promising strategy for vibration control and seismic resilience in cable-stayed bridges.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 September 2025

Revise Date: 02 November 2025

Accept Date: 06 December 2025

Keywords:

Shape Memory Alloy
Super Elastic
Cable Bridge
Seismic Behavior
Performance Improvement

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.543418.3807

*Corresponding author: Hossein Khosravi

Email address: h.khosravi@hsu.ac.ir

تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار در بهبود رفتار لرزه‌ای پل‌های کابلی

حسین خسروی^{۱*}، آرزو آیسته^۲، حمید پیرمغان^۳

۱- استادیار، عضو هیات علمی گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نیشابور، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) به عنوان مصالح هوشمند با قابلیت تغییر شکل برگشت پذیر و ظرفیت بالای جذب انرژی، در سال‌های اخیر به عنوان گزینه‌ای مؤثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، تأثیر استفاده از SMA در کابل‌های پل کابلی با برج‌های A شکل و عرشه جعبه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سازی عددی پل در نرم افزار ABAQUS انجام شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت رکورد زلزله El Centro صورت پذیرفته است. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که به عنوان موادی هوشمند شناخته شده‌اند نسبت به سیستم‌های متداول مستهلک کننده انرژی، دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند و کاربرد وسیعی در کنترل سازه‌ها به خصوص کنترل پاسخ لرزه‌ای پل‌ها پیدا کرده‌اند. عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه به وسیله اعمال دما، شکل پذیری بالا، قابلیت استهلاک انرژی زیاد از جمله مزایا و ویژگی‌های این مواد است. در مدل پیشنهادی، آلیاژ نایتینول (NiTi) در نواحی انتهایی کابل‌ها به کار گرفته شده تا رفتار فوق‌ارتجاعی و خاصیت میرایی آن در پاسخ لرزه‌ای پل لحاظ گردد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از SMA موجب کاهش میانگین ۱۸٪ در تغییر مکان نسبی عرشه، کاهش ۲۲٪ در لنگر خمشی پایه برج‌ها، و افزایش ۲۷٪ در میرایی مؤثر سازه شده است. همچنین، مقایسه با داده‌های پل مرجع نشان دهنده تطابق مناسب در فرکانس‌های طبیعی، مدهای ارتعاشی و نیروهای داخلی بوده و صحت مدل سازی عددی را تأیید می‌نماید. در مجموع، به کارگیری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم کابل‌ها می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در کنترل ارتعاشات و افزایش ایمنی لرزه‌ای پل‌های کابلی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار شکلی، فوق ارتجاعی، پل کابلی، رفتار لرزه‌ای، بهبود عملکرد

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.543418.3807	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.543418.3807	۱۴۰۵/۰۴/۳۱	۱۴۰۴/۰۹/۱۵	۱۴۰۴/۰۹/۱۵	۱۴۰۴/۰۸/۱۱	۱۴۰۴/۰۶/۱۸
			حسین خسروی		*نویسنده مسئول:	
			h.khosravi@hsu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

ایران کشوری با خطر لرزه خیزی بالا به حساب می آید، بنابراین طراحی سازه‌ها به صورت مقاوم در برابر زلزله و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود از جمله نیازهای اساسی است. پل‌ها از جمله سازه‌های مهم و از شریان‌های حیاتی کشور به شمار می‌روند که برای طراحی و بهسازی لرزه‌ای آن‌ها باید تمهیدات مناسب اندیشیده شود. از طرفی پل‌ها در جهات طولی و بعضاً عرضی، پیرو ارتعاشی طبیعی نسبتاً بزرگی دارند. از این رو استفاده از مستهلک کننده‌های انرژی به قصد کاهش تقاضا و مقیدکننده‌های فولادی به قصد افزایش سختی چندان کارا نخواهد بود و به همین دلیل گرایش به استفاده از المان‌های حافظه‌دار شکلی برای کنترل رفتار لرزه‌ای آن‌ها رو به افزایش است. خاصیت سوپرالاستیک آلایژ حافظه‌دار شکلی به این مواد اجازه می‌دهد که تغییر شکل‌های بسیار بزرگ را در حالت سوپرالاستیک تحمل کنند و امکان بازگرداندگی المان‌ها را فراهم آورند. بعلاوه این مواد می‌توانند مقدار قابل توجهی از انرژی را نیز تلف کنند. آلایژهای حافظه‌دار شکلی به عنوان یک ماده هوشمند دارای خصوصیات یگانه و رفتارهای بسیار جالبی است که می‌تواند برای کاهش صدمات زلزله روی سازه‌ها به شکل‌های گوناگون استفاده شود و مشکلات و محدودیت‌ها را تا حد بسیار زیادی برطرف کند.

محققان در سال‌های اخیر به بررسی امکان استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی در کاربردهای مهندسی سازه و زلزله نیز پرداخته‌اند. اولین کار در این زمینه به تحقیق گراسر و کوتزارلی^۱ در سال ۱۹۹۱ بر می‌گردد که آنها امکان استفاده از ماده نایتینول را به عنوان یک میراگر زلزله پیشنهاد دادند. آنها اثر فرکانس و تاریخچه بارگذاری را بر روی میزان استهلاک انرژی سیم‌های نایتینول بررسی کردند [۱]. وایلد^۲ و همکاران در یک تحقیق تحلیلی در سال ۲۰۰۰ مواد حافظه‌دار شکلی را در جداسازی پایه پل‌های بزرگراهی مرتفع به کار بردند. این جداسازها از ترکیب بالشتک لاستیکی و میله‌های SMA^۳ تشکیل شده بود [۲]. دسراچز و دلمونت^۴ در سال ۲۰۰۲ میله‌های حافظه‌دار شکلی را برای بهسازی لرزه‌ای پل‌های با دهانه ساده به کار بردند. آن‌ها با توجه به ضعف‌های مقیدکننده‌های سنتی فولادی، تصمیم به استفاده از آلایژ حافظه‌دار شکلی برای کاهش تغییر مکان‌های عرشه پل با تکیه‌گاه ساده گرفتند [۳]. در سال ۲۰۰۵، اندروز و دسراچز^۵ از مقیدکننده‌های حافظه‌دار شکلی برای جلوگیری از افتادن عرشه پل استفاده کردند. آن‌ها با انجام یک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی یک پل چند قابه با روسازه بتنی جعبه‌ای نشان دادند که المان‌های حافظه‌دار شکلی نسبت به مقید کننده‌های مرسوم فولادی، عملکرد مناسب‌تری در کنترل تغییر مکان‌های نسبی درزها و به تبع آن جلوگیری از افتادن عرشه دارند [۴]. چوی^۶ و همکاران نوع جدیدی از جداسازهای لرزه‌ای را با به کارگیری آلایژهای حافظه‌دار شکلی و برای رفع کمبودهای جداسازهای هسته سربی متداول در سال ۲۰۰۶ ارائه کردند [۵]. سعیدی و وانگ^۷ نوعی ستون بتن مسلح با میلگردهای حافظه‌دار شکلی را در سال ۲۰۰۶ پیشنهاد دادند. آن‌ها در نظر داشتند مشکل تغییر شکل‌های ماندگار میلگردهای فولادی را در ستون‌های بتن مسلح معمول حل کنند [۶]. اندروز و دسراچز با یک تحلیل حساسیت و همچنین یک مطالعه‌ی موردی، عملکرد مقید کننده‌های حافظه‌دار شکلی را با سایر گزینه‌های بهسازی لرزه‌ای پل‌ها از جمله میراگرها مقایسه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عملکرد مقیدکننده‌های حافظه‌دار شکلی در کاهش تغییر مکان نسبی عرشه و جلوگیری از باز شدن درزهای میانی پل‌ها در حین زلزله از سایر گزینه‌ها مطلوب‌تر است. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که خاصیت سوپر الاستیک این آلایژها بر میرایی تولید شده توسط میراگرها برتری دارد [۷]. در سال ۲۰۰۷، اندروز و دسراچز، عملکرد مهارکننده‌های لرزه‌ای ساخته شده از آلایژ حافظه‌دار (SMA) را با سایر روش‌های بهسازی لرزه‌ای پل‌ها مقایسه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از SMA باعث کاهش تغییر مکان‌های دائمی و افزایش ظرفیت

¹ Graesser and Cozzarelli

² Wilde

³ Shape Memory Alloy

⁴ DesRoches and Delemont

⁵ Andrawes and DesRoches

⁶ Choi

⁷ Wang

جذب انرژی پل در برابر زلزله می‌شود. [۸]. شاراباش^۱ و اندروز^۲ سال ۲۰۰۹ عملکرد میراگرهای SMA را در کنترل لرزه‌ای پل‌های کابلی بررسی کردند. نتایج تحلیل عددی نشان داد که این میراگرها می‌توانند تغییر مکان‌های عرشه و خمش پای برج را تا ۶۵٪ کاهش دهند. [۹]. نونز^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۵ در پژوهشی اثر آزمایش میز ارتعاش روی مدل مقیاس کوچک پل کابلی با کمک فنرهای مینیاتوری سوپرلاستیک SMA را بررسی کردند. نتایج نشان داد میرایی مؤثرتر و بازمرکز بندی (self-centering) بهتر نسبت به میراگرهای معمول حاصل می‌شود و پاسخ فرکانسی سازه کنترل می‌گردد [۱۰]. ژو^۴ و علم^۴ طی پژوهشی در سال ۲۰۲۴، مطالعه ای با رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پایه‌های پل با تقویت ترکیبی SMA ارائه دادند. نتایج نشان داد که استفاده از میله‌های SMA می‌تواند به‌طور قابل توجهی احتمال آسیب و احتمال خرابی را کاهش دهد و عملکرد لرزه‌ای پایه پل را بهبود بخشد. [۱۱]. همچنین در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۴ به مطالعه یک سیستم لغزش جدید برای پایه‌های پل با استفاده از کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار (SMA) و کابل‌های ضد ریزش (CP) پرداختند که این سیستم علاوه بر مزایای پایه‌های لغزشی موجود، دارای ساختاری ساده‌تر و عملکرد اضافی برای جلوگیری مؤثر از لغزش بیش از حد پایه بود. نتایج نشان داد که استفاده از آن سیستم می‌تواند عملکرد لرزه‌ای پایه‌های پل را در برابر حرکات زمینی نزدیک به گسل بهبود بخشد [۱۲]. اندروز در سال ۲۰۲۴ در پژوهشی به بررسی عملکرد میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA) در پل‌های با دهانه بلند پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از SMA در اتصالات عرشه و برج موجب کاهش قابل توجه پاسخ لرزه‌ای و افزایش پایداری سازه می‌شود [۱۳]. لی و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۲۲ یاتاقان‌های غلتشی مجهز به سیم‌های SMA را برای پل کابلی معرفی کردند. تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای نشان داد که این سیستم باعث کاهش احتمال خرابی و افزایش قابلیت بازگشت‌پذیری سازه پس از زلزله می‌شود [۱۴]. سان و همکاران در سال ۲۰۲۲ در یک مرور جامع، روش‌های کاهش ارتعاش کابل‌های پل را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از SMA یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد و زلزله در کابل‌های کشیده است [۱۵]. در سال ۲۰۲۲، شری و همکاران با استفاده از داده‌های پایش سلامت سازه، مدل اجزای محدود پل‌های کابلی را به‌روزرسانی کردند. این روش موجب افزایش دقت تحلیل‌های لرزه‌ای و بهبود پیش‌بینی رفتار سازه در برابر تحریکات دینامیکی شد [۱۶].

