



## Vibration Control of Steel Jacket Platform through Shape Memory Alloys Damper

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Enferadi M.H.<sup>1</sup> MSc,  
Ghasemi M.R.\*<sup>1</sup> PhD,  
Shabakhty N.<sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Enferadi M.H, Ghasemi M.R, Shabakhty N. Design of a Hand Tendon Injury Rehabilitation System using a DOF Constrainer Mechanism. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):13-24.

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Engineering Faculty, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

<sup>2</sup>Environmental & Water Resources Engineering Department, Civil Engineering School, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Central Organization of Sistan and Baluchestan University, University Boulevard, Zahedan, Iran  
Phone: +98 (54) 31136413  
Fax: +98 (167) 45845  
mrghasemi@eng.usb.ac.ir

#### Article History

Received: April 30, 2018  
Accepted: April 22, 2019  
ePublished: January 1, 2020

### ABSTRACT

Service life and safety of a steel jacket platform is influenced by vibrations generated by environmental loads, waves and winds. Vibrations of the structure and deck may cause fatigue in the structural elements and joints. Also may disrupt the operation of the drilling equipment and facilities as well as the operation of the platform. Therefore, the main aim of this research is to control the vibrations of the steel jacket platform through shape memory alloys dampers. Shape memory alloys have two important properties of shape memory as well as superelastic behavior and are quite suitable for damping applications. In these alloys, crystal structures transition from the austenite to the martensite phase, and vice versa are accompanied by the energy dissipation. In this research, a 90m steel jacket structure equipped with SMA dampers installed in 80m water depth has been modeled as a multi-degree-of-freedom system and analyzed under the time history of wave loads. For solving the differential equations of system vibration and modeling the hysteresis behavior of the shape memory alloys elements, the direct integration alpha method and multi-linear idealized constitutive model have been used, respectively. Jacket platform equipped with the shape memory alloys dampers shows the better result with 42% reduction in deck displacement, 62% reduction in deck acceleration and 32% reduction in shear force of platform base.

**Keywords** Vibration Control; Offshore Jacket Platform; Shape Memory Alloy Dampers; Hysteresis Loops

### CITATION LINKS

[1] An innovative re-centering SMA-lead damper and its application to steel frame structures [2] All-metal brace with hysteresis dissipation for impact protection of jacket platforms [3] Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms [4] Mass damper and buoyancy functioning of a submerged tank on the response of fixed offshore platforms [5] Passive control of offshore jacket platforms [6] Hybrid damping systems in offshore jacket platforms with float-over deck [7] System failure probability of offshore jack-up platforms in the combination of fatigue and fracture [8] Seismic performance and ice-induced vibration control of offshore platform structures based on the ISO-PFD-SMA brace system [9] Assessment and rehabilitation of jacket platforms [10] Active control of offshore steel jacket platforms [11] An alpha modification of Newmark's method [12] A review of shape memory alloy research, applications and opportunities [13] Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy [14] A shape memory alloy-based reusable hysteretic damper for seismic hazard mitigation [15] Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges [16] Shape-memory alloys: Macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior [17] Equivalent linear elastic-viscous model of shape memory alloy for isolated structures [18] Control of fixed offshore jacket platform using semi-active hydraulic damper [19] Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces [20] Determining of the capacity of the jacket platforms by non-linear pushover analysis [21] The Theory of Sound [22] The force exerted by surface waves on piles [23] Wave loads computation for offshore floating hose based on partially immersed cylinder model of improved Morison formula [24] Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars [25] Optimization of hysteretic characteristics of damping devices based on pseudoelastic shape memory alloys

