Ferdowsi Civil Engineering, 36, 4, 2024. (83-98)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Prestressing Effect on SMA Damper Aimed at Improving the Seismic Performance of Marine Structures

Research Article

Mehran Rostami[1], Mohammad Javad Hamidia[2], Mohammad Javad Mahmoodi[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.85526.1274

1- Introduction

The rise in energy demand has spurred the discovery of new energy sources. The extensive utilization of maritime docks, including the exploration of fossil fuels, brings particular focus to these structures and the maintenance of their essential functions.

Offshore platforms situated in the challenging ocean environment face various environmental forces, such as waves, ice, winds, and earthquakes, over extended periods. These factors can lead to catastrophic failures, even if the structure remains stable. The vibrations induced by these forces can result in operational inefficiencies, damage to platform facilities, and discomfort for the crew. Decreasing the vibration amplitude in an offshore platform by 15% can significantly prolong its lifespan and reduce maintenance and inspection expenses. Efforts have been undertaken to enhance seismic safety, improve serviceability, and boost the reliability of civil infrastructure. Utilizing structural control systems is among the most effective methods to reduce seismic response and enhance the resilience of structures. Previous research indicated that employing shape memory alloys as dampers for offshore platforms is advantageous due to their favorable characteristics, including adequate fatigue resistance, long-term dependability, and suitable mechanical properties.

2- Mechanical Properties of Shape Memory Alloys

Shape memory alloys are a new generation of smart materials that can recover their original shape after experiencing a large strain. This alloy consists of two main phases, austenite and martensite, which exhibit distinct properties through phase transformation. The shape memory alloy-based damping system is a self-center system. It features the ability to provide force feedback and energy absorption. This system consists of shaped memory alloy wires arranged on a cylinder.

3- Analysis of frame and modeling

In this research, the impact of pre-stressing shape memory alloy wires in a shape memory alloy-based damping system on enhancing the seismic performance of marine structures was examined. To achieve this, a single-degree-of-freedom frame representing a simplified marine structure was simulated using the OpenSees software. The frame comprises two massless columns and a rigid base, making it a single-degree-of-freedom system. It has a height of 3657 millimeters and a span length of 7314 millimeters. ElasticBeamColumn elements were utilized to simulate the beams and columns in the software. The configuration and elements employed for modeling the damper are illustrated in Figure 1.

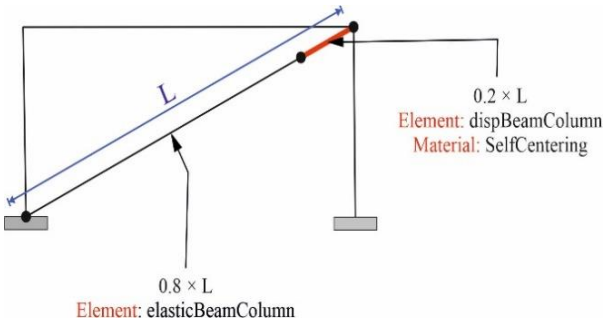


Figure 1. Placement and modeling of the seismic system in the frame

To analyze the response of marine structures in different scenarios, the structure undergoes ground motions. The frame under investigation was examined in non-seismic conditions, as well as with a shape memory alloy seismic system where the radius of wires was doubled. To assess the impact of pre-stressing on the seismic system, pre-stressing at 5%, 10%, and 15% of the activation stress was considered, and the frame was reevaluated. Seven pairs of ground motions were selected and applied to the structure after scaling.

Afterwards, the impact of structural parameters on the study results was investigated. Three different scenarios

*Manuscript received November 24, 2023, Revised May 18, 2024, Accepted June 22, 2024.

[1] M.Sc. student of Earthquake Engineering, Shahid Beheshti University

[2] Assistant Prof., Faculty of Civil Engineering, Water and Environment Engineering, Shahid Beheshti University

[3] Corresponding author. Associate Prof., Faculty of Civil Engineering, Water and Environment Engineering, Shahid Beheshti University. **Email:** mj_mahmoudi@sbu.ac.ir

for the frame were created by altering the column stiffness through various elastic modulus variations. The cases are outlined in Table 1. Similar to the preceding section, a time history analysis was conducted on the frames.

Table 1. Frame Specifications

No.	Beam Elastic Modulus (kN/mm^2)	Columns Elastic Modulus (kN/mm^2)	Fundamental Periode (sec)
1	206.84	150	0.64
2	206.84	206.84	0.54
3	206.84	310	0.44

4- Conclusions

In this study, a single-degree-of-freedom frame, a simplified form of marine structures, was analyzed using the OpenSees software. The frame underwent seven pairs of scaled ground motions in multiple stages and various conditions in the far field of time-history analysis. A detailed examination of the structure was carried out to assess the impact of increasing the cross-sectional area of shape memory alloy wires and the influence of pre-stressing on the performance of a shape memory alloy-based seismic isolation system. Analysis of the results revealed that incorporating a damping system in the structure leads to a decrease in the maximum displacement. The results indicated that enlarging the cross-sectional area of the cables and applying pre-stress to them results in a reduction in the maximum displacement of the frame. Furthermore, augmenting the levels of pre-stress causes an enhancement in the structure's performance against any ground motion. As the frame stiffness increases, the displacement decreases. In scenario 3, with increased frame stiffness, the shape memory alloy damper has a more significant effect, leading to a 12% decrease in displacement. In scenarios 1 and 2, reductions of 4% and 6% in displacement, respectively, compared to the state without the damper, have been observed. The analysis results are as follows:

1- Increasing the cross-sectional area of the wires in the structural system and doubling their radius led to a 25.3% enhancement in reducing the maximum frame displacement.

2- The enlargement of the wires' cross-sectional area in the structural system amplified the impact of pre-stressing. Doubling the wire radius from the initial conditions resulted in a 25.3% improvement without pre-stressing and a 32.2% improvement with pre-stressing compared to the initial state.

3- Enhancing the frame stiffness and decreasing its cycle time intensified the efficacy of incorporating a damper without pre-stressing in reducing displacement. In this scenario, the effect of wire pre-stressing on performance enhancement was reduced. Decreasing the frame stiffness increased the pre-stressing effect, reaching 7%.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

بررسی اثر پیش‌تنیدگی بر میراگر متشکل از آلیاژ حافظه‌دار شکلی به هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دریایی*

مقاله پژوهشی

مهران رستمی[۱] محمدجواد حمیدیا[۲] محمدجواد محمودی[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.85526.1274

چکیده *مکانیسم‌های کنترل سازه‌ای به عنوان روشی قابل اعتماد و کارآمد برای بهبود عملکرد لرزه‌ای و پایداری سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکپارچگی و تأمین پایداری زیرساخت‌های عمرانی مانند سازه‌های دریایی و خصوصاً سکوهای نفتی که در معرض شرایط سخت محیطی قراردارند از چالش‌هایی است که مهندسان طراح به دنبال برطرف کردن آن هستند. ایجاد روش‌های نوین و همچنین بهبود عملکرد سیستم‌های پیش‌تر توسعه یافته می‌تواند کمک قابل توجهی به برطرف نمودن این چالش کند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر سطوح مختلف پیش‌تنیدگی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی موجود در میراگر غیرفعال مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی و تأثیر آن در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه بوده است. برای این منظور، یک سازه دریایی ساده شده مدل‌سازی شده و سیستم کنترل سازه‌ای میراگر غیرفعال مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در آن تعبیه شده‌است. نتایج حالات مختلف پس از اعمال هفت جفت حرکت زمین مقیاس شده از زلزله‌ها حوزه دور و تحلیل تاریخچه زمانی، ارزیابی شده‌ا ست. نتایج به د ست آمده گویای آن ا ست که افزایش سطح مقطع سیم‌ها و افزایش میزان پیش‌تنیدگی آن‌ها باعث کاهش جابجایی حداکثر سازه می‌شود و عملکرد کلی سیستم کنترل سازه‌ای را بهبود می‌بخشد. همچنین با درنظر گرفتن سه حالت مختلف برای قاب و تحلیل آن، تأثیر سختی قاب بر نتایج مورد ارزیابی قرارگرفت.*

واژه های کلیدی آلیاژ حافظه‌دار شکلی، کنترل غیرفعال، استهلاک انرژی، پیش‌تنیدگی، سازه دریایی.