۲- مشخصات هندسی و مکانیکی پل

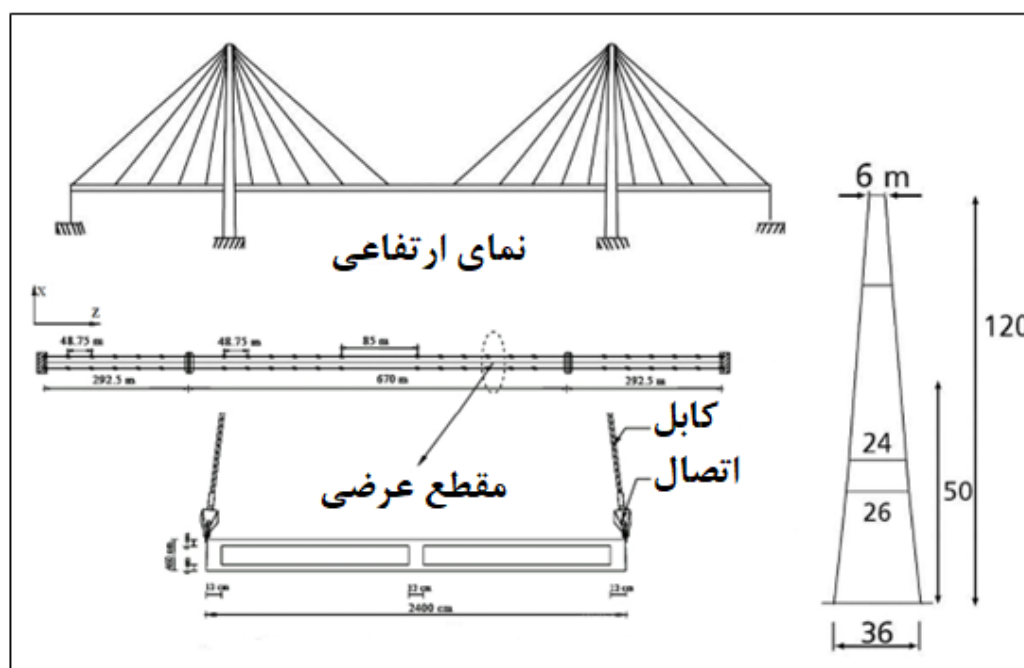
پل کابلی ایستای مورد مطالعه دارای عرشه‌ای جعبه‌ای با گوشه‌های قائم و طول کلی عرشه آن برابر ۱۲۵۵ متر است. این پل دارای دهانه‌ی اصلی ۶۷۰ متر و دو دهانه کناری به طول ۲۹۲/۵ متر می‌باشد. برج‌های پل به صورت A شکل بوده، ارتفاع کلی آن‌ها از روی شالوده برابر با ۱۲۰ متر، ارتفاع قوس مرکزی برابر ۵۰ متر، عرض پایه ۳۶ متر و جنس آن‌ها از بتن می‌باشد. عرشه این پل با استفاده از ۱۲ عدد کابل در دو دهانه کناری و ۲۴ عدد کابل در دهانه وسط به برج‌ها متصل شده‌اند. آرایش کابل‌ها در این پل به صورت بادبزی است و از رأس برج‌ها به نقاط مختلف عرشه متصل شده‌اند و فاصله کابل‌ها در جهت طولی پل برابر با ۴۸/۷۵ متر و در جهت عرضی پل برابر با ۲۴ متر می‌باشد. اتصالات کابل‌ها به عرشه و برج‌ها به صورت مفصلی مدل شده‌اند تا انتقال نیرو به صورت واقعی‌تر شبیه‌سازی شود [۱۷]. (شکل ۱).

¹ Sharabash

² Armando W Nunes

³ Lianxu Zhou

⁴ M. Shahria Alam



شکل ۱: مدل پل و جزئیات عرشه و مشخصات برج‌های پل [۹]

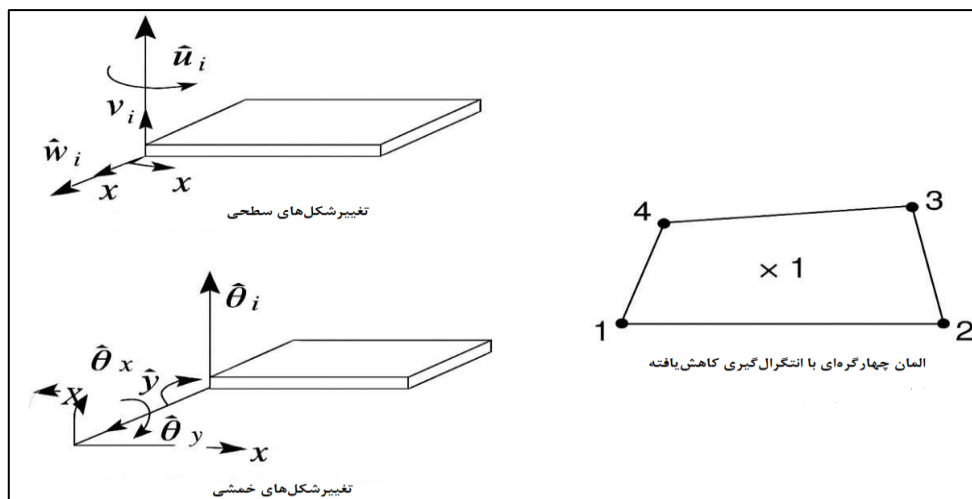
به منظور تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، مدل پل با استفاده از نرم‌افزار مدل اجزای محدود آباکوس^۱ شبیه‌سازی شده است. عرشه پل با استفاده از المان‌های پوسته چهارگره‌ای (با شش درجه آزادی در هر گره) شبیه‌سازی شده که قادر به در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ عرشه می‌باشد. در محاسبه ماتریس سختی المان مطابق با شکل (۲) از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته^۲ استفاده شده است. این المان با نام S4R در نرم‌افزار آباکوس شناخته شده است که قادر به در نظر گرفتن کرنش‌های بزرگ داخل صفحه المان می‌باشد که یک المان با همگرایی مناسب در مسائل مختلف مکانیک جامدات از جمله مسائل با صفحات ضخیم، ورق با رفتار غیرخطی مصالح و هندسی و نیز تحلیل کمانش صفحات، به شمار می‌رود. همچنین با این المان می‌توان انواع مختلف پوسته و به صورت ایزوتروپیک^۳ و ارتوتروپیک^۴ و نیز چند لایه و یا مسلح شده را شبیه‌سازی نمود. برای شبیه‌سازی برج‌های بتنی پل، از المان تیر سه بعدی دو نقطه‌ای (B31) که هر گره شش درجه آزادی دارد، استفاده شده است که حرف B بیان‌گر این است که این المان از نوع Beam می‌باشد. این المان قادر به در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد. تیپ المان (B31) دو گره‌ای است و قادر به تعریف رفتارهای برشی می‌باشد. برای شبیه‌سازی کابل‌های فولادی پل، از المان خرپا (truss) استفاده شده است و نیروی پیش‌کشش با استفاده از تحلیل استاتیکی محاسبه و به تحلیل دینامیکی اضافه گردیده است. خصوصیات مصالح پل کابلی در جدول (۱) ارائه گردیده است. برای نام‌گذاری کابل‌ها از حرف C که نشان‌دهنده کلمه Cable و شماره بعد از آن که بیان‌گر شماره کابل می‌باشد، استفاده شده است.

¹ Abaqus

² Reduced Integration

³ Isotropic

⁴ Orthotropic



شکل ۲: المان پوسته چهار گره ای [۱۸]

جدول ۱: خصوصیات الاستیک مصالح پل کابلی ایستا

تنش اولیه (MPa)	سطح مقطع m^2	چگالی $\frac{kg}{m^3}$	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته $\frac{N}{m^2}$	نوع مصالح	کابل ها
-	-	۷۸۵۰	۰/۳	2×10^{11}	فولاد	
-	-	۲۴۰۰	۰/۲۵	$2/88 \times 10^{10}$	بتن	
۱۹/۱	۰/۰۳۹	۱۱۲۰۰	۰/۳	$1/74 \times 10^{11}$	C1- C12- C13- C24 C25- C36- C37- C48	
۲۱/۰	۰/۰۲۵	۱۱۲۰۰	۰/۳	$1/81 \times 10^{11}$	C2- C11- C14- C23 C26- C35- C38- C47	
۱۸/۹	۰/۰۲۲	۱۱۲۰۰	۰/۳	$1/87 \times 10^{11}$	C3- C10- C15- C22 C27- C34- C39- C46	
۶/۳۴	۰/۰۱۹	۱۱۲۰۰	۰/۳	$1/93 \times 10^{11}$	C4- C9- C16- C21 C28- C33- C40- C45	
۷/۴۷	۰/۰۱۶	۱۱۲۰۰	۰/۳	$1/98 \times 10^{11}$	C5- C8- C17- C20 C29- C32- C41- C44	
۶/۹۲	۰/۰۱۵	۱۱۲۰۰	۰/۳	2×10^{11}	C6- C7- C18- C19 C30- C31- C42- C43	

آلیاژ^۱ SMA به کار رفته در این مدل از نوع Ni-Ti^۲ (نیکل - تیتانیوم) با رفتار فوق ارتجاعی یا سوپرلاستیک با نام تجاری نایتینول^۳ می باشد که توسط کدنویسی واسط به نرم افزار آباکوس معرفی شده است. دانسیته مصالح 6450 kg/m^3 با مقاومت تسلیم در بارگذاری معادل 410 MPa و مقاومت تسلیم در باربرداری معادل 140 MPa است. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار به کار رفته در این تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است. این آلیاژ حافظه دار، قطعه ای از یک کابل است به این صورت که در هر یک از کابل های پل، در $0/15$ ابتدا و $0/15$ انتهای هر کابل، در نزدیکی نقاط اتصال به برج ها و عرشه، به صورت غلاف جداگانه نصب شده است. رفتار مصالح SMA با استفاده از مدل غیرخطی وابسته به کرنش تعریف گردیده است که شامل منحنی باربرداری و برگشت پذیری کامل پس از بارگذاری چرخه ای است. پارامترهای مصالح شامل تنش آغاز تحول، مدول کشسانی، و کرنش نهایی از منابع معتبر آزمایشگاهی استخراج شده اند.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار شکلی