## کنترل ارتعاشات سکوی دریایی ثابت فولادی با استفاده از میراگر آلیاژ حافظه‌دار

محمدصادی انفرادی MSc

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

محمدرضا قاسمی PhD\*

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

ناصر شایختی PhD

گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### چکیده

عمر مفید و سلامت سکوی دریایی ثابت فولادی متأثر از میزان ارتعاشات دائمی وارده توسط نیروهای ناشی از وزش باد و برخورد امواج دریا است. حرکت‌های رفت و برگشتی سکو و عرشه روی آن، خستگی سازه و اتصالات را به همراه داشته و باعث اختلال در عملکرد تجهیزات، تاسیسات حفاری و همچنین بهره‌برداری از سکو می‌شود. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق کنترل ارتعاشات سکوی دریایی ثابت فولادی با استفاده از میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار است. آلیاژهای حافظه‌دار دارای ویژگی حافظه‌داری و فوق ارتجاعی بوده و به عنوان میراگر گزینه بسیار مناسبی محسوب می‌شوند. در این نوع آلیاژها، تبدیلات ساختاری کریستال‌ها از فاز آستنیت به فاز مارتنزیت و برعکس، با اتلاف و استهلاک انرژی همراه است. در این تحقیق یک سکوی دریایی مجهز به میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار، به ارتفاع ۹۰ متر و در آبی به عمق ۸۰ متر، به صورت سیستم چندین درجه آزادی جرم متمرکز مدل‌سازی شده و تحت تاریخچه زمانی بار امواج دریا تحلیل شده است. برای حل دستگاه معادله دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش سیستم و مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای آلیاژ حافظه‌دار، به ترتیب از روش انتگرال‌گیری مستقیم و مدل چرخه‌ای ایده‌آل چندخطی استفاده شده است. مقایسه پاسخ‌های دینامیکی سکو در دو حالت "با" و "بدون" میراگر آلیاژ حافظه‌دار، ۴۲٪ کاهش تغییر مکان عرشه، ۶۲٪ کاهش شتاب عرشه و همچنین ۳۲٪ کاهش نیروی برشی تراز پایه سکو را نشان داده است.

**کلیدواژه‌ها:** کنترل ارتعاشات، سکوی دریایی ثابت، میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار، نمودارهای چرخه‌ای

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۲

\*نویسنده مسئول: mrghasemi@eng.usb.ac.ir

### ۱- مقدمه

بهره‌برداری از منابع دریایی مستلزم اکتشاف منابع و ساخت سازه‌ها و تاسیسات دریایی است. سکوی دریایی ثابت فولادی عمدتاً با اهداف عملیات حفاری و استخراج منابع نفتی طراحی و احداث شده و مهم‌ترین سازه دریایی محسوب می‌شوند. بارهای جانبی وارده بر سکو از قبیل باد، جریان آب و نیروی امواج ماهیت دینامیکی داشته و باعث ارتعاش دائمی آن می‌گردند. این ارتعاشات ممکن است روند عملیات حفاری و استخراج را تحت تاثیر قرار داده و ایمنی و خدمت‌پذیری سازه را کاهش دهد. یکی از روش‌های کنترل ارتعاشات و بهبود پاسخ‌های دینامیکی سکوی دریایی، کاربرد

میراگرهای غیرفعال می‌باشد. در چند دهه اخیر، ایده‌های متفاوت و مصالح نوینی جهت طراحی و ساخت میراگرها ارائه شده است. به‌عنوان نمونه، می‌توان به میراگرهای ساخته‌شده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که به اختصار آلیاژ حافظه‌دار نامیده می‌شوند، اشاره نمود. آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل دارابودن خصوصاتی همچون ظرفیت میرایی بالا، دوام و مقاومت زیاد در برابر خستگی و خوردگی و رفتار فوق ارتجاعی، کاربردهای متعددی در کنترل ارتعاشات سازه‌ها پیدا کرده‌اند<sup>[1]</sup>. هدف اصلی این تحقیق نیز، ارائه یک میراگر کارا جهت کنترل ارتعاشات سکوی دریایی ثابت فولادی و بهبود رفتار دینامیکی آن تحت اثر نیروی امواج است.