Prestressing Effect on SMA Damper Aimed at Improvement of Seismic Performance of Marine Structures

M. Rostami M. Hamidia M. J. Mahmoodi

Abstract *Structural control mechanisms are used as a reliable and efficient methods to enhance seismic performance and stability of structures. Ensuring the integrity and stability of civil infrastructures such as marine structures, especially oil platforms exposed to difficult environmental conditions, poses challenges that engineers strive to overcome. Introducing innovative methods and improving existing system performance can significantly aid in addressing these challenges. The objective of the present research is to investigate the effect of different levels of pre-stressing on shape memory alloy wires in a passive damper based on shape memory alloy and its impact on reducing the seismic response of marine structures. For this purpose, a simplified marine structure is modeled, and a structural control system with a passive damper using shape memory alloy is incorporated. The results of different scenarios after applying seven sets of scaled ground motions from far field earthquakes and time history analyses have been evaluated. The obtained results indicate that increasing the cross-sectional area of the wires and increasing their pre-stress level reduces the maximum displacement of the structure and improves the overall performance of the structural control system. Furthermore, considering three different scenarios for the frame, the influence of frame stiffness on the results has been assessed.*

Key words Shape memory alloy, Passive control, Energy dissipation, Prestressing, Marine structure.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۴/۲ می‌باشد.

(۱) دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، مهندسی زلزله، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۲) استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۳) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

Email: mj_mahmoudi@sbu.ac.ir

مقدمه

افزایش نیاز و تقاضا برای انرژی منجر به کشف منابع جدید انرژی می‌گردد. سوخت‌های فسیلی تا به امروز تامین کننده عمده انرژی مورد نیاز بشر بوده که خود بخشی از منابع دریایی است. برای اکتشاف این انرژی از سکوها و سازه‌های دریایی استفاده می‌گردد [1]. علاوه بر آن کاربردهای فراوان دیگر اسکله‌ها و سازه‌های دریایی توجه ویژه‌ای به این نوع سازه‌ها و حفظ سرویس‌دهی مطلوب آن‌ها جلب می‌کند [2]. انواع مختلفی از سکوهای دریایی موجود است که می‌توان آن‌ها را به سکوهای با کف ثابت و سکوهای شناور تقسیم کرد که دارای اهداف خاص و پیکربندی متفاوتی هستند.

سکوهای دریایی که در مدت زمان طولانی در محیط بسیار سخت اقیانوس قرار می‌گیرند، ناگزیر بارهای محیطی مختلفی اعم از امواج، جریان‌ها، یخ، بادها و زلزله را تجربه می‌کنند [3] که ممکن است منجر به شکست فاجعه آمیز گردد. حتی در صورت پایدار ماندن سازه، لرزش ایجاد شده ناشی از بارها می‌تواند ناکارآمدی عملیات، خرابی تاسیسات عرشه و همچنین ناراحتی خدمه را در پیش داشته‌باشد. شایان ذکر است که کاهش دامنه ارتعاش یک سکوی دریایی به میزان ۱۵ درصد، می‌تواند عمر مفید را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و همچنین منجر به کاهش هزینه نگهداری و بازرسی سازه‌ها شود [4].

اهمیت یافتن راه‌های جدید برای کاهش و به حداقل رساندن خسارات ناشی از زلزله دلیل اصلی تلاش‌های بسیاری است که برای رفع خطر لرزه‌ای، افزایش خدمت رسانی و قابلیت اطمینان زیرساخت‌های عمرانی انجام شده است [5]. استفاده از سیستم‌های کنترل سازه‌ای از موثرترین رویکردها در کاهش پاسخ لرزه‌ای و حفظ یکپارچگی و همچنین بهبود تاب آوری سازه‌ها [6,7] هستند که در مناطق مختلف بسته به نوع نیاز می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. با توجه به مقدار انرژی مورد نیاز برای فعال‌سازی سیستم‌های کنترلی، سه دسته از سیستم‌های کنترل به عنوان سیستم‌های غیرفعال، نیمه فعال و فعال تقسیم‌بندی می‌گردند. میراگرهای مایع تنظیم شده [8]، میراگرهای ویسکوالاستیک و اصطکاکی [9,10]، میراگر جرمی تنظیم شده [11,12] و سیستم جداساز میرایی [13] نمونه‌هایی از سیستم‌های غیرفعال هستند. برای نمونه از سیستم کنترل نیمه‌فعال می‌توان از سیستم مبتنی بر الاستومرهای سیال مغناطیسی که در سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار گرفته [14] نام برد. همچنین میراگر جرم فعال و میراگر جرمی تنظیم شده فعال [15,16] نمونه‌هایی از سیستم‌های کنترل فعال می‌باشند. در سازه‌های دریایی به مانند سایر سازه‌ها از انواع مختلف سیستم‌های کنترل سازهای استفاده شده و عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات گذشته سازه‌های دریایی در شرایط مختلف و تحت اثر نیروی امواج، باد، زلزله و همچنین نشست و روانگرایی و غیره بررسی شدند [15-19].

در مطالعه واعظی و همکاران [20] اثر قرارگیری میراگر ویسکوز بر پاسخ دینامیکی سازه دریایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سه مدل مختلف قرارگیری سیستم مهاربندی مطالعه شد. چن (Chen) و همکاران [21] در سال ۲۰۲۱ عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده و میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در کنترل ارتعاشات ناشی از ترکیب بارهای باد، موج و جریان بر برج‌های توربین‌های فراساحلی بررسی کردند و مشاهده گردید استفاده از سیستم‌های کنترل سازه مذکور کاهش قابل توجهی در جابجایی و شتاب بالای توربین را در پیش دارد. در مطالعه‌ای که توسط زارعی و همکاران [22] صورت گرفت از میراگر نیمه فعال مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی (Shape memory alloy) و سیال مغناطیسی (Magnetorheological fluid) در سازه دریایی که بصورت یک درجه آزادی مدل سازی شده استفاده گردید و تحت نیروی زلزله مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه دیگری [1] پاسخ لرزه‌ای یک سکوی دریایی مجهز به میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی بررسی و تاثیر آن بر دامنه ارتعاشات سکوی دریایی مورد بحث قرار گرفته است. این مشخص گردید که با توجه به ویژگی‌های مطلوب از جمله مقاومت کافی در برابر خستگی، قابلیت اطمینان طولانی مدت و خواص مکانیکی مناسب، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی به عنوان میراگر برای سکوهای دریایی مطلوب است.