ویژگی	آلیاژ حافظه دار سوپرلاستیک
حداکثر کرنش برگشت پذیر	۸ %
مدول یانگ	۳۰ - ۸۳ GPa
مقاومت تسلیم	۱۴۰ - ۴۱۰ MPa
مقاومت کششی نهایی	۳۴۰۰ MPa
ضریب پواسون	۱۷/۵۰%

۳- تحلیل دینامیکی پل کابلی

تحلیل پل کابلی با استفاده از نرم افزار آباکوس و به صورت تاریخچه زمانی غیرخطی^۴ انجام شده است، که در آن اثرات حرکت زمین به صورت تاریخچه زمانی تغییرات شتاب مشخص می شود. در این روش تحلیلی، سازه پل در تراز پایه تحت تاثیر شتاب های ناشی از زلزله که شتاب نگاشت نامیده می شود، قرار گرفته و در هر مقطع زمانی از طول اثر زلزله بر سازه، بازتاب های دینامیکی سازه به صورت تابعی زمانی محاسبه می شود. شایسته ذکر است تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به دو دسته تحلیل تاریخچه زمانی سازه ها به روش مودال^۵ و تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از انتگرال گیری مستقیم^۶ تقسیم بندی می شود. دسته اول مربوط به سیستم های با رفتار خطی همراه با تعداد محدودی عضو با رفتار غیرخطی می باشد که در این روش نمی توان رفتار غیرخطی ماده ای و هندسی شامل اثرات $\Delta-p$ و تغییر شکل های بزرگ را در نظر گرفت که روش مناسبی برای تحلیل دینامیکی غیرخطی پل های کابلی به حساب نمی آید. تنها روش کاربردی برای این گونه پل ها روش انتگرال گیری عددی با گام زمانی است. روش انتگرال گیری مستقیم که پاسخ سازه را در حوزه زمان محاسبه می کند جزء روش مناسب برای تحلیل دینامیکی غیرخطی پل های کابلی به حساب می آید که در این پژوهش از این روش مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین رفتار غیر خطی هندسی سازه به صورت شکم دادگی کابل ها با توجه به تغییرات نیروی محوری، اندرکنش نیروی محوری فشاری با لنگر خمشی در برج ها و نیز اثرات تغییر شکل های نسبتا بزرگ در نظر گرفته شده است. جهت بررسی دینامیکی پل مورد مطالعه، از دو

¹ Shape Memory Alloy

² Nickel-Titanium

³ Nitinol

⁴ Nonlinear time-history analysis

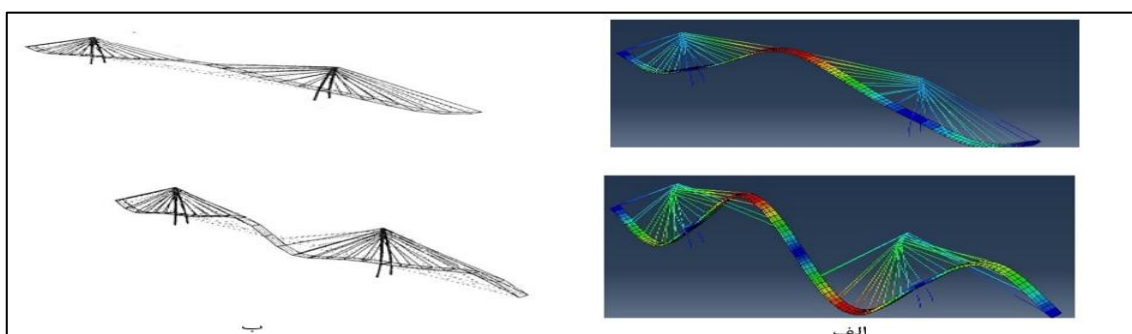
⁵ Modal Time History Analysis

⁶ Direct Integration Time History Analysis

تحلیل استاتیکی و دینامیکی پیاپی استفاده شده است به نحوی که تغییر شکل‌های موجود در اجزای پل، در انتهای تحلیل استاتیکی به صورت شرایط اولیه به تحلیل دینامیکی انتقال می‌یابد. تحلیل استاتیکی به منظور در نظر گرفتن وزن سازه پل و همچنین شکم دادگی کابل‌ها انجام شده است، این تحلیل باعث می‌شود که فرم تغییر شکل یافته پل در ابتدای شروع تحلیل دینامیکی حفظ گردد. سپس در گام بعدی، از تحلیل دینامیکی به روش انتگرال گیری مستقیم با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ استفاده شده است. به منظور بارگذاری لرزه‌ای از رکورد ثبت شده زلزله السنترو^۱ در سال ۱۹۴۰، استفاده شده است. این رکورد بدون هم‌پایه‌سازی به منظور بررسی پاسخ سازه تحت شدت‌های مختلف اعمال گردیده است.

۴- صحت سنجی

برای صحت‌سنجی مدل عددی، از داده‌های پل کابلی واقع در استان چیپا ژاپن استفاده شده است که دارای برج‌های فولادی A شکل، عرشه جعبه‌ای، و کابل‌های کششی با آرایش بادبزی می‌باشد. اطلاعات مربوط به فرکانس‌های طبیعی، مدهای ارتعاشی، و نیروهای داخلی از گزارش‌های پایش سلامت سازه (SHM) این پل استخراج شده‌اند. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی ارائه شده در این پژوهش، علاوه بر مقایسه فرکانس‌های طبیعی و مدهای ارتعاشی (مطابق شکل ۳ و جدول ۳)، مقایسه‌ای از نظر نیروهای داخلی، لنگرهای خمشی و تغییرشکل‌های بحرانی نیز انجام گردید. نتایج تحلیل عددی نشان داد که مقادیر نیروی کششی در کابل‌های اصلی در مدل عددی با اختلاف کمتر از ۵٪ و لنگر خمشی در پای برج‌ها در مدل عددی به‌طور میانگین ۸٪ کمتر از مقدار مرجع بوده که ناشی از در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی و اثر شکم‌دادگی کابل‌ها است. تغییرشکل نسبی عرشه در ناحیه میانی در مدل عددی حدود ۳.۲ سانتی‌متر گزارش شد، در حالی که مقدار متناظر در پل مرجع ۳.۵ سانتی‌متر بوده است. توزیع نیروهای داخلی در کابل‌ها و برج‌ها در مدل عددی با الگوی مد شکل‌های ارتعاشی مطابقت دارد که نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی مصالح، شرایط مرزی و هندسه سازه می‌باشد. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مدل عددی تهیه شده در نرم‌افزار آباکوس با دقت قابل قبولی قادر به بیان رفتار دینامیکی و استاتیکی پل مرجع [۹] بوده و می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای معتبر برای تحلیل‌های پیشرفته شامل استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۳: مقایسه مود شکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی نرم افزار ABAQUS (الف) با پل مرجع (ب) [۹]

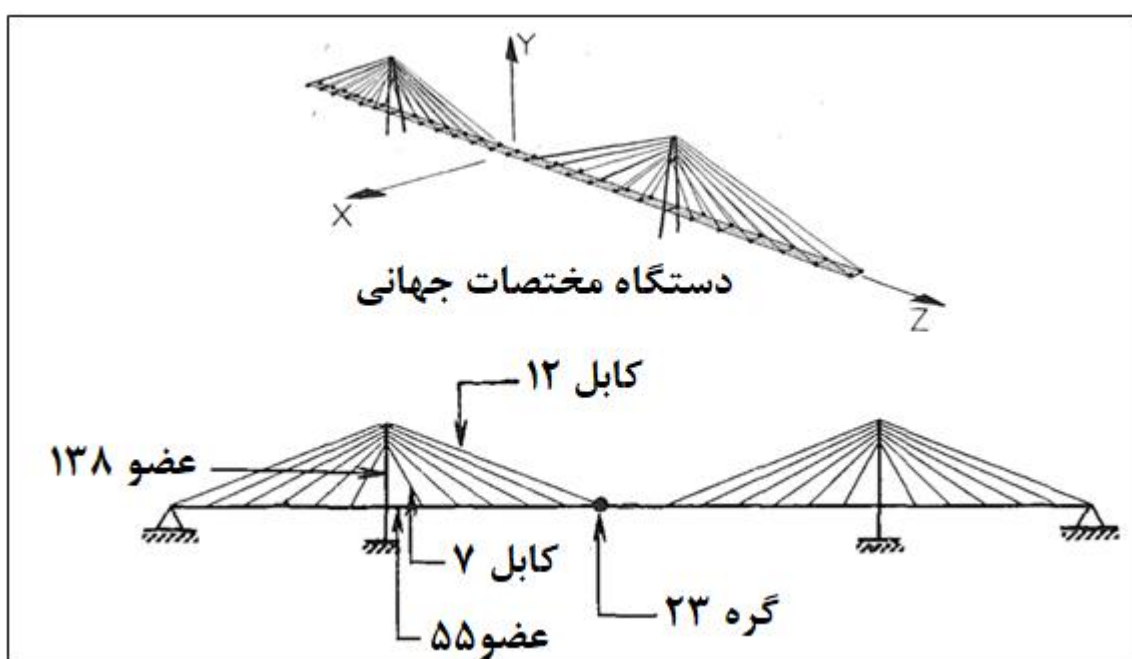
جدول ۳: مقایسه فرکانس‌های طبیعی نرم افزار ABAQUS با پل مرجع

شماره مد	نتایج شبیه سازی (آباکوس) فرکانس (Hz)	نتایج مرجع فرکانس (Hz)	مقدار اختلاف (Hz)	درصد اختلاف %
۱	۰/۱۸۲۹	۰/۱۹۲۴	۰/۰۰۹۵	۴/۹
۲	۰/۲۵۲۰	۰/۲۵۲۰	۰	۰