مطالعات انجام‌شده در زمینه کنترل ارتعاشات سکوی دریایی عمدتاً تحت تحریک نیروهای باد، امواج و زلزله صورت پذیرفته است. با این حال، ارتعاشات واداشته تحت نیروهای ناشی از برخورد یخ و کشتی نیز جزء موضوعات مورد علاقه محققین بوده است<sup>[2]</sup>. *وند/یور* و *مایتوم*، از اولین پژوهشگرانی هستند که در زمینه کنترل ارتعاشات سکوی دریایی تحقیق نموده‌اند<sup>[3]</sup>. آنها دریافتند که از مخازن مایعات روی عرشه سکو می‌توان به‌عنوان میراگرهای جرمی استفاده نمود. هندسه خاص مخازن و تلاطم مایع درون آنها، در صورت تنظیم‌بودن با فرکانس تحریک، می‌تواند تاثیر قابل توجهی در زمان تناوب سکو و کاهش پاسخ‌های دینامیکی آن داشته باشد. در تحقیق انجام‌شده توسط *شفیعی‌فر* و همکاران، از یک مخزن مستغرق برای کاهش دامنه جابجایی‌های سکوی دریایی ثابت استفاده گردید. عملکرد این نوع میراگر مشابه میراگرهای نیمه‌فعال است، با این تفاوت که کنترل ارتعاشات توسط نیروهای طبیعی امواج صورت‌پذیرفته و نیروی اینرسی و لنگر ایجادشده باعث استهلاک انرژی وارد بر سکو می‌گردد<sup>[4]</sup>.

علاوه‌بر جاذب‌های دینامیکی (میراگرهای جرمی و مخازن مایعات روی عرشه)، سایر ابزارهای جذب و استهلاک انرژی نیز در کنترل ارتعاشات سکوی دریایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. *پاتیل* و *جانگید*، ۳ سکوی مجهز شده به میراگرهای غیرفعال اصطکاکی، ویسکوز و ویسکوالاستیک، تحت نیروی امواج را تحلیل نموده‌اند<sup>[5]</sup>. کارایی بسیار خوب میراگر اصطکاکی در کاهش تغییر مکان‌های عرشه و کاهش نیروی برشی در ترازهای ارتفاعی سکو از نتایج این تحقیق ارزشمند بوده است.

مقایسه عملکرد میراگرها یا استفاده همزمان از ۲ یا چند میراگر نیز جزء موضوعات مورد علاقه محققین بوده است. در تحقیق *جعفرآباد* و همکاران، آثار الحاق میراگرهای جرمی و اصطکاکی به‌عنوان یک میراگر ترکیبی و با هدف بهبود پاسخ‌های دینامیکی سکو، بررسی شده است. نتایج این تحقیق، حاکی از این است که میراگر اصطکاکی تاثیر بیشتری در افزایش کارایی و بازدهی میراگر ترکیبی حاصل داشته‌است<sup>[6]</sup>. ارتعاشات دائمی ناشی از باد و امواج دریا باعث افزایش خستگی و در نتیجه کاهش عمر مفید سازه‌های دریایی می‌گردد. در مطالعه انجام‌شده توسط *شایختی*، افزایش احتمال خرابی و شکست سازه تحت اثر امواج، بررسی شده است<sup>[7]</sup>.

مدل ایده‌آل چندخطی آنها استفاده شده و سازگاری تغییر مکان‌های سکوی میراگر نیز با استفاده از اصول بنیادین مکانیک جامدات رابطه‌بندی گردیده است. جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی، سکوی دریایی به صورت مدل چندین درجه آزادی جرم متمرکز در نظر گرفته شده و پاسخ‌های معادله ارتعاش نیز با روش انتگرال‌گیری مستقیم و توسعه یک برنامه رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب، برآورد گردیده‌اند [11]. به‌عنوان مطالعه موردی، یک سکوی دریایی به ارتفاع ۹۰ متر و در آبی به عمق ۸۰ متر، تحت نیروی جریان آب و یک موج منظم با ارتفاع ۱۷/۸ متر و زمان تناوب ۷/۸ ثانیه مرتعش گردیده و تاریخچه پاسخ‌های دینامیکی آن در دو وضعیت "با" و "بدون" میراگر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به دشواری‌های نصب و بازرسی میراگرها در ترازهای تحتانی سکوی، آثار جانمایی متفاوت میراگرها در ترازهای ارتفاعی سکوی نیز بررسی شده است.