در این پژوهش تاثیر پیش‌تنیدگی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم میرایی مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دریایی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور قاب یک درجه آزاد که به عنوان نمونه ساده شده سازه دریایی در نظر گرفته شده، در نرم‌افزار OpenSees [30] مدل گشت. میراگر مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب تعبیه شد و سه سطح مختلف پیش‌تنیدگی به سیم‌های سیستم اعمال

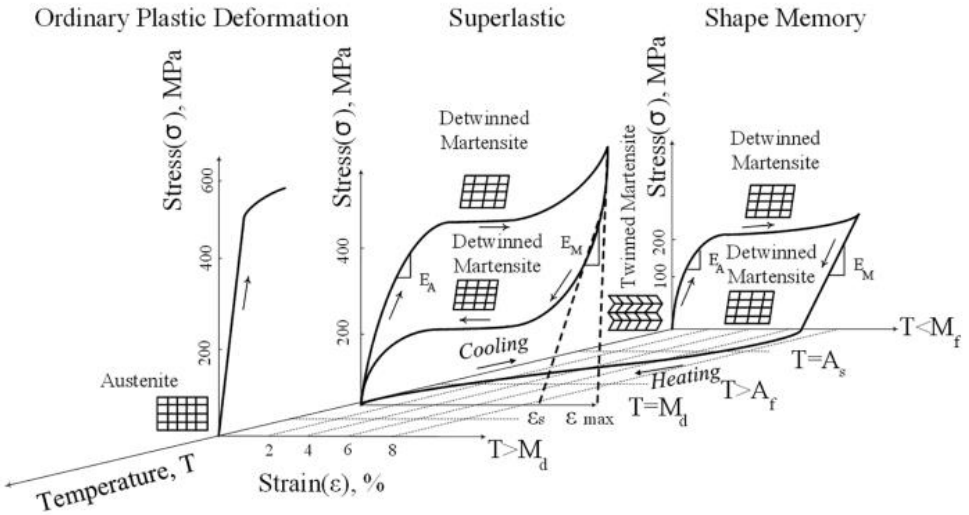
شد. همچنین اثر افزایش سطح مقطع سیم‌ها بر عملکرد سیستم میرایی غیرفعال مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در ادامه برای درنظر گرفتن تاثیر سختی قاب بر نتایج، سه حالت مختلف برای قاب درنظر گرفته شد و برر سی گردید.

خواص مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ارائه دهنده نسل جدیدی از مصالح هوشمند و دربردارنده قابلیت بازیابی شکل از پیش تعریف شده پس از تجربه یک کرنش بزرگ می‌باشند [23]. رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سطح کلان ساختار در دو فاز مارتنزیت (Martensite) و آستنیت (Austenite) تقسیم می‌شود. فاز مارتنزیت فاز ضعیف‌تر بوده که در دمای پایین و تنش‌های بالا پایدار است و فاز آستنیت که فاز قوی‌تر است در دمای بالا و تنش‌های پایین پایدار است [23,24].

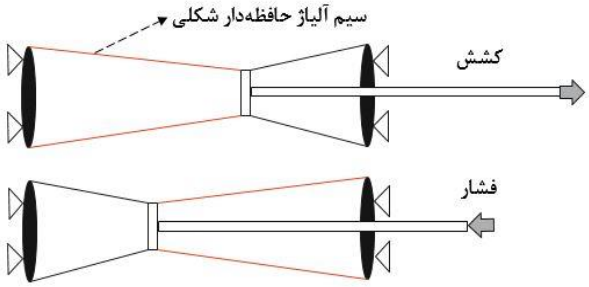
با تبدیل فاز آلیاژ حافظه‌دار شکلی خواص متمایزی پیدا می‌کند. هنگامی که این آلیاژ تحت کرنش بزرگ پلاستیک قرار می‌گیرد، می‌تواند با اعمال گرما شکل اصلی خود را بازیابی کند. این ویژگی با عنوان اثر حافظه‌شکلی (Shape memory effect) شناخته می‌شود. ویژگی مهم دیگر آن خاصیت سوپرالاستیسیته (Superelsticity) است که موجب بازیابی شکل اولیه خود از کرنش غیرخطی بصورت آنی و پس از حذف تنش می‌شود. به طور کلی، تغییر در ریز ساختارهای کریستالی مسئول خواص ذکر شده است که با توجه به این ویژگی‌ها آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌توانند انرژی القایی بار خارجی را در طول فرآیند بارگذاری و باربرداری جذب کنند [25]. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با ساختار کاملا آستنیتی رفتار سوپرالاستیسیته را نشان می‌دهند، در حالی که با ساختار مارتنزیت رفتار حافظه شکلی نمایان می‌گردد. در شکل (۱) تبدیلات فازی و شکل‌گیری ویژگی‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی نشان داده شده‌است. Af,As,Mf,Ms به ترتیب بیانگر دمای شروع فاز مارتنزیت، دمای پایان فاز مارتنزیت، دمای شروع فاز آستنیت و دمای پایان فاز آستنیت می‌باشند همچنین EA و EM بیانگر مدول یانگ در فاز آستنیت و مارتنزیت هستند.

میراگرهای مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی به‌طور گســترده در پل‌ها و ساختمان‌ها برای ارتقا رفتار سازه ا ستفاده می شود. این میراگرها پاســخ ارتعاش را ســرکوب کرده و جابجایی‌های نسبی مفصل را در سازه کاهش می‌دهند [26]. بدیهی ا ست که ســیســتم‌های میرایی، رایج‌ترین ســیســتم‌های مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در کاربردهای مهند سی عمران برای محافظت از سازه در برابر تحریکات خارجی هستند. این سیستم‌ها باعث افزایش جذب انرژی و قابلیت تمرکز مجدد، کاهش دریفت درون طبقه، جابجایی سقف و شتاب سازه‌ها می‌شود.



شکل ۱ نمودار شماتیک تنش-کرنش-دما آلیاژ حافظه‌دار شکلی [23]

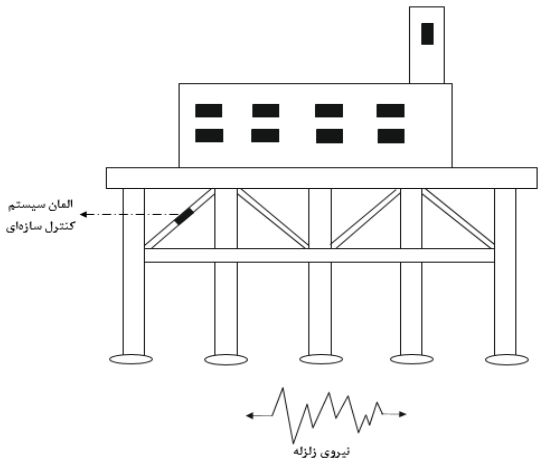
سیستم میرایی مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی، سیستمی مرکزگرا می‌باشد. این سیستم دربردارنده خصوصیت‌های تأمین مکانیزم نیروی بازگردانندگی و تأمین مکانیزم جذب انرژی هست [27,28]. سیستم مذکور از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی که بر روی سیلندر قرارگرفته تشکیل شده است. سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر طبق خاصیت سوپرالاستیسیته خود در این سیستم میرایی قرار گرفته‌اند. نحوه قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به گونه‌ای است که فارغ از جهت بارگذاری، تحت کشش قرار می‌گیرند، مطابق شکل (۲) در مطالعه‌ای که توسط زارعی و همکاران [29] صورت پذیرفت، به منظور به کار گیری یک سیستم هوشمند در سازه‌های دریایی، سیستم میرایی مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد ارزیابی قرارگرفت.



شکل ۲ مکانیسم عملکردی سیستم مهاربندی مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی

تحلیل قاب

در شکل (۳) نمونه‌ای از قرار گیری سیستم میرایی در سازه‌های دریایی نشان داده شده‌است [29]. به منظور بررسی رفتار دینامیکی سازه دریایی بدون سیستم میرایی و همچنین مقایسه با حالتی که سیستم میرایی در سازه موجود است و شرایط آن ، از قاب ارائه شده در پژوهش زارعی و همکاران [3] استفاده شد، شکل (۴) قاب ارائه شده در این پژوهش به صورت ساده شده از یک طبقه و بدون هیچ سیستم اضافی که برروی زمین ثابت شده تشکیل شده است. این قاب به عنوان یک نمونه ساده شده از سازه‌های دریایی بیان شده و مورد تحلیل قرار گرفته است [3,22]. رابطه معادله حرکت قاب تحت تحریک حرکت زمین در پژوهش‌های مذکور بیان گردیده است.



شکل ۳ سازه دریایی مجهز به سیستم میرایی مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی

ارتفاع قاب ۳۶۵۷ میلی‌متر و طول دهانه آن ۷۳۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سایر مشخصات لازم برای مدل سازی قاب مطابق پژوهش مرجع بوده و در بخش مدلسازی بیان شده‌است.

قاب مذکور از دو ستون بدون جرم و یک کف صلب تشکیل شده است و در نتیجه قاب معادل یک سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود.