¹ ElCentro earthquake

۵- بررسی نتایج تحلیل لرزه‌ای با در نظر گرفتن اثر SMA

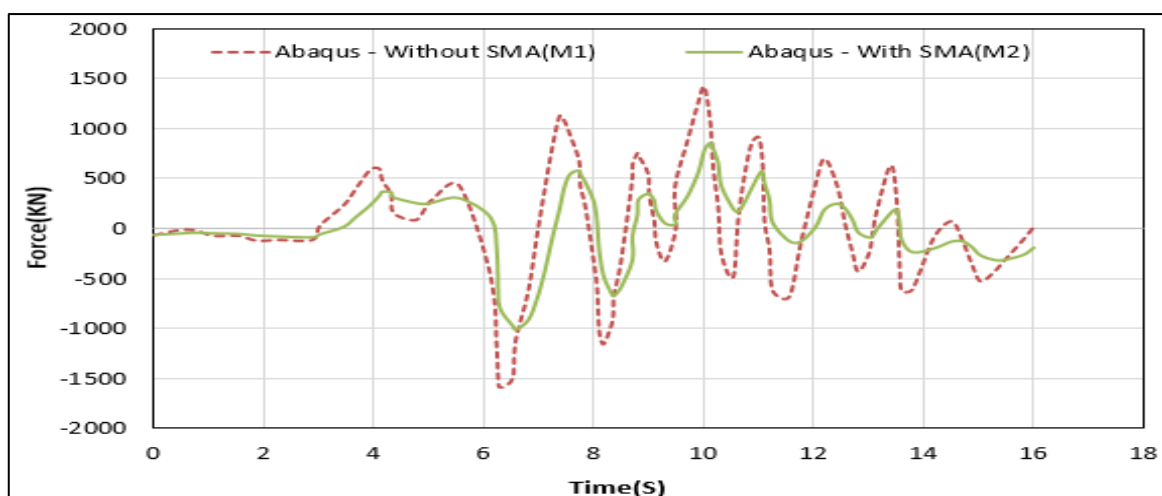
جهت بررسی رفتار لرزه‌ای پل مورد مطالعه، که مشخصات آن مطابق مدل M1 است، از آلیاژ حافظه‌دار شکلی که مشخصات آن مطابق جدول (۲) آمده است، در ابتدا و انتهای کابل‌های پل موجود استفاده شده است (مدل M2). در این قسمت به منظور بررسی تاثیر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قسمتی از کابل‌های پل کابلی، بر مشخصه‌های رفتار لرزه‌ای پل، تحت شتاب نگاشت زلزله السنترو، نتایج کمیت‌های پاسخ زلزله تاریخیچه زمانی ارائه شده است. قابل ذکر است که تمام کمیت‌های پاسخ برگرفته از مرجع [۹] می‌باشد. شکل (۴) محل‌های در نظر گرفته شده برای به دست آوردن پاسخ‌ها (جابه‌جایی و نیروی اعضا) در این پژوهش را نشان می‌دهد. در این شکل، مدل سه‌بعدی سیستم کابل‌ها، اعضای سازه‌ای و نقاط اتصال نمایش داده شده‌اند. کابل‌های شماره ۷ و ۱۲ به برج مرکزی متصل شده‌اند و اعضای MEM ۵۵ و MEM ۱۳۸ به‌عنوان تیرهای افقی و مورب عمل می‌کنند. این مدل برای تحلیل دینامیکی و بررسی رفتار لرزه‌ای پل در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.



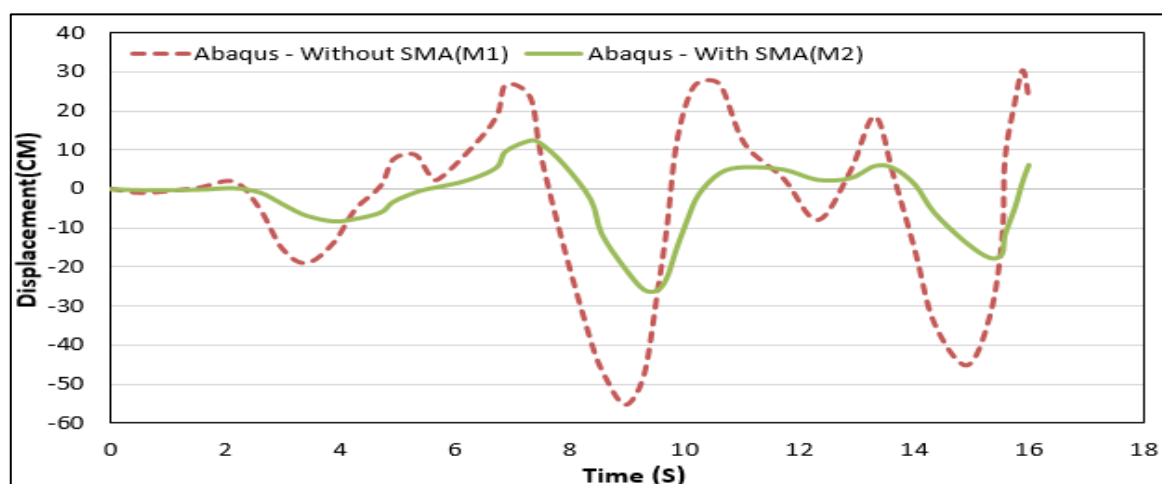
شکل ۴: محل‌های در نظر گرفته شده برای محاسبه کمیت‌های پاسخ [۹]

۵-۱- مقایسه نتایج پارامترهای تغییر مکان، لنگر، نیروی برشی و نیروی محوری مدل M1 با مدل M2 تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی

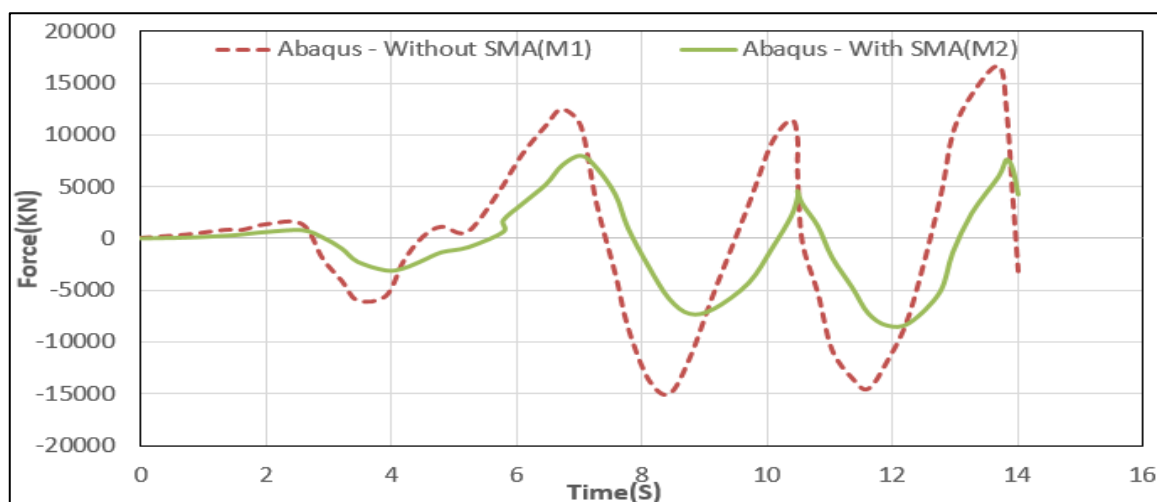
جهت بررسی لرزه‌ای پل مورد مطالعه، نمودارهای تغییر مکان - زمان در شکل (۵)، نیروی محوری - زمان در شکل‌های (۶) و (۷)، نیروی برشی - زمان در شکل (۸) و لنگر - زمان در شکل (۹) ارائه شده است. موقعیت محل‌های در نظر گرفته شده برای محاسبه کمیت‌های پاسخ در شکل (۴) نشان داده شده است.



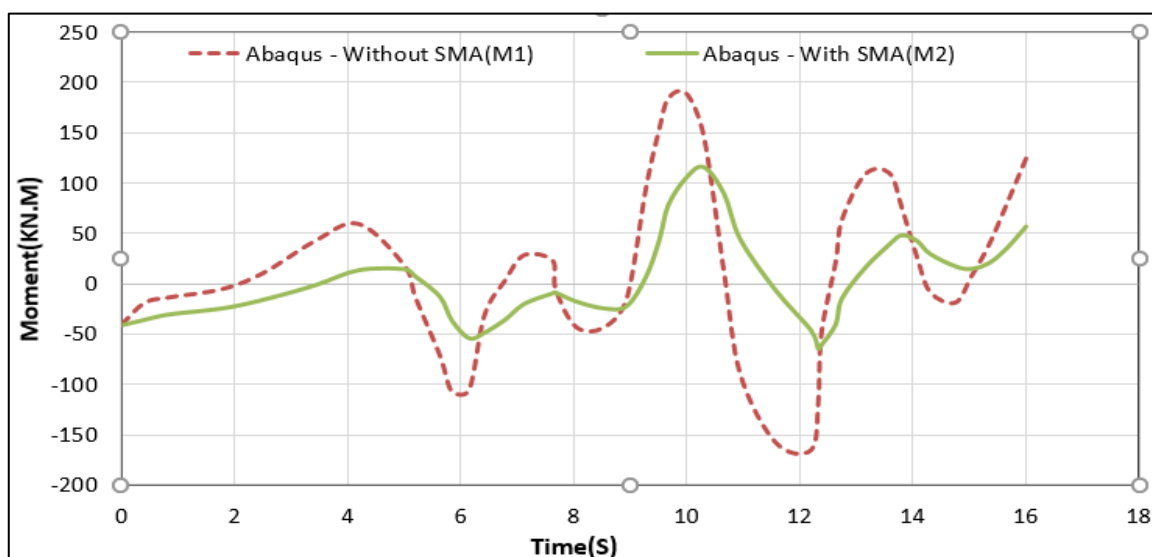
شکل ۵: مقایسه پاسخ تغییر مکان گره ۲۳ در جهت عمود بر عرشه (Y) مدل M1 با مدل M2



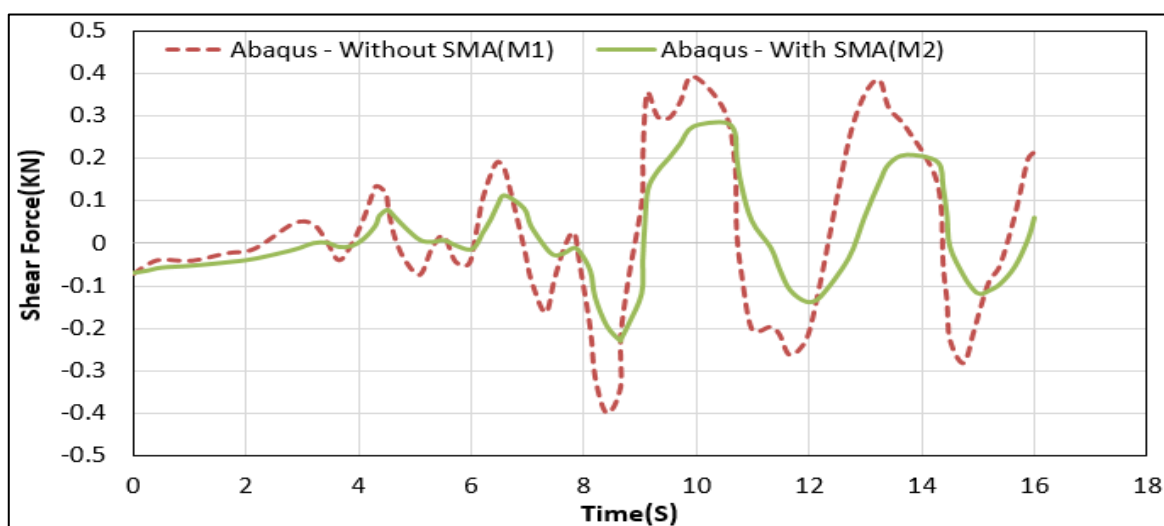
شکل ۶: مقایسه پاسخ نیروی محوری کابل ۷ مدل M1 با مدل M2



شکل ۷: مقایسه پاسخ نیروی محوری کابل ۱۲ مدل M1 با مدل M2



شکل ۸: مقایسه پاسخ نیروی برشی در عضو ۵۵ گره ۱۷ مدل M1 با مدل M2



شکل ۹: مقایسه پاسخ لنگر در عضو ۱۳۸ گره ۴ مدل M1 با مدل M2

برای تحلیل دقیق تر نتایج، منحنی های مدل M1 و M2 در هر پارامتر، بر روی هم قرار گرفتند. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۴) مشاهده می گردد که نمودارهای مدل M2 که حالت با آلیاژ حافظه دار را نشان می دهد، تحت اثر بارگذاری اعمالی، دچار کاهش مقدار در هر پارامتر شده است.