## ۲- آلیاژهای حافظه‌دار

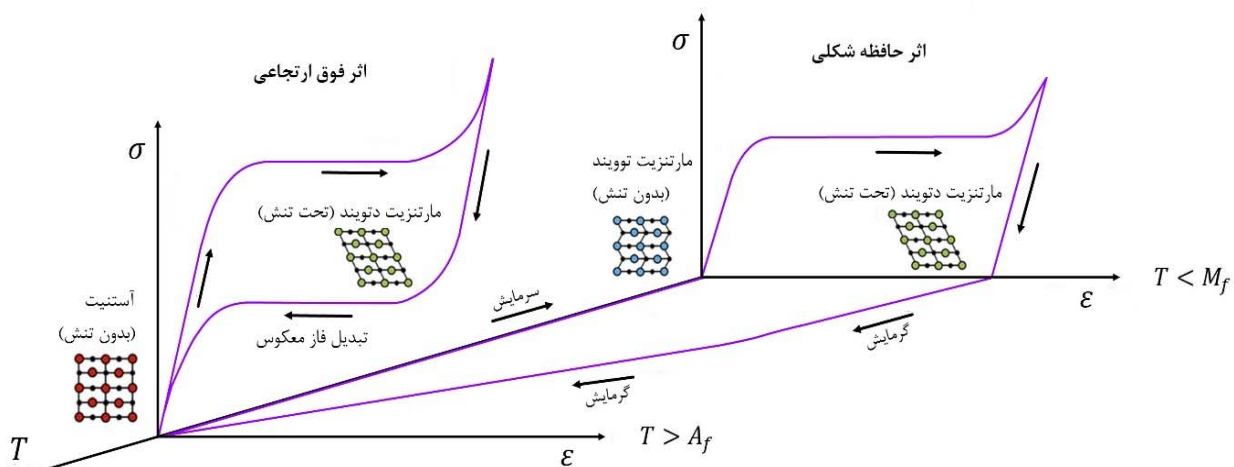
پیدایش آلیاژهای حافظه‌دار برای نخستین بار به دهه سوم قرن بیستم باز می‌گردد. آلیاژهای حافظه‌دار، همانند بسیاری از فلزات، دارای بیش از یک نوع ساختار یا فاز کریستالی می‌باشند. به این مواد، چندشکلی یا چندریختی گفته می‌شود. فاز غالب در این آلیاژها، به دما و تنش‌های وارده بستگی داشته و با توجه به ترکیبات شیمیایی فلزات و فرآیندهای ترمودینامیکی زمان فرآوری آنها، تعیین می‌گردد. در آلیاژهای حافظه‌دار، فاز پایدار در دمای بالا، آستنیت (Austenite) و فاز پایدار در دمای پایین، مارتنزیت (Martensite) نامیده می‌شود. این آلیاژها، در برابر تغییرات تنش یا دما، آثار یا رفتارهای متفاوتی از خود نشان داده که به آنها اثر حافظه شکلی و اثر فوق ارتجاعی گویند [12]. اثر فوق ارتجاعی، در منحنی تنش- کرنش آلیاژ مس- روی توسط اولاندر و همکاران مشاهده گردید. اثر حافظه شکلی نیز در آلیاژ نیکل- تیتانیوم توسط بوهرلر و در آزمایشگاه ارتش دریایی آمریکا کشف و تحت نام نایتینول مشهور گردید (شکل ۱).

جداسازی سکوی و عرشه نیز جزء راهکارهای بسیار مناسب در کنترل ارتعاشات سکوهای دریایی، محسوب می‌گردد. در تحقیق انجام‌شده توسط ژانگ و همکاران، از جداگرهای آلیاژ حافظه‌دار، به‌صورت ترکیب‌شده با میراگرهای اصطکاکی، برای کاهش جابجایی‌های عرشه تحت نیروی زلزله و برخورد یخ، استفاده شده است [8].

هر یک از میراگرها و روش‌های کنترلی استفاده‌شده در سکوهای دریایی، تاثیر متفاوتی در بهبود پاسخ‌های دینامیکی سازه دارد. این تفاوت‌ها، عمدتاً به نوع تحریک، سیستم عملکردی میراگر، مشخصات دینامیکی سکوی و اهداف کنترل بستگی دارد. در تحقیق انجام‌شده توسط تابش‌پور و کوماچی، جدولی از انواع میراگرهای متفاوت، روش‌های تحلیل سازه دریایی و همچنین نتایج الحاق میراگر به سازه ارائه شده است. با استفاده از تقسیم‌بندی ارائه‌شده روی میراگرهای سکوهای دریایی، می‌توان میراگر مناسب با هر نوع تحریک را انتخاب نمود [9]. با توجه به تنوع زیاد بارهای وارد بر سکوهای دریایی و همچنین تغییرات خصوصیات دینامیکی هر یک از بارها، ممکن است ابزارهای کنترلی غیرفعال، بازدهی مناسب را به همراه نداشته باشند. با به‌کار بستن عملگرها و پردازشگرهای رایانه‌ای، می‌توان بازدهی ابزارهای کنترلی را بهبود بخشیده و آنها را به‌صورت نیمه‌فعال یا فعال طراحی نمود [10].