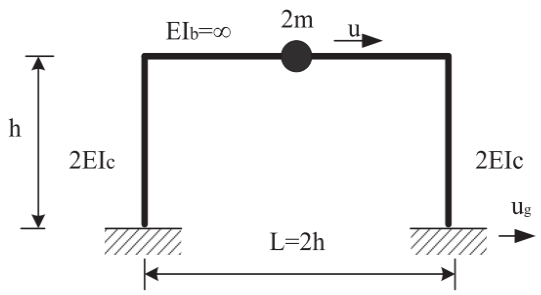
به منظور تعیین دقت و صحت سنجی قاب مدل شده، فرکانس زاویه‌ای طبیعی به دست آمده مطابق رابطه (۱) با پاسخ تحلیلی مقایسه می‌گردد:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{2m}} \qquad (۱)$$

که در آن k و m سختی سازه و جرم قاب ا ست. سختی برطبق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$k = 24\frac{(2EI_C)_C}{h^3} \qquad (۲)$$

در این معادله E، I_c و h به ترتیب نشـان‌دهنده مدول یانگ، ممان اینرسی هر ستون و ارتفاع قاب هستند.



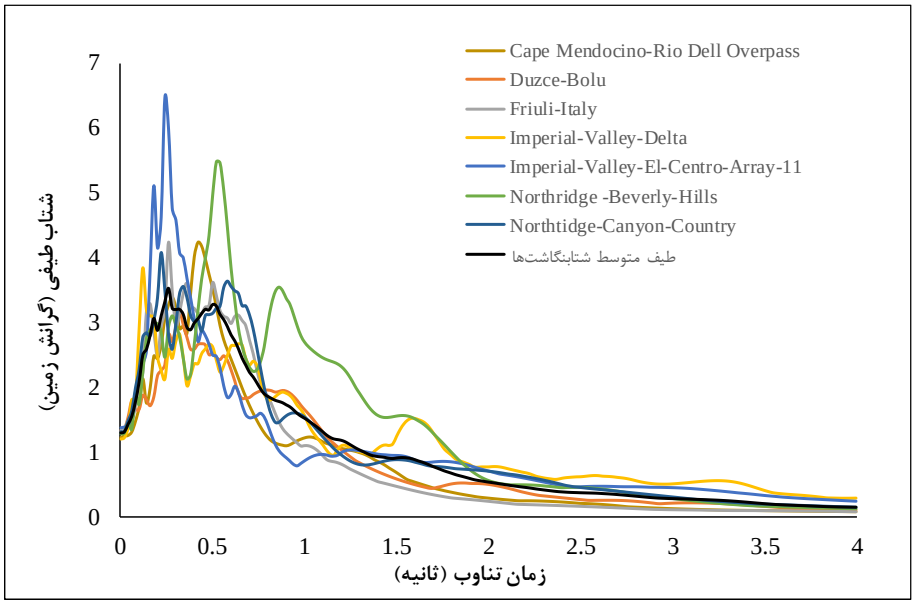
شکل ۴ شکل شماتیک از سازه دریایی ساده شده [22]

زلزله‌های ورودی

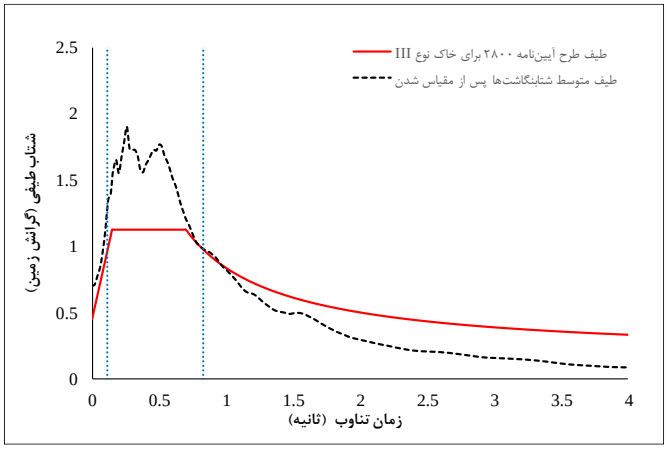
به منظور دستیابی به پاسخ دینامیکی سازه دریایی در حالت‌های مدنظر، سازه در معرض حرکات زمین قرار می‌گیرد. حالت‌های مورد بررسی شامل قاب بدون سیستم میرایی، قاب مجهز به سیستم میرایی با و بدون پیش‌تنیدگی و حالتی که سطح مقطع سیم‌های موجود در سیستم میرایی هوشمند افزایش می‌یابد است. برای این منظور هفت جفت حرکت زمین انتخاب شده و به سازه اعمال می‌گردد. ویژگی‌های هفت جفت حرکت زمین انتخاب شده در جدول (۱) آورده شده است. تمامی هفت جفت حرکت زمین انتخاب شده از نوع زلزله‌های مربوط به حوزه دور بوده و دارای بزرگا گشتاور بین ۶/۵ تا ۷/۱ می‌باشد. در شکل (۵) طیف شتابنگاشت‌ها با فرض میرایی پنج درصد رسم شده است. رکوردهای زلزله مذکور مطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ [30] مقیاس گردیده و با طیف آیین نامه مقایسه گشتند. برای این منظور ابتدا هر زوج شتابنگاشت به مقدار حداکثر شتاب خود مقیاس گردید و سپس میانگین طیف هفت زوج شتابنگاشت در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب سازه مطابق شکل (۶) با طیف آیین‌نامه مقایسه و مقیاس گردید.

جدول ۱ اسامی حرکات زمین مورد بررسی قرار گرفته در تحلیل

شماره	نام	ایستگاه	حداکثر شتاب زمین (g)	سال	بزرگای گشتاوری (Mw)
۱	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	۰/۴۵	۱۹۹۲	۷/۰
۲	Duzce,Turkey	Bolu	۰/۸۲	۱۹۹۹	۷/۱
۳	Friuli, Italy	Tolmezzo	۰/۵	۱۹۷۶	۶/۵
۴	Imperial Valley	Delta	۰/۴۶	۱۹۷۹	۶/۵
۵	Imperial Valley	El Centro Array #11	۰/۳۹	۱۹۷۹	۶/۵
۶	Northridge	Beverly Hills – Mulhol	۰/۳۴	۱۹۹۴	۶/۷
۷	Northridge	Canyon Country-WLC	۰/۴	۱۹۹۴	۶/۷



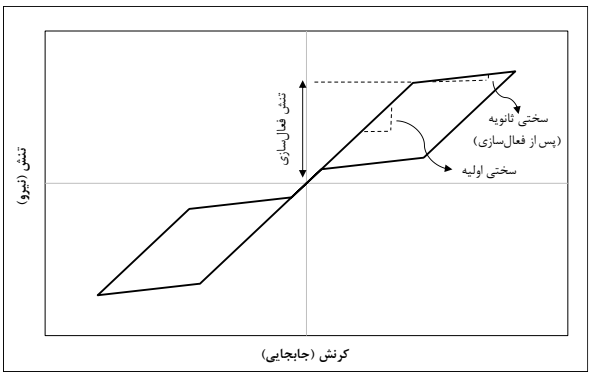
شکل ۵ طیف حرکات زمین مورد استفاده در تحلیل سازه



شکل ۶ مقایسه طیف مقیاس‌شده با طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای خاک نوع III

مدلسازی

به منظور مدلسازی و بررسی قاب مورد مطالعه، از نرم‌افزار OpenSees 2.5.0 [31] استفاده گردید. به منظور مدل‌سازی تیر و ستون‌ها از المان elasticBeamColumn در نرم‌افزار استفاده گردید. مدول الاستیسیته و ممان اینرسی تیر و ستون‌ها به ترتیب ۲۰۶/۸۴ کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع و ۱۰۶×۱۳۳/۱۹ میلیمتر مکعب درنظر گرفته شد. وزن سقف ۱۰۰ کیلونیوتن و میرایی رایلی دو درصد تعیین گردید [32].