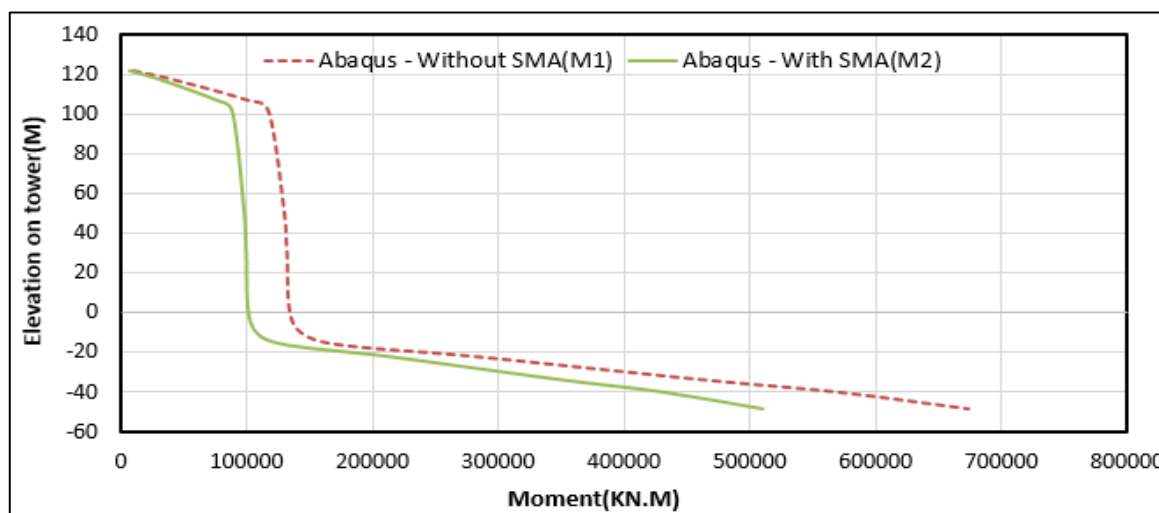
جدول ۴: مقایسه حداکثر پاسخ پارامترهای تغییر مکان، لنگر، نیروی برشی و نیروی محوری مدل (M1) با مدل (M2)

حداکثر پاسخ	بدون آلیاژ حافظه دار (M1)	با آلیاژ حافظه دار (M2)	درصد کاهش M2 نسبت به M1 (%)
تغییر مکان گره ۲۳ در جهت Y (cm)	۵۵	۲۶	۵۳
نیروی محوری در کابل ۷ (kN)	۱۵۹۲	۱۰۰۸	۳۷
نیروی محوری در کابل ۱۲ (kN)	۱۶۶۱۱	۸۳۸۵	۴۹/۵
نیروی برشی در عضو ۵۵ گره ۱۷ (kN)	۰/۴	۰/۲۸	۳۰
لنگر در عضو ۱۳۸ گره ۴ (kN.m)	۱۸۸	۱۱۶	۳۸

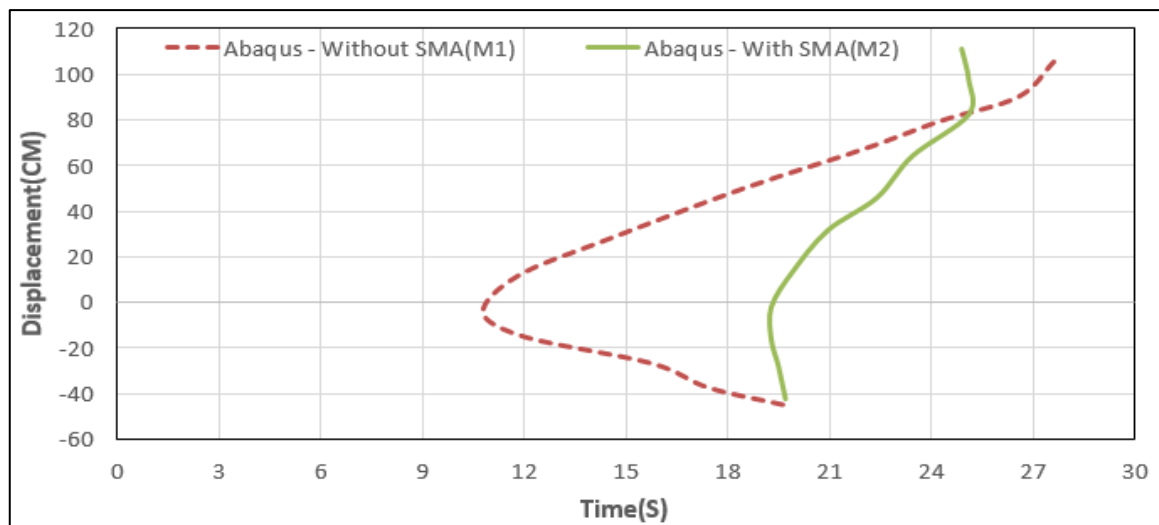
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۴)، استفاده از آلیاژ حافظه دار، با افزایش سختی سازه، میزان تغییر مکان را کاهش می‌دهد؛ همچنین باعث کاهش دیگر پارامترهای مورد بررسی، شده است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، کابل ۷ و ۱۲ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین طول کابل از بین کابل‌های پل می‌باشند؛ که در کابل ۱۲ میزان درصد کاهش نیروی محوری نسبت به کابل ۷ با توجه به بزرگ بودن طول کابل، بیشتر است. تاثیر این آلیاژ حافظه دار بر نیروی برشی در محل اتصال عرشه به برج و لنگر در برج نیز قابل مشاهده است.

۵-۲- مقایسه نتایج پارامترهای برج و عرشه مدل M1 با مدل M2 تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی

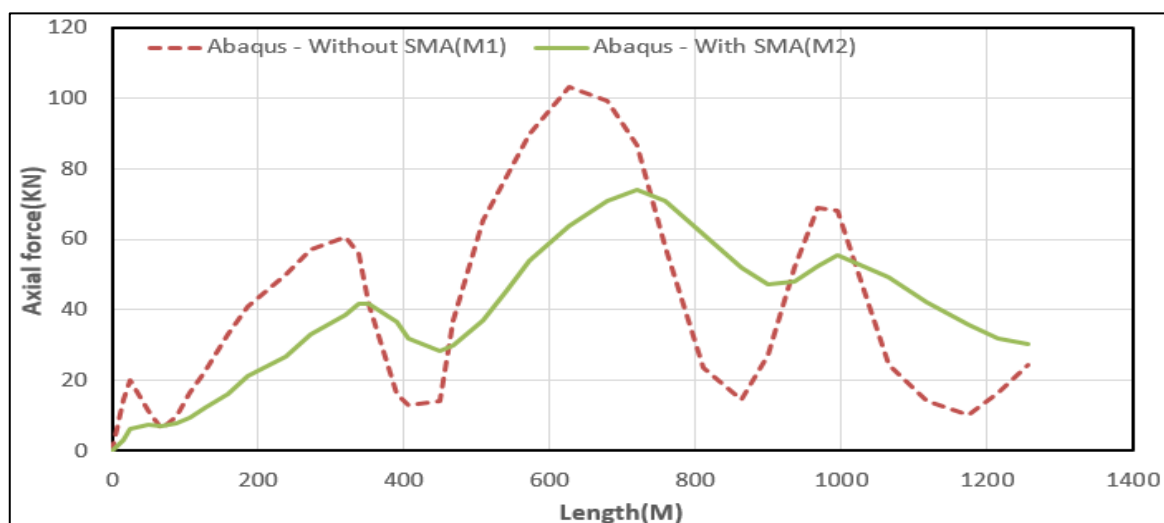
به منظور بررسی رفتار لرزه ای پل، باید مقادیر ماکزیمم جابه‌جایی‌ها و نیروهای اعضای سازه در طول مدت تحریک زلزله بررسی شوند. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) توزیع دو کمیت‌های پاسخ را در امتداد برج‌های پل و شکل‌های (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) توزیع سه کمیت‌های پاسخ را در امتداد عرشه پل برای مدل‌های M1 و M2 وقتی که در معرض برانگیختگی‌های لرزه‌ای قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهند. باید تأکید شود که همه نیروها و تغییر شکل‌های حاصل شده از زلزله که در این شکل‌ها نشان داده شده است، مقادیر طیفی مطلق (ماکزیمم) هستند و علامت آن‌ها قابل برگشت است و در یک زمان رخ نداده‌اند.