در یک مسأله کنترل ارتعاشات، پس از انتخاب نوع میراگر، می‌بایست نحوه اتصال میراگر به سازه و روش تحلیل مجموعه سازه و میراگر را تعیین نمود. انتخاب فرضیات سازگار با واقعیت و روش‌های تحلیلی دقیق، افزایش دقت نتایج را به همراه داشته و امکان استفاده از طرح پیشنهادی در کارهای عملی را فراهم می‌نماید. لازم است به این نکته توجه نمود که الحاق میراگر به سکوی دریایی، با استفاده از اعضای تکیه‌گاهی با سطح مقطع بزرگ با افزایش نیروی امواج همراه است. این نکته در مقاوم‌سازی و بهسازی سکوهای دریایی موجود از عوامل تعیین‌کننده در انتخاب نوع میراگر محسوب می‌گردد.

در این تحقیق، برای مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای میراگر حافظه‌دار از

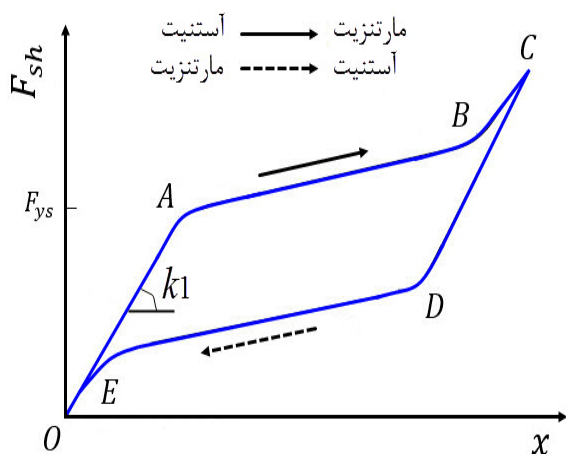


شکل ۱) نمودار تنش-کرنش-دما نایتینول (آثار حافظه شکلی و فوق ارتجاعی)

تغییر مکان آلیاژهای حافظه‌دار که در دسته اول این تقسیم‌بندی جای دارند، توسط *گراسر* و *کوزارلی* ارائه شده و انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند (نمودار ۱). آنها، روابط ارائه‌شده توسط محققین پیشین را گسترش داده و یک معادله دیفرانسیل برای بیان نرخ تغییرات نیروی محوری عضو آلیاژ حافظه‌دار ارائه نمودند. *وایلد* و همکاران، رابطه *گراسر-کوزارلی* را اصلاح کرده و کاستی‌های آن در مدل‌سازی سخت‌شوندگی کرنشی در انتهای فاز مارتنزیت (شاخه BC) را برطرف نمودند. رابطه ارائه‌شده توسط *وایلد* و همکاران، برای بارگذاری چرخه‌ای محوری اعمال‌شده به یک عضو میله‌ای از جنس آلیاژ حافظه‌دار، مطابق رابطه ۱ می‌باشد [15].

$$\dot{F}_{sh} = k_1 - \left[ \dot{x} - |\dot{x}| \left| \frac{F_{sh} - \beta}{F_{ys}} \right|^{\eta-1} \left( \frac{F_{sh} - \beta}{F_{ys}} \right) \right] \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $F_{sh}$  نیروی محوری عضو میله‌ای آلیاژ حافظه‌دار در ازای تغییر طول  $x$  و  $\dot{F}_{sh}$  نیز نرخ تغییرات این نیروی محوری نسبت به زمان می‌باشد.  $F_{ys}$  نیروی تسلیم عضو میله‌ای بوده و معادل نیروی آغاز تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت است. متغیرهای  $\dot{x}$  و  $k_1$  به ترتیب سرعت تغییر طول و سختی محوری اولیه (سختی محوری در فاز آستنیت) میله بوده و  $\eta$  نیز کنترل‌کننده تیزی نمودار در مسیر رفت و برگشت است. متغیر نیروی  $\beta$  که تابعی از تغییر طول  $x$  سختی  $k_1$  و توابع پیچیده ریاضی است، برگشت منحنی چرخه‌ای در مرحله باربرداری را مدل‌سازی می‌نماید (شاخه CDE نمودار ۱).