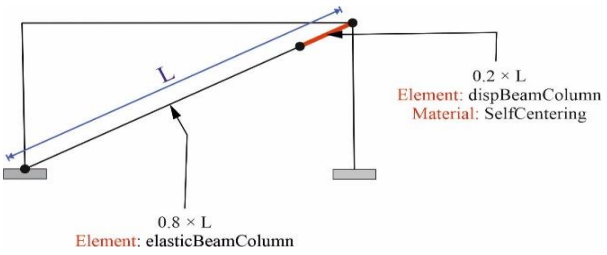


شکل ۷ نمودار رفتار تنش کرنش مصالح خود مرکزگرا

برای مدل کردن سیستم میرایی هوشمند مورد مطالعه در نرم‌افزار از مصالح خود مرکزگرا استفاده گردید. منحنی رفتاری این مصالح در شکل (۷) نشان داده شده‌است و همچنین مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است. نحوه قرارگیری و المان‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی میراگر در شکل (۸) نشان داده شده‌است [3,32]. شکل (۹) منحنی رفتار المان آلیاژ حافظه‌دار شکلی تعبیه شده در قاب، تحت رکورد زلزله Beverly Hills – Mulhol را به تصویر کشیده است. به منظور بررسی اثر پیش‌تنیدگی بر سیستم، در کنار المان آلیاژ حافظه‌دار شکلی، یک المان با داشتن نقش فیوز و برای کنترل کردن مقدار پیش‌تنیدگی استفاده گردید.

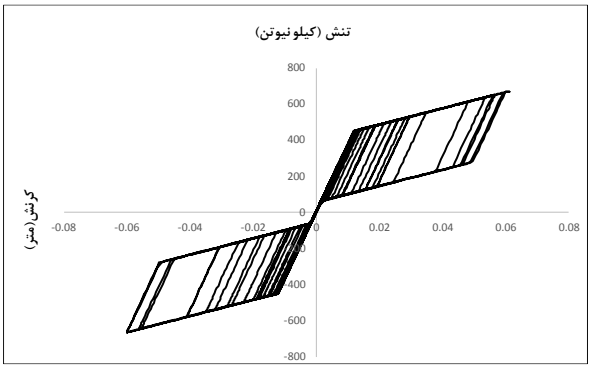
جدول ۲ مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد بررسی [32]

مشخصات مکانیکی	مقدار
سختی اولیه	۳۷۵۰۰ (kN/mm^2)
سختی پس از فعال‌سازی	۴۵۰۰ (kN/mm^2)
تنش فعال‌سازی رو به جلو (نیرو)	۴۵۰(MPa)
نسبت تنش فعال‌سازی به معکوس آن (نیرو)	۰/۸۶



شکل ۸ نحوه قرارگیری و مدل‌سازی سیستم میرایی در قاب

قاب مورد مطالعه در حالت بدون سیستم میرایی، همراه با سیستم میرایی آلیاژ حافظه‌دار شکلی و سیستم ذکر شده با دو برابر کردن شعاع سیم‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی اثر پیش‌تنیدگی در سیستم میرایی، با فرض پیش‌تنیدگی به میزان ۵٪، ۱۰٪ و۱۵٪ تنش فعال‌سازی، بار دیگر قاب مذکور مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۹ منحنی تنش-کرنش المان آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت اثر رکورد زلزله Beverly Hills – Mulhol

در ادامه تاثیر پارامترهای سازه‌ای بر نتایج مورد مطالعه قرارگرفت. برای این منظور با تغییر سختی ستون‌ها با استفاده از تغییر مدول الاستیسیته آن‌ها سه حالت مختلف مطابق جدول (۳) ایجاد گردید. طول تیر و ستون‌های قاب در هر سه حالت یکسان است. لازم به ذکر است که حالت شماره ۲، حالت اصلی مورد مطالعه در این پژوهش است.

جدول ۳ مشخصات قاب‌ها

شماره	مدول الاستیسیته تیر (kN/mm^2)	مدول الاستیسیته ستون‌ها (kN/mm^2)	زمان تناوب اصلی قاب (sec)
۱	۲۰۶/۸۴	۱۵۰	۰/۶۴
۲	۲۰۶/۸۴	۲۰۶/۸۴	۰/۵۴
۳	۲۰۶/۸۴	۳۱۰	۰/۴۴

ارائه نتایج

نتایج میزان جابجایی حداکثر قاب در شرایط مختلف در جدول‌های (۴) و (۵) ارائه شده‌است. با بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها مشاهده می‌گردد که قرار گرفتن سیستم میرایی در سازه کاهش جابجایی حداکثر را نتیجه می‌دهد. از نتایج جابجایی قاب در شرایط مورد مطالعه مشخص می‌گردد که با افزایش سطح مقطع سیم‌ها و پیش‌تنیده کردن آن‌ها جابجایی حداکثر قاب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سطوح پیش‌تنیدگی، بهبود در عملکرد سازه تحت هر حرکت زمین مشاهد می‌شود. قرارگرفتن میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب، زمان تناوب آن را در حدود ۶ درصد کاهش می‌دهد. مطابق شکل (۸) مشاهده می‌گردد که به طور میانگین، افزایش سطح مقطع سیم‌ها به دو برابر میزان اولیه آن‌ها، بهبود عملکرد در کاهش جابجایی حداکثر سازه را ۲۵/۳ درصد نسبت به حالت اولیه سیستم میرایی و ۳۱/۷ درصد در مقایسه با حالتی که سیستم میرایی در سازه موجود نیست بهبود می‌بخشد. این در حالی است که اگر در حالت ذکر شده سیم‌ها به میزان ۱۵ درصد تنش فعال‌سازی پیش‌تنیده گردند بهبود ۳۲/۲ و ۴۳/۶ درصدی در جابجایی حداکثر سازه حاصل می‌گردد.

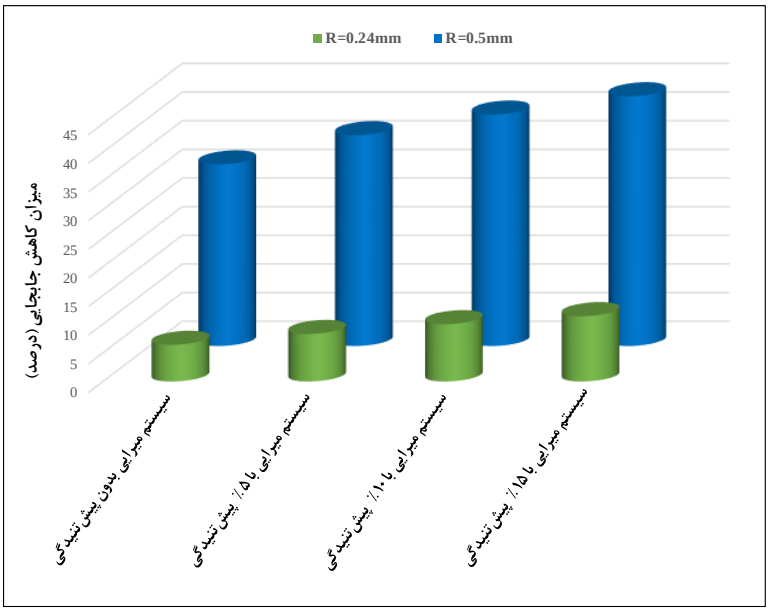
تاثیر افزایش سطح پیش‌تنیدگی در بهبود عملکرد سازه، با افزایش سطح مقطع سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی رخ‌نمون بیش‌تری پیدا می‌کند. این نکته در شکل (۱۰) به صورت واضح دیده می‌شود. با دو برابر شدن سطح مقطع سیم‌ها عملکرد سیستم بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند و این بهبود عملکرد با پیش‌تنیده کردن سیم‌ها و افزایش سطح پیش‌تنیدگی افزایش می‌یابد. افزایش سطح مقطع سیم‌ها باعث افزایش سختی قاب نیز می‌گردد.