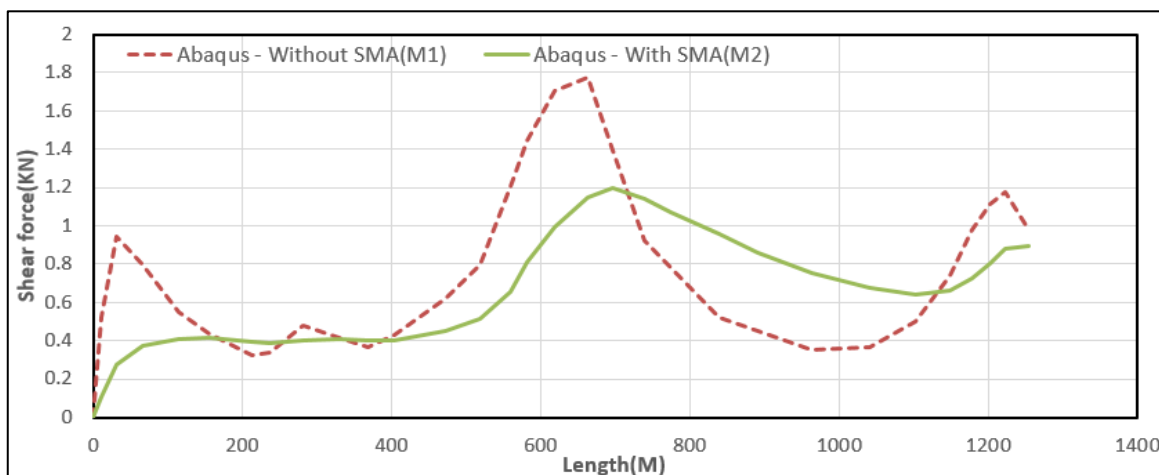
شکل ۱۰: مقایسه پاسخ ماکزیمم مطلق لنگر در برج مدل M1 با مدل M2 (در جهت Y)



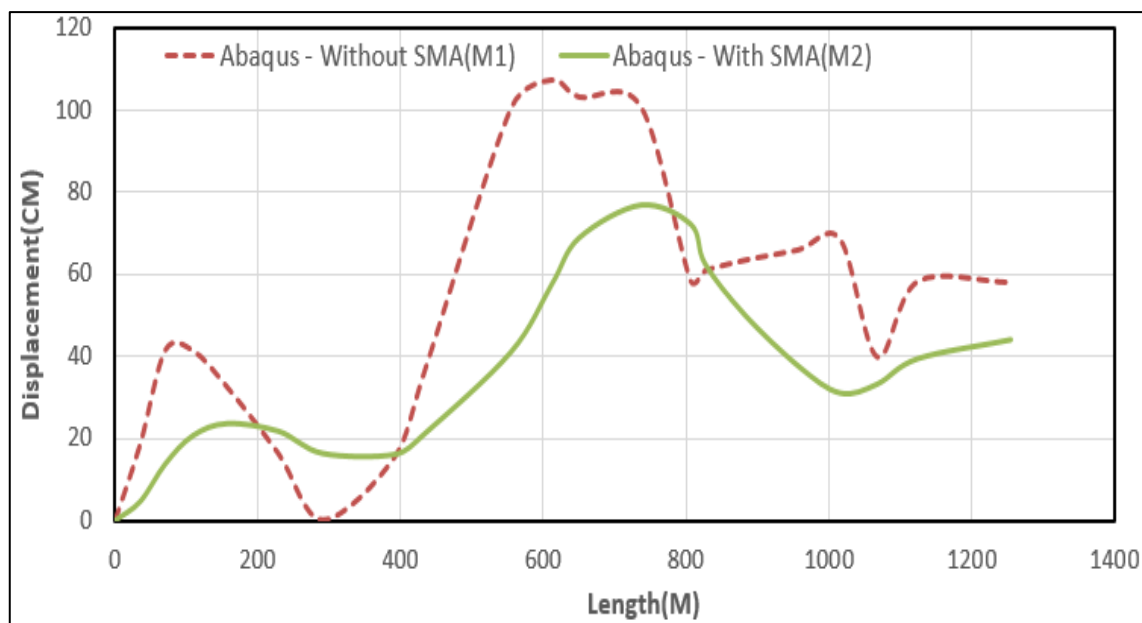
شکل ۱۱: مقایسه پاسخ ماکزیمم مطلق تغییر مکان در برج مدل M1 با مدل M2 (در جهت Z)



شکل ۱۲: مقایسه پاسخ ماکزیمم مطلق نیروی محوری در عرشه مدل M1 با مدل M2



شکل ۱۳: مقایسه پاسخ ماکزیمم مطلق نیروی برشی در عرشه مدل M1 با مدل M2 (در جهت Y)



شکل ۱۴: مقایسه پاسخ ماکزیمم مطلق تغییر مکان در عرشه مدل M1 با مدل M2 (در جهت Y)

با مقایسه بین مدل های M1 و M2 در جدول (۵) ملاحظه می شود مقادیر پاسخ ماکزیمم مطلق پارامترهای برج و عرشه در حالت با آلیاژ حافظه دار نسبت به حالت بدون آلیاژ حافظه دار کاهش پیدا کرده است.

جدول ۵: مقایسه حداکثر پاسخ پارامترهای ماکزیمم مطلق برج و عرشه مدل (M1) با مدل (M2)

حداکثر پاسخ	بدون آلیاژ حافظه دار (M1)	با آلیاژ حافظه دار (M2)	درصد کاهش M2 نسبت به M1 (%)
ماکزیمم مطلق تغییر مکان در برج در جهت Z (cm)	۲۷/۶	۲۵	۹
ماکزیمم مطلق لنگر در برج در جهت Y (kN.m)	۶۷۳۸۱۸	۵۱۰۴۸۴	۲۴
ماکزیمم مطلق نیروی محوری در عرشه (kN)	۱۰۳	۷۴	۲۸
ماکزیمم مطلق نیروی برشی در عرشه در جهت Y (kN)	۱/۸	۱/۲	۳۳
ماکزیمم مطلق تغییر مکان در عرشه در جهت Y (cm)	۱۰۷	۷۷	۲۸

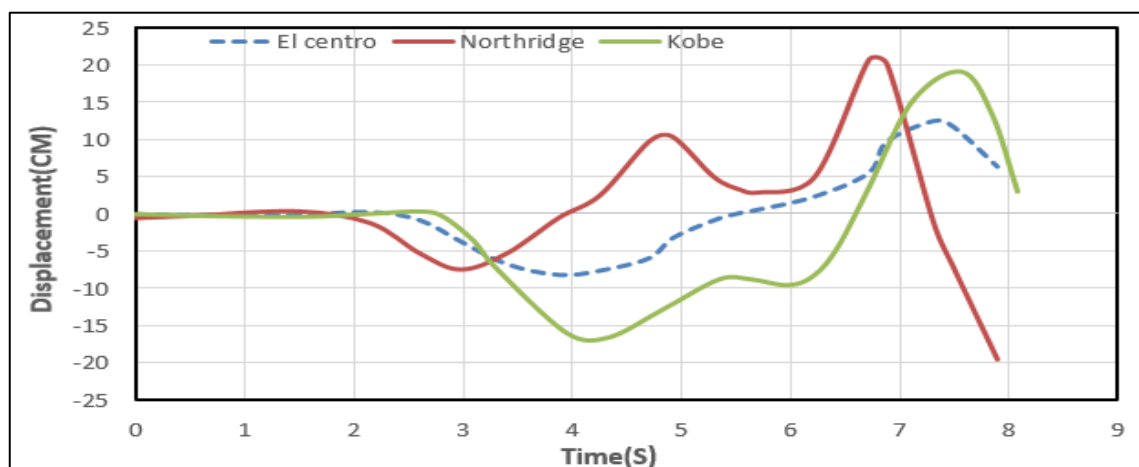
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۵)، استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی، بیشترین تاثیر را در کاهش پارامترهای عرشه داشته است. همچنین باعث کاهش دیگر پارامترهای مورد بررسی شده است به طوری که نیروی برشی در عرشه بیشترین درصد کاهش تاثیر آلیاژ حافظه دار و تغییر مکان در برج کمترین درصد کاهش تاثیر آلیاژ حافظه دار را به خود اختصاص داده است. آلیاژ حافظه دار در کاهش نیروی محوری و تغییر مکان در عرشه و لنگر در برج تاثیر نسبتاً یکسانی گذاشته است.

۶- پاسخ های پل مجهز به آلیاژ حافظه دار در برابر زلزله، تحت شتاب نگاشت های مختلف

در این قسمت به منظور بررسی تاثیر آلیاژ حافظه دار شکلی که در قسمتی از کابل های پل کابلی لحاظ شده اند (مدل M2)، بر مشخصه های رفتار لرزه ای پل، تحت شتاب نگاشت های El centro، Northridge و Kobe، نتایج کمیت های پاسخ زلزله تاریخچه زمانی ارائه شده است. با توجه به تحلیل های صورت گرفته بر روی مدل های مطالعاتی، حداکثر مقادیر خروجی شامل تغییر مکان، نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر، تحت اثر زلزله های تعریف شده، مورد مقایسه قرار گرفته اند. قابل ذکر است که تمام کمیت های پاسخ برگرفته از مرجع [۱۷] می باشد. شکل (۴) محل های در نظر گرفته شده برای به دست آوردن پاسخ ها (جابه جایی و نیروی اعضا) در این پژوهش را نشان می دهد.

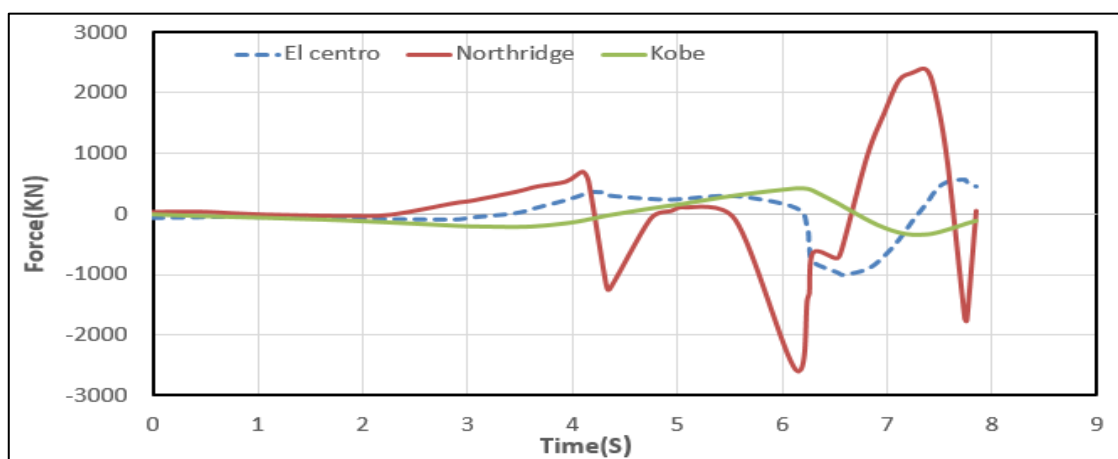
۶-۱- مقایسه نتایج پارامترهای تغییر مکان، لنگر، نیروی برشی و نیروی محوری مدل M2 تحت شتاب نگاشت های مختلف

در این قسمت دو نوع بررسی نتایج کمیت های پاسخ زلزله تاریخچه زمانی ارائه شده است. در قسمت اول به بررسی مقایسه پاسخ حداکثر پارامترها طی وقوع زلزله با دوره زمانی ۸ ثانیه ای پرداخته شده است؛ چون زلزله Northridge یک زلزله با مدت زمان ۸ ثانیه است، پاسخ های دو شتاب نگاشت El centro و Kobe که زمان وقوع زلزله آن ها بیشتر از ۸ ثانیه است، هم در مدت زمان زلزله Northridge گرفته شده است؛ در قسمت دوم به بررسی مقایسه پاسخ حداکثر پارامترها طی وقوع زلزله کامل هر شتاب نگاشت پرداخته شده است. تغییر مکان ایجاد شده در گره ۲۳ در جهت Y در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده به سازه مطابق شکل (۱۵) می باشد.