نمودار ۱) مدل نیرو-تغییر مکان آلیاژ حافظه‌دار در بارگذاری و باربرداری

پیچیدگی روابط غیرخطی *گراسر، کوزارلی* و *وایلد* به این دلیل است که نیروی به‌وجودآمده در یک میراگر آلیاژ حافظه‌دار، تابعی از تغییر شکل بوده و تغییر شکل نیز مجهول اصلی یک مسأله دینامیکی می‌باشد. از این رو، دسته دوم روابط چرخه‌ای، جهت کاهش پیچیدگی و ساده‌سازی روابط غیرخطی ارائه شده‌اند. *آووریچیو* و همکاران، مدل چرخه‌ای خطی ایده‌آل آلیاژهای حافظه‌دار را ارائه نمود [16]. مدل‌های ایده‌آل ۲ یا چندخطی *آووریچیو*، سرعت انجام تحلیل و محاسبات کامپیوتری را تا حدود زیادی افزایش داده و در بسیاری از نرم‌افزارهای اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اگر یک آلیاژ حافظه‌دار در فاز مارتنزیت و دمایی کمتر از  $M_f$  باشد و بارگذاری و باربرداری بر آن اعمال گردد، پس از باربرداری، آلیاژ به‌طور کامل به حالت اولیه خود بازمی‌گردد و کرنش پسماند، در آن بر جای می‌ماند. سپس با افزایش دما، کرنش پسماند از بین رفته و آلیاژ به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. این پدیده، رفتار حافظه‌شکلی آلیاژ نامیده می‌شود. علت وقوع این پدیده، تبدیل ساختار کریستال‌های آلیاژ از فاز مارتنزیت توویند (Twinned) به فاز مارتنزیت دتویند (Detwinned)، می‌باشد. در این حالت، دمای محیط و آلیاژ، شرایط تبدیل کامل فازها و تشکیل فاز آستنیت را تامین نموده و کرنش پسماند بر جای می‌ماند. سپس با افزایش دما، تبدیل فازها انجام شده و ماده حالت اولیه خود را بازمی‌یابد. حال اگر یک آلیاژ حافظه‌دار در فاز آستنیت و دمایی بالاتر از  $A_f$  باشد، بارگذاری و اعمال تنش موجب تبدیل فاز آستنیت به فاز مارتنزیت می‌گردد. در ادامه و با انجام باربرداری، فاز مارتنزیت ناپایدار گردیده و تبدیل معکوس اتفاق می‌افتد. در نتیجه این تبدیل، ماده به حالت اولیه خود بازگشته و هیچ کرنش پسماندی بر جای نمی‌ماند. این رفتار ویژه آلیاژ، خاصیت فوق‌ارتجاعی آن نامیده می‌شود [13]. ساختار کریستال‌های آلیاژ حافظه‌دار، نمودارهای تنش-کرنش-دما و دو رفتار متفاوت حافظه‌داری و فوق‌ارتجاعی در شکل ۱ قابل مشاهده است.