جدول ۴ نتایج میزان جابجایی حداکثر سازه در حالت بدون وجود سیستم میرایی و همراه با سیستم میرایی اولیه در حالات مختلف

نام ایستگاه	جابجایی حداکثر سازه (میلیمتر)				
	بدون سیستم میرایی	همراه با سیستم میرایی	سیستم میرایی با ۵٪ پیش‌تنیدگی	سیستم میرایی با ۱۰٪ پیش‌تنیدگی	سیستم میرایی با ۱۵٪ پیش‌تنیدگی
Rio Dell Overpass	۹۱	۸۹	۸۹	۸۸	۸۷
Bolu	۱۱۱	۹۸	۹۶	۹۵	۹۲
Tolmezzo	۱۱۵	۱۰۸	۱۰۶	۱۰۵	۱۰۳
Delta	۸۱	۷۴	۷۳	۷۲	۷۱
El Centro Array #11	۸۵	۸۲	۸۰	۷۷	۷۶
Beverly Hills – Mulhol	۲۰۹	۲۰۳	۱۹۸	۱۹۳	۱۸۹
Canyon Country-WLC	۱۱۶	۱۰۱	۹۹	۹۸	۹۶

جدول ۵ نتایج میزان جابجایی حداکثر سازه در حالت بدون وجود سیستم میرایی و همراه با سیستم میرایی با دو برابر شدن شعاع سیم‌ها در حالات مختلف

نام ایستگاه	جابجایی حداکثر سازه (میلیمتر)				
	بدون سیستم میرایی	همراه با سیستم میرایی	سیستم میرایی با ۵٪ پیش‌تنیدگی	سیستم میرایی با ۱۰٪ پیش‌تنیدگی	سیستم میرایی با ۱۵٪ پیش‌تنیدگی
Rio Dell Overpass	۹۱	۸۱	۷۷	۷۶	۷۳
Bolu	۱۱۱	۶۶	۶۳	۵۸	۵۵
Tolmezzo	۱۱۵	۷۹	۷۳	۶۷	۶۴
Delta	۸۱	۶۳	۵۷	۵۲	۴۸
El Centro Array #11	۸۵	۶۶	۶۲	۶۰	۵۹
Beverly Hills – Mulhol	۲۰۹	۱۲۳	۱۱۲	۱۰۵	۹۸
Canyon Country-WLC	۱۱۶	۷۳	۶۶	۶۳	۶۰

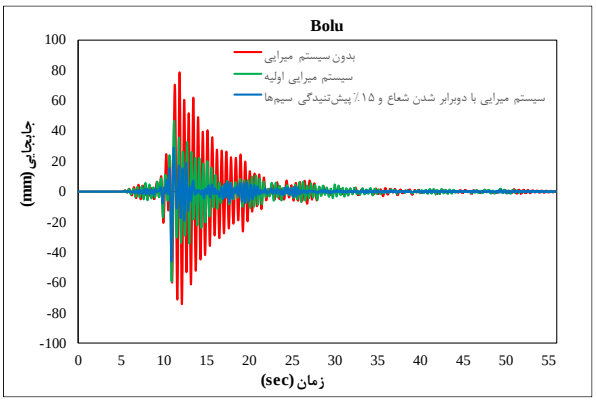


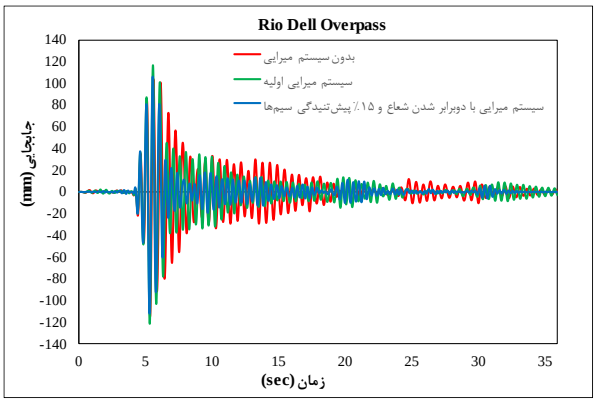
شکل ۱۰ میزان بهبود عملکرد سازه در حالات مختلف

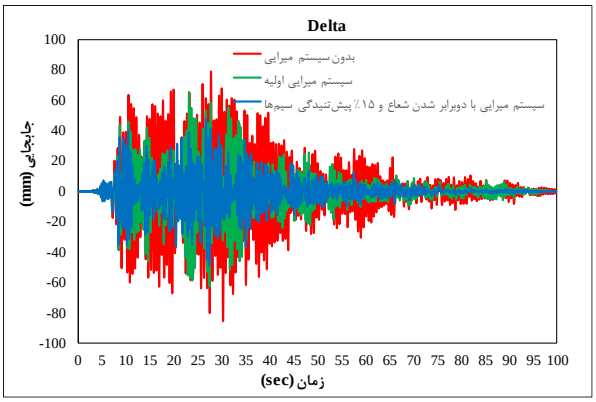
تاریخچه جابجایی برای حداکثر هر زوج شتابنگاشت در سه حالت قاب بدون سیستم میرایی، همراه با سیستم میرایی اولیه و همچنین برای حالتی که بهترین نتایج حاصل شده یعنی افزایش شعاع سیم‌ها به دو برابر میزان اولیه و ۱۵ درصد پیش‌تنیدگی، مطابق شکل (۱۱) ارائه شده‌است. کاهش دامنه جابجایی در این تصویر مشهود است.

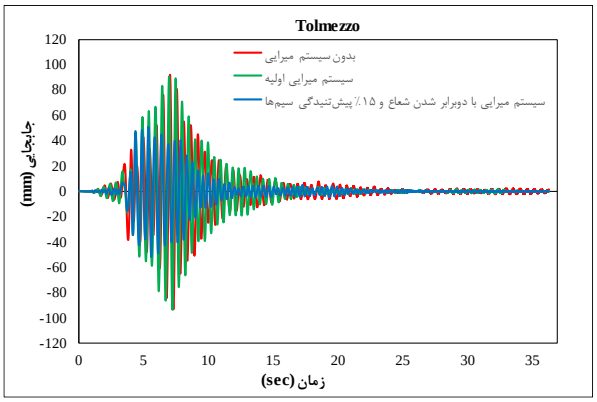
به منظور بررسی اثر سختی قاب بر نتایج، سه حالت مختلف در بخش قبل بیان گردید. قاب‌های مورد نظر به مانند قسمت قبل به وسیله هفت زوج شتابنگاشت مورد تحلیل قرارگرفتند. در شکل (۱۲) نتایج متوسط جابجایی حداکثر قاب‌ها بیان شده‌است.

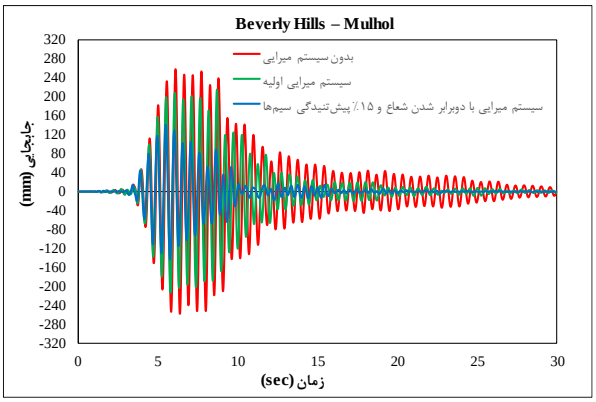
شماره‌های مورد استفاده در شکل مطابق جدول (۳) می‌باشد. به صورت کلی با افزایش سختی قاب جابجایی‌ها کاهش پیدا کرده است. میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در حالت ۳ که سختی قاب بیش‌تر است، تأثیر بیش‌تری داشته و ۱۲ درصد کاهش جابجایی را حاصل کرده است. در مقابل در حالت ۱ و۲ به ترتیب ۴ و ۶ درصد کاهش جابجایی نسبط به حالت بدون میراگر به دست آمده‌است. از نتایج به دست آمده مشخص گشت که اثر پیش‌تنیدگی با افزایش سختی قاب کم می‌شود به طوری که در حالت ۱ با ۱۵ درصد پیش‌تنیدگی ۷ درصد عملکرد میراگر بهبود یافته اما این میزان در حالت ۳، ۵ درصد است.