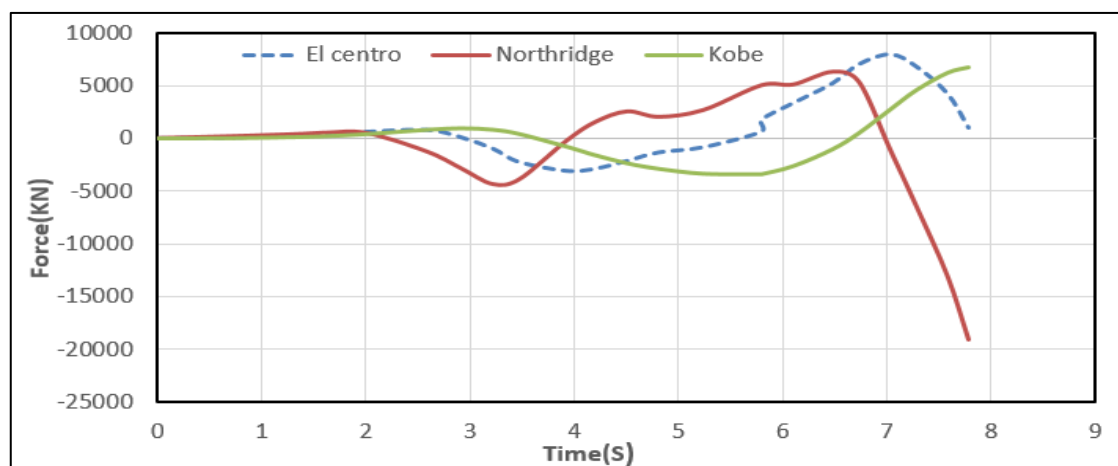


شکل ۱۵: مقایسه نمودار تغییر مکان گره ۲۳ در جهت Y مدل M2 تحت شتاب نگاشت های مختلف

نیروی محوری ایجاد شده در کابل ۷ و ۱۲ در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده به سازه مطابق شکل (۱۶) و (۱۷) می باشد.

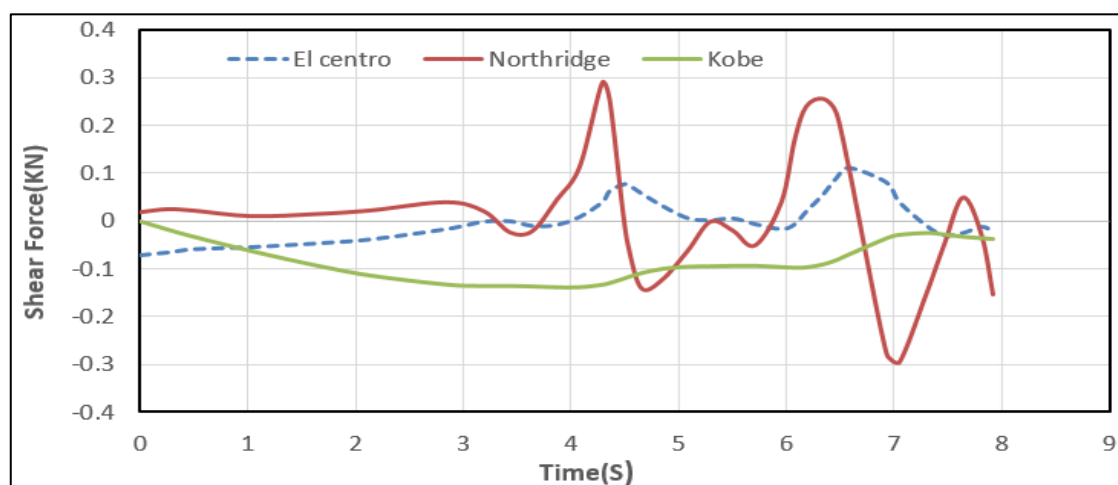


شکل ۱۶: مقایسه نمودار نیروی محوری کابل ۷ مدل M2 تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف



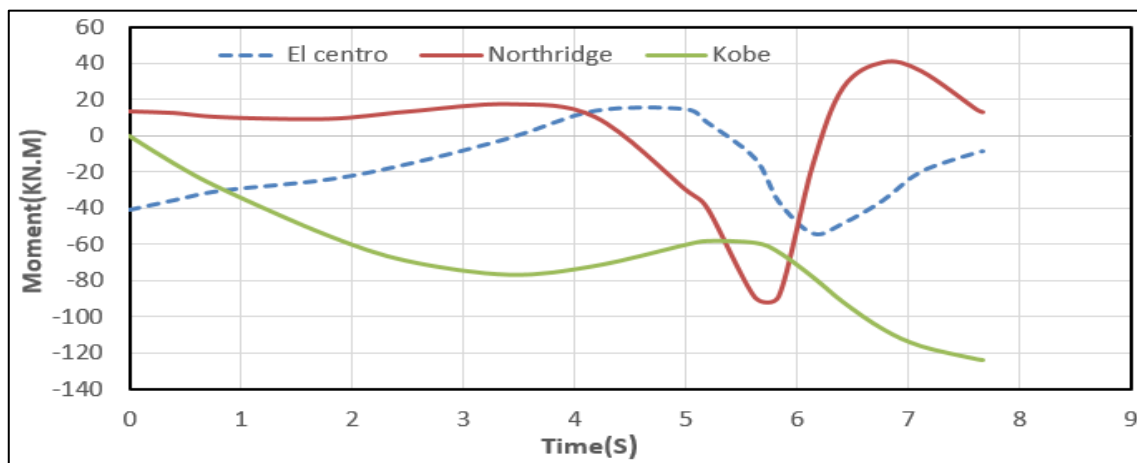
شکل ۱۷: مقایسه نمودار نیروی محوری کابل ۱۲ مدل M2 تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف

نیروی برشی ایجاد شده در عضو ۵۵ گره ۱۷ در برابر شتاب‌نگاشت‌های اعمال شده به سازه مطابق شکل (۱۸) می‌باشد.



شکل ۱۸: مقایسه نمودار نیروی برشی عضو ۵۵ گره ۱۷ مدل M2 تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف

لنگر ایجاد شده در عضو ۱۳۸ گره ۴ در برابر شتاب‌نگاشت‌های اعمال شده به سازه مطابق شکل (۱۹) می‌باشد.



شکل ۱۹: مقایسه نمودار لنگر عضو ۱۳۸ گره ۴ مدل M2 تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف

ماکزیمم پارامتر ایجاد شده در برابر شتاب‌نگاشت‌های اعمال شده به سازه طی وقوع زلزله ۸ ثانیه‌ای در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶: مقایسه حداکثر پاسخ پارامترهای مورد بررسی مدل M2 تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف طی مدت زمان ۸ ثانیه

Kobe	Northridge	El centro	حداکثر پاسخ
۱۹/۱	۲۰/۷	۱۲/۵	تغییر مکان گره ۲۳ در جهت Y (cm)
۴۲۷	۲۵۸۲	۱۰۰۸	نیروی محوری در کابل ۷ (kN)
۶۷۸۹	۱۹۰۷۱	۷۹۵۵	نیروی محوری در کابل ۱۲ (kN)
۰/۱۳	۰/۳	۰/۱۱	نیروی برشی در عضو ۵۵ گره ۱۷ (kN)
۱۲۴	۸۹/۶	۵۳/۷	لنگر در عضو ۱۳۸ گره ۴ (kN.m)

با توجه به این که نوع شتاب‌نگاشت زلزله مقاله مرجع [۴] السنترو می‌باشد، نسبت کاهش یا افزایش پارامترهای مورد بررسی، نسبت به زلزله السنترو سنجیده می‌شود که در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷: مقایسه نسبت پاسخ پارامترهای مورد بررسی مدل M2 تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف طی مدت زمان ۸ ثانیه

Kobe	Northridge	El centro	واحد	نسبت حداکثر پاسخ
۵۲/۸	۶۵/۶	—	%	نسبت تغییر مکان گره ۲۳ در جهت Y
-۵۷/۶	۱۵۶	—	%	نسبت درصد نیروی محوری در کابل ۷
-۱۴/۶	۱۳۹/۷	—	%	نسبت درصد نیروی محوری در کابل ۱۲
۱۸/۲	۱۷۲/۷	—	%	نسبت درصد نیروی برشی در عضو ۵۵ گره ۱۷
۱۳۱	۶۶/۸	—	%	نسبت درصد لنگر در عضو ۱۳۸ گره ۴

ماکزیمم پارامتر ایجاد شده در برابر شتاب‌نگاشت‌های اعمال شده به سازه طی وقوع زلزله کامل هر شتاب‌نگاشت در جدول (۸) ارائه شده است.