همان‌طور که می‌دانید، سطوح بسته در نمودار نیرو-تغییر مکان چرخه‌ای، معادل میزان انرژی مستهلک‌شده می‌باشد. محققین زیادی رفتار فوق‌ارتجاعی چرخه‌ای آلیاژهای حافظه‌دار را تحت بارگذاری‌های محوری، خمشی، برشی و پیچشی بررسی نموده و دریافتند که این آلیاژها در شرایط بارگذاری محوری، بیشترین قابلیت اتلاف انرژی را دارا می‌باشند. از این رو در اغلب میراگرها از میله‌ها، بلت‌ها و سیم‌های کششی حافظه‌دار استفاده می‌شود. آلیاژهای حافظه‌دار از ترکیب فلزات متفاوتی ساخته شده و فرآیندهای شکل‌دهی آنها نیز بسیار پیچیده و پرهزینه می‌باشد. این نوع آلیاژها معمولاً با نام فلز پایه خود تقسیم‌بندی و تفکیک می‌گردند. در زمینه کنترل ارتعاشات و ساخت ابزارهای کنترلی، آلیاژهای حافظه‌دار پایه نیکل-تیتانیوم (نایتینول)، کارایی و دوام بیشتری نسبت به آلیاژهای حافظه‌دار پایه مس و فولاد دارند. دمای تبدیل فازهای آستنیت و مارتنزیت آلیاژهای حافظه‌دار در مراحل اولیه شکل‌دهی آنها قابل تنظیم می‌باشد [14]. به همین دلیل در بسیاری از تحقیقات انجام‌شده روی میراگرهای حافظه‌دار، تنها رفتار فوق‌ارتجاعی آلیاژ مینا قرار گرفته و از وابستگی رفتار آلیاژ به تغییرات دما و حرارت، صرف نظر می‌شود.

رفتار مستقل از حرارت و فوق‌ارتجاعی تنش-کرنش چرخه‌ای (یا نیرو-تغییر مکان چرخه‌ای) آلیاژهای حافظه‌دار، توسط محققین و پژوهشگران متعددی از جمله *کوزارلی، گراسر، وایلد* و *آووریچیو* مدل‌سازی و رابطه‌بندی شده است. این مدل‌ها به ۳ دسته غیرخطی یا واقعی، ایده‌آل چندخطی و سختی-میرایی لزوج معادل تقسیم‌بندی می‌گردند. روابط حاکم بر مدل چرخه‌ای غیرخطی نیرو-

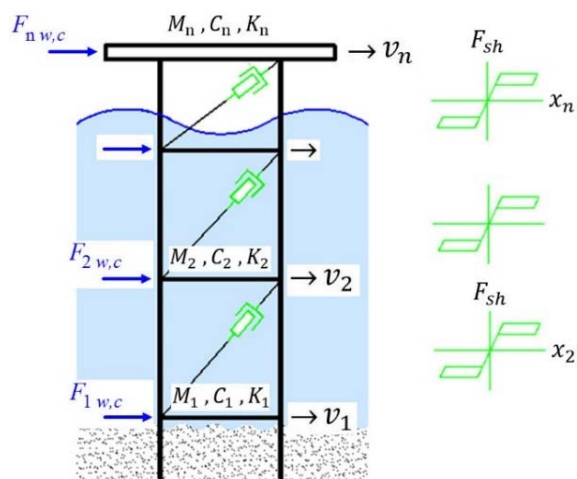
محیط‌های دریایی، اجزاء میراگر می‌بایست از فولادهای مقاوم در برابر محیط خورنده زیر آب ساخته شوند.

در سکوهای فولادی دریایی بارهای ثقیلی عمدتاً توسط پایه‌ها تحمل شده و نیروی امواج و بار جانبی ناشی از زلزله نیز از طریق عملکرد مشترک قاب‌های خمشی و مهاربندی‌های قائم و افقی به کف دریا منتقل می‌گردند. بنابراین در این نوع سازه‌ها، مهاربندها سهم بالایی از سختی جانبی مورد نیاز سازه را تامین می‌کنند [18]. در این تحقیق، میراگرها با استفاده از اعضای کششی، به سکوی دریایی متصل می‌گردند. مقطع این اعضای کششی، در مقایسه با مقاطع سازه‌ای اعضای سکو معمولاً کوچک بوده و باعث افزایش قابل ملاحظه نیروی امواج نخواهند شد.

#### ۴- روش تحلیل و صحت‌سنجی

##### ۴-۱- مدل دینامیکی سکوی مجهز به میراگر

تحلیل سازه‌های مجهز به میراگرهای حافظه‌دار با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود غالباً پیچیده و زمان‌بر می‌باشد. جهت رفع این محدودیت و بررسی آثار استفاده از میراگرهای حافظه‌دار در سکوهای دریایی ثابت، یک برنامه رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. در این برنامه رایانه‌ای، سکو به صورت سیستم چندین درجه آزادی جرم متمرکز شبیه‌سازی گردیده و مقادیر جرم، سختی، بارهای وارد بر درجات آزادی سکو و مشخصات هندسی و