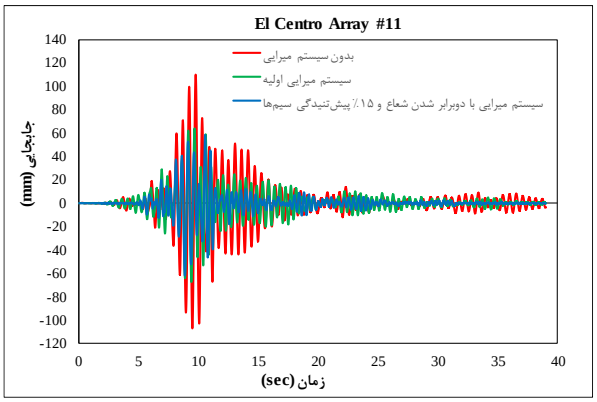


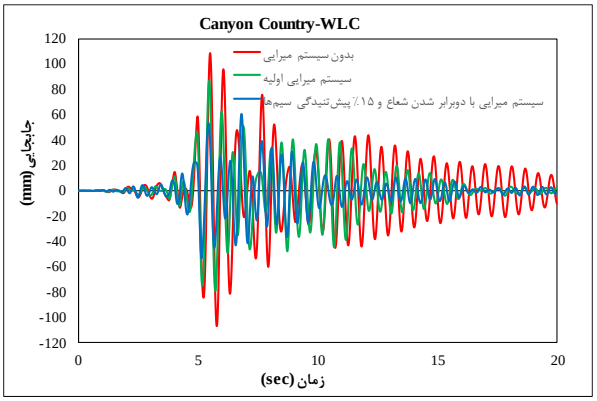




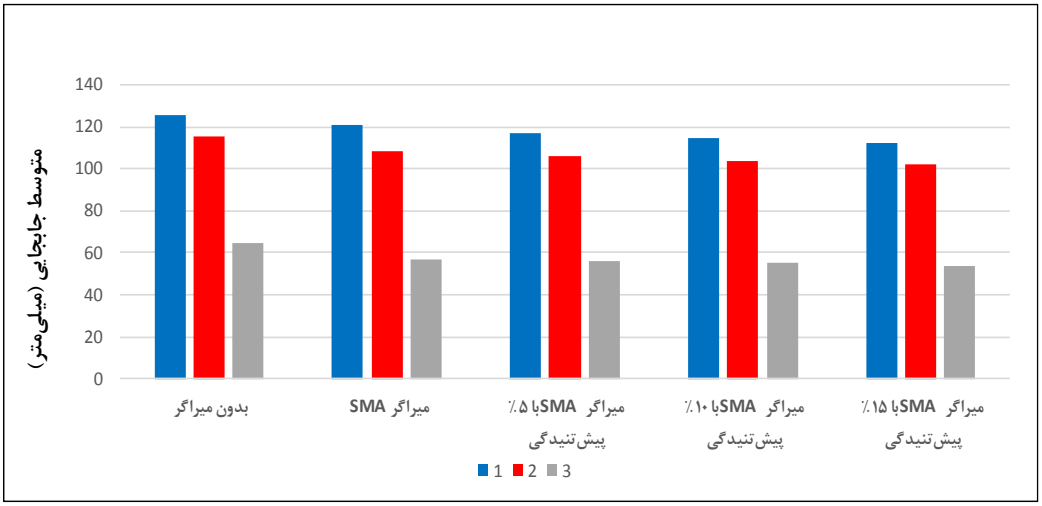








شکل ۱۱ تاریخچه جابجایی برای هفت زوج شتابنگاشت



شکل ۱۲ متوسط جابجایی با درنظر گرفتن سختی‌های مختلف برای قاب

نتیجه‌گیری

در این مقاله، قاب یک درجه آزادی به‌عنوان شکل ساده شده‌ای از سازه‌های دریایی، توسط نرم‌افزار OpenSEES مورد بررسی قرار گرفت. این قاب در چند مرحله و در شرایط مختلف به‌وسیله هفت جفت حرکت زمین مقیاس شده حوزه دور تحت تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفت. به منظور بررسی اثر افزایش سطح مقطع سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی و همچنین تاثیر پیش‌تنیدگی بر عملکرد سیستم میرایی مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی، تحلیل مرحله‌ای سازه صورت گرفت که نتایج تحلیل‌ها به شرح زیر است:

۱. با افزایش سطح مقطع سیم‌ها در سیستم میرایی و دو برابر کردن شعاع آن‌ها، تاثیر سیستم میرایی در کاهش جابجایی حداکثر قاب به میزان ۲۵/۳ درصد بهبود می‌گردد.

۲. با افزایش سطح مقطع سیم‌ها در سیستم میرایی، میزان تأثیر پیش‌تنیدگی افزایش می‌یابد. در حالتی که نسبت به شرایط اولیه شعاع سیم‌ها دو برابر گشتند، در حالت بدون پیش‌تنیدگی ۲۵/۳ درصد و در حالت با پیش‌تنیدگی ۳۲/۲ درصد بهبود نسبت به حالت اولیه مشاهده گردید.

۳. سطوح پیش‌تنیدگی بالاتر، نتایج مطلوب‌تری در مقایسه با سطوح پایین‌تر پیش‌تنیدگی حاصل می‌کنند و این نتیجه با افزایش سطح مقطع سیم‌ها نمایان می‌گردد.

۴. بهترین عملکرد در حالتی که شعاع سیم‌ها به دو برابر میزان اولیه افزایش یافت و سیم‌ها ۱۵درصد پیش‌تنیده شدند، حاصل شد.

۵. سیستم میرایی عملکرد کلی سازه را بهبود داده و استفاده از حالت نهایی، افزایش سطح مقطع و پیش‌تنیدگی سیم‌ها، در سازه‌های دریایی توصیه می‌گردد.

۶. با افزایش سختی قاب و کاهش زمان تناوب آن، اثر تعبیه میراگر بدون پیش‌تنیدگی بر کاهش جابجایی افزایش می‌یابد. در این حالت از تأثیر پیش‌تنیدگی سیم‌ها بر بهبود عملکرد کاسته می‌شود. با کاهش سختی قاب، اثر پیش‌تنیدگی افزایش یافته و به ۷ درصد می‌رسد.

پیشنهادات

در این مقاله عملکرد سازه دریایی ساده شده در حالت‌های مختلف مجهز به سیستم میرایی مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی که در معرض نیروهای زلزله قرار گرفته مورد بررسی قرار گرفته است. سازه دریایی در معرض نیروهای احتمالی دیگر مانند نیروی باد و امواج می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه می‌تواند بر دقت مدل سازه دریایی بیفزاید.

نشانه‌ها و علائم

M_s	دمای شروع فاز مارتنزیت
M_f	دمای پایان فاز مارتنزیت
A_s	دمای شروع فاز آستنیت
A_f	دمای پایان فاز آستنیت
E_M	مدول یانگ در فاز مارتنزیت

E_A	مدول یانگ در فاز آستنیت
k	سختی
m	جرم قاب
I_c	ممان اینرسی ستون
h	ارتفاع قاب

واژه نامه

آلیاژ حافظه‌دار شکلی	Shape Memory Alloy
مصالح هوشمند	Smart Material
سیال مغناطیسی	Magnetorheological Fluid
سیستم کنترل سازه‌ای	Structural Control System
میراگر	Damper
سیستم مرکزگرا	Self-Center System
اثر حافظه‌شکلی	Shape Memory Effect
سوپرالاستیسیته	Superelasticy
فاز آستنیت	Austenite Phase
فاز مارتنزیت	Martensite Phase
سازه‌های دریایی	Marine Structures
میرایی رایلی	Rayleigh damping
سکوهای دریایی	Offshore Platforms
تحلیل تاریخچه زمانی	Time History Analysis
نرم‌افزار اوپنسیس	OpenSees Software

سپاسگزاری

بدینوسیله از شاهین زارعی که ما را در انجام این پژوهش راهنمایی کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

مراجع

[1] B. L. Zhang, Q. L. Han, X. M. Zhang, "Recent advances in vibration control of offshore platforms," *Nonlinear Dynamics*, vol. 89, pp.755-771, (2017).