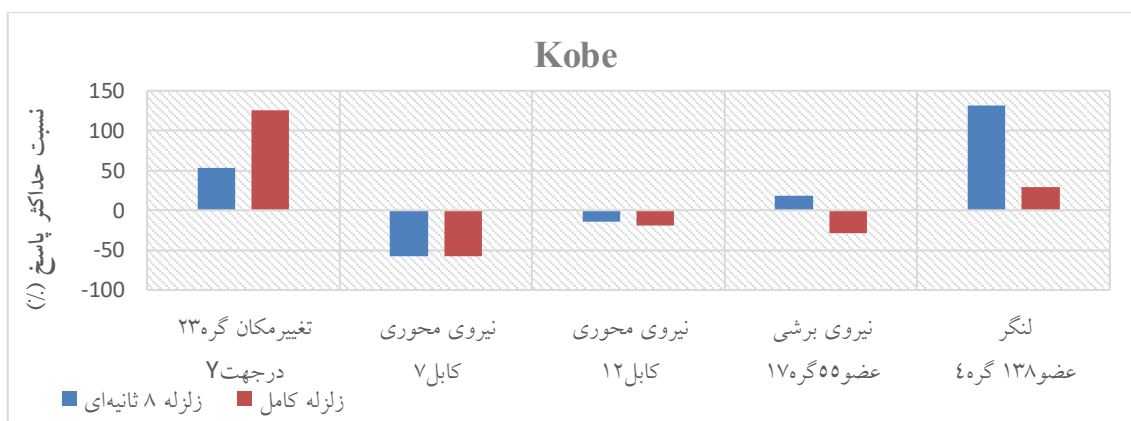
جدول ۸: مقایسه حداکثر پاسخ پارامترهای مورد بررسی مدل M2 تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف، طی مدت زمان کامل زلزله

Kobe	Northridge	El centro	حداکثر پاسخ
۵۸/۸	۲۰/۷	۲۶	تغییر مکان گره ۲۳ در جهت Y (cm)
۴۲۷	۲۵۸۲	۱۰۰۸	نیروی محوری در کابل ۷ (kN)
۶۷۸۹	۱۹۰۷۱	۸۳۸۵	نیروی محوری در کابل ۱۲ (kN)
۰/۲	۰/۳	۰/۲۸	نیروی برشی در عضو ۵۵ گره ۱۷ (kN)
۱۵۰/۵	۸۹/۶	۱۱۶	لنگر در عضو ۱۳۸ گره ۴ (kN.m)

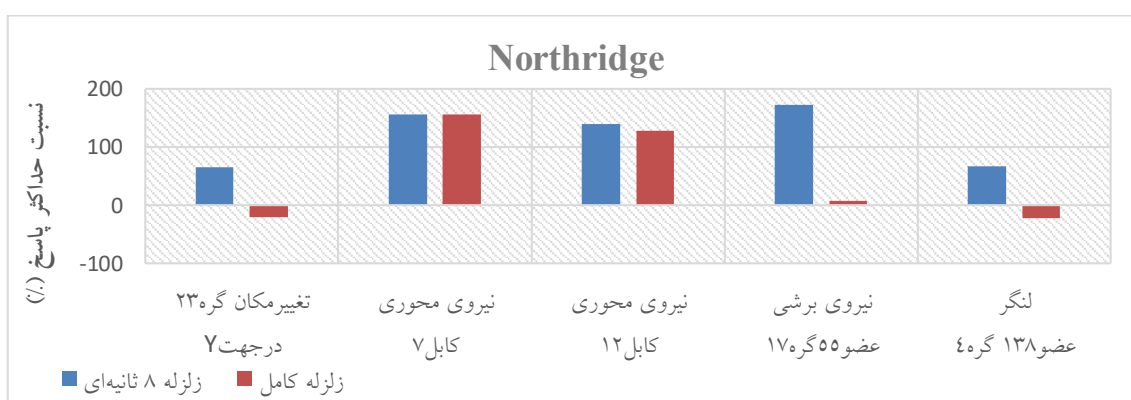
با توجه به این که نوع شتاب‌نگاشت زلزله مقاله مرجع [۴] السنترو می‌باشد، نسبت کاهش یا افزایش پارامترهای مورد بررسی، نسبت به زلزله السنترو سنجیده می‌شود که در جدول (۹) ارائه شده است. علامت مثبت و منفی نشان‌دهنده افزایش و کاهش مقدار آن پارامتر در مدل مجهز به SMA نسبت به مدل مرجع است.

جدول ۹: مقایسه نسبت پاسخ پارامترهای مورد بررسی مدل M2، تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف طی مدت زمان کامل زلزله

Kobe	Northridge	El centro	واحد	نسبت حداکثر پاسخ
۱۲۶	-۲۰/۴	—	%	نسبت تغییر مکان گره ۲۳ در جهت Y
-۵۷/۶	۱۵۶	—	%	نسبت درصد نیروی محوری در کابل ۷
-۱۹	۱۲۷/۴	—	%	نسبت درصد نیروی محوری در کابل ۱۲
-۲۸/۶	۷	—	%	نسبت درصد نیروی برشی در عضو ۵۵ گره ۱۷
۲۹/۷	-۲۲/۷	—	%	نسبت درصد لنگر در عضو ۱۳۸ گره ۴



شکل ۲۰: مقایسه حداکثر پاسخ پارامترهای مورد بررسی زلزله کوبه نسبت به زلزله السنترو در دو زمان ۸ ثانیه‌ای و کامل



شکل ۲۱: مقایسه حداکثر پاسخ پارامترهای مورد بررسی زلزله نورتریج نسبت به زلزله السنترو در دو زمان ۸ ثانیه‌ای و کامل

با توجه به شکل (۲۰)، ملاحظه می‌شود که ماکزیمم تغییر مکان گره ۲۳ در زلزله کوبه نسبت به زلزله السنترو در مدت زمان کامل وقوع زلزله و ماکزیمم لنگر عضو ۱۳۸ در زلزله السنترو نیز در مدت زمان کامل وقوع زلزله رخ داده است.

۶- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر مواد حافظه‌دار در پل کابلی ایستا با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مورد بررسی قرار گرفت. پس از مدل‌سازی ۲ مدل پل کابلی با آلیاژ حافظه‌دار و بدون آلیاژ حافظه‌دار، به منظور بررسی تأثیر آلیاژ حافظه‌دار شکلی که در قسمتی از کابل‌های پل کابلی لحاظ شدند، در تحلیل فرکانسی و بر مشخصه‌های رفتار لرزه‌ای پل، تحت شتاب نگاشت زلزله السنترو، نتایج کمیت‌های پاسخ زلزله تاریخچه زمانی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. این بررسی‌ها از طریق مقایسه‌ی منحنی هر پارامتر صورت پذیرفته است. در ادامه نمونه پل کابلی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار تحت سه شتاب نگاشت السنترو، نورتریج و کوبه قرار می‌گیرد و نتایج تحلیل لرزه‌ای این سه نوع زمین لرزه با هم مقایسه شده‌اند.

۱- بر اساس نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی، کاملاً مشهود است که آلیاژ حافظه‌دار، سختی سیستم را تا حدودی افزایش می‌دهد که با افزایش سختی، فرکانس سازه نیز افزایش می‌یابد.

۲- نتایج تحلیل لرزه‌ای، بیشترین تاثیر آلیاژ حافظه‌دارشکلی را با ۵۳ درصد در تغییر مکان گره ۲۳ نشان می‌دهد که در مقابل کاهش تغییر مکان عرشه و برج بسیار مشهود است.

۳- همچنین در این مطالعه با توجه به نیروی محوری کابل ۷ و ۱۲ که به ترتیب کوچکترین و بزرگترین کابل پل مدل مورد مطالعه هستند، نشان می‌دهد که هر چه طول کابل بیشتر باشد تاثیر SMA بر کاهش نیروی محوری آن کابل، بیشتر است.

۴- پل کابلی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار در قسمتی از کابل‌های پل در مدت زمان زلزله ۸ ثانیه‌ای، تحت شتاب‌نگاشت السنتر و در مدت زمان کامل وقوع زلزله، تحت شتاب‌نگاشت نورتریج، عملکرد بهتری نسبت به سایر شتاب‌نگاشت‌ها از خود نشان داده‌اند و همچنین این پل کابلی در مدت زمان زلزله ۸ ثانیه‌ای، تحت شتاب‌نگاشت نورتریج و در مدت زمان کامل وقوع زلزله، تحت شتاب‌نگاشت کوبه عملکرد ضعیفی از خود نشان داده است.

منابع و مأخذ

- [1] Graesser, E. J. and Cozzarelli, F. A. (1991). Shape memory alloys as new materials for aseismic isolation. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(11), 2590–2608. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1991\)117:11:2590](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:11:2590)
- [2] Wilde, K., Gardoni, P., and Fujino, Y. (2000). Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering Structures*, 22(3), 222–229. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00097-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00097-2)
- [3] DesRoches, R. and Delemont, M. (2002). Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloy. *Engineering Structures*, 24(3), 325–332. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00098-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00098-0)
- [4] Andrawes, B. and DesRoches, R. (2005). Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic devices. *Smart Materials and Structures*, 14(3), S60–S67. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/3/008>
- [5] Choi, E., Nam, T. H., Oh, J. T., and Cho, B. S. (2006). An isolation bearing for highway bridges using shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 438–440, pp. 1081–1084. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.098>
- [6] Saiidi, M. S. and Wang, H. (2006). Exploratory study of seismic response of concrete columns with shape memory alloys reinforcement. *ACI Structural Journal*, 103(3), 436–443. <https://doi.org/10.14359/15322>
- [7] Andrawes, B. and DesRoches, R. (2007). Comparison between shape memory alloy seismic restrainers and other bridge retrofit devices. *Journal of Bridge Engineering*, 12(6), 700–709. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:6\(700\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:6(700))
- [8] Andrawes, B. and DesRoches, R. (2007). Effect of ambient temperature on the hinge opening in bridges with shape memory alloy seismic restrainers. *Engineering Structures*, 29(9), 2294–2301. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.028>
- [9] Sharabash, A. M. and Andrawes, B. (2009). Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 31(2), 607–616. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.007>
- [10] Nunes, A. W., Lima, F. S., Oliveira, A. G., dos Reis, R. P. B., Dantas, M. R. and Silva, A. A. (2025). Experimental study on the dynamic behavior of a small-scale cable-stayed bridge model with passive dampers using SMA mini springs. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 36(13), August 2025. <https://doi.org/10.1177/1045389X251356129>
- [11] Zhou, L. and Alam, M. S. (2024). Seismic reliability-based assessment and design optimization of shape memory alloy bars in concrete bridge piers. *Engineering Structures*, 322, 119226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119226>
- [12] Zhou, L. and Alam, M. S. (2024). Seismic performance of novel rocking bridge piers with SMA cables and collapse-proof cables against near-fault ground motions. *Engineering Structures*, 322, 119226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119226>
- [13] 1. Andrawes, B. (2024). Superelastic SMA Dampers for Long-Span Bridges. In *Shape Memory Alloys in Civil Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68001-4_4
- [14] 2. Li, S., Dezfouli, F.H., Wang, J.Q., & Alam, M.S. (2022). Utilizing a new self-centering hysteresis model to assess the seismic vulnerability of a long-span cable-stayed bridge equipped with SMA wire-based roller bearings. *Advances in Bridge Engineering*, 3(14). <https://doi.org/10.1186/s43251-022-00064-z>
- [15] 4. Sun, L., Chen, L., & Huang, H. (2022). Stay cable vibration mitigation: A review. *Advances in Structural Engineering*, 25(16), 3368–3404. <https://doi.org/10.1177/13694332221132316>
- [16] 5. Sharry, T., Guan, H., Nguyen, A., Oh, E., & Hoang, N. (2022). Latest Advances in Finite Element Modelling and Model Updating of Cable-Stayed Bridges. *Infrastructures*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7010008>
- [17] Abdle-Ghaffar, A. M. and Nazmy, A. S. (1991). 3-D nonlinear seismic behavior of cable-stayed bridges. *Journal of Structural Engineering*, 117(11), 3456–3476. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:11\(3456\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3456))
- [18] Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (2000). *The finite element method*. 5th ed. New York: McGraw-Hill.