[2] R. Amirabadi, H. Arbabi, A. Arezoumand, M. Saleh, "Evaluation of the Seismic Vulnerability of Piles and Metal Decks Due to the Aging of the Structure," *Civil Infrastructure Researches*, vol. 4, no. 2, pp. 71-79, (2019), https://doi.org/10.22091/cer.2019.3738.1135

[3] S. Zareie, M. S. Alam, R. J. Seethaler, A. Zabihollah, "Effect of shape memory alloy-magnetorheological fluid-based structural control system on the marine structure using nonlinear time-history analysis," *Applied Ocean Research*, vol. 91, 101836, (2019). https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.05.021

[4] J. Ou, X. Long, Q. S. Li, Y. Q. Xiao, "Vibration control of steel jacket offshore platform structures with damping isolation systems," *Engineering Structures*, vol. 29, no. 7, pp. 1525-1538, (2007). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.026

[5] S. Zareie, M. Hamidia, A. Zabihollah, R. Ahmad, K. M. Dolatshahi, "Design, validation, and application of a hybrid shape memory alloy-magnetorheological fluid-based core bracing system under tension and compression," *Structures*, vol. 35, pp. 1151-1161, (2022). https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.094

[6] M. Hamidia, R. Dalili Yazdi, "Seismic resiliency assessment of steel moment frames retrofitted with nonlinear viscous dampers under secondary earthquake," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 38.2, no. 1.2, pp. 51-65, (2022).

[7] H. Fazaeli, A. Karamodin, "Semi-Active Control of Three-Story Benchmark Structure using a Wireless Sensor Network," Journal of *Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 36, no. 2, pp. 73-88, (2023), https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.79624.1195

[8] Q. Jin, X. Li, N. Sun, J. Zhou, J. Guan, "Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling

earthquake response of jacket offshore platform," *Marine Structures*, vol. 20, no. 4, pp. 238-254, (2007). https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.05.002

[9] M. Hamidia, A. Filiatrault, A. Aref, "Simplified seismic sidesway collapse capacity-based evaluation and design of frame buildings with linear viscous dampers," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 528-552, (2014). http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2013.876948

[10] S. H. Moghaddam, A. Shooshtari, "Numerical Investigation of the Seismic Behavior of Self-Centering Post-Tensioned Concrete Wall System with Friction-Based Damper," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 53-68, (2022).

[11] M. Zarbilinezhad, A. Gholizad, "Assesment of the effect of the Tuned Mass Damper on the Seismic Performance of Isolated Steel Structures by using Endurance Time Analysis," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 41-61, (2023), http://dx.doi.org/10.22067/JFCEI.2023.80516.1208

[12] N. Khodaie, H. Teymouri, "Investigation of the effect of the mass and installation height of TMD system on the wind-induced vibration control of tall buildings," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 53-72, (2022). https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.70265.1039

[13] M. Asadi, M. Ghassemieh, "Performance of Floor Isolation equipped with Shape memory alloys," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 37, no. 2.1, 61-68, (2021).

[14] D. Leng, H. Xiao, L. Sun, G. Liu, X. Wang, L. Sun, "Study on a magnetorheological elastomer-base device for offshore platform vibration control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 30, no. 2, pp. 243-255, (2019). https://doi.org/10.1177/1045389X18808398

[15] A. Pourzangbar, M. Vaezi, "Effects of pendulum tuned mass dampers on the dynamic response of jacket platforms," *Ocean Engineering*, vol. 249, p. 110895, (2022). https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110895

[16] S. Chang, D. Kim, C. Chang, S. G. Cho, "Active response control of an offshore structure under wave loads using a modified probabilistic neural network," *Journal of marine science and technology*, vol. 14, pp. 240-247, (2009).

[17] S. Farahani, A. Barari, "A simplified procedure for the prediction of liquefaction- induced settlement of offshore wind turbines supported by suction caisson foundation based on effective stress analyses and an ML- based group method of data handling," *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, vol. 52, no. 15, pp. 5072-5098, (2023). https://doi.org/10.1002/eqe.4000

[18] S. Jothinathan, D. Kumar, "Semi-active control of jacket structure using MR damper and a deformation enhancement device under random ocean waves," *Applied Ocean Research*, vol. 127, p. 103323, (2022). https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103323

[19] S. Chowdhury, A. Banerjee, S. Adhikari, "Enhancing seismic resilience of nonlinear structures through optimally designed additional mass dampers," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 162, p. 104717, (2024). https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104717

[20] M. Vaezi, A. Pourzangbar, M. Fadavi, S. M. Mousavi, P. Sabbahfar, M. Brocchini, "Effects of stiffness and configuration of brace-viscous damper systems on the response mitigation of offshore jacket platforms," *Applied Ocean Research*, vol. 107, p. 102482, (2021). https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102482

[21] D. Chen, S. Huang, C. Huang, R. Liu, F. Ouyang, "Passive control of jacket–type offshore wind turbine vibrations by single and multiple tuned mass dampers," *Marine Structures*, vol. 77, p. 102938, (2021). https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.102938

[22] S. Zareie, M. S. Alam, R. J. Seethaler, A. Zabihollah, "Stability control of a novel frame integrated with an SMA-MRF control system for marine structural applications based on the frequency analysis," *Applied Ocean Research*, vol. 97, p. 102091, (2020). https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102091

[23] S. Zareie, A. S. Issa, R. J. Seethaler, A. Zabihollah, A. "Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: A review," *Structures*, vol. 27, pp. 1535-1550, (2020). https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.058

[24] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, M. A. Gibson, "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078-113, (2014). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084

[25] G. Song, N. Ma, H. N. Li, "Applications of shape memory alloys in civil structures," *Engineering structures*, vol. 28, no. 9, pp. 1266-1274, (2006). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.12.010

[26] I. Mansouri, M. Safa, Z. Ibrahim, O. Kisi, M. M. Tahir, S. Baharom, M. Azimi, "Strength prediction of rotary brace damper using MLR and MARS," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 60, no. 3, pp. 471-488, (2016). https://doi.org/10.12989/sem.2016.60.3.471

[27] E. Mohammadi Dehcheshmeh, V. Broujerdian, "Investigation of the Leaning Column Effect on Estimating of the Responses of Self-Centering Base-Rocking Walls under Far and Near Field Ground Motions," *Civil Infrastructure Researches*, vol. 8, no. 2, pp. 145-156, (2023). https://doi.org/10.22091/cer.2022.7994.1373

[28] E. Mohammadi Dehcheshmeh, V. Broujerdian, "Investigation of the Behavior of Self-Centering Base-and Double-Rocking Walls Subjected to Far-Field and Near-Field Earthquakes," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 34, no. 1, p. 53-76, (2021). https://doi.org/10.22067/jfcei.2021.68094.1008

[29] S. Zareie, M. S. Alam, R. J. Seethaler, A. Zabihollah, "A novel shape memory alloy-based element for structural stability control in offshore structures under cyclic loading", *Ships and Offshore Structures*, vol. 15, no. 8, pp. 1748-5302, (2020). http://dx.doi.org/10.1080/17445302.2019.1688920

[30] Regulations for design of buildings against earthquakes (standard 2800) - 4th edition

[31] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, G. L. Fenves, "OpenSees command language manual," *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, pp.137-158, (2006).

[32] S. Zareie, "Shape memory allow-magnetorheological fluid core bracing system," *University of British Columbia*, (2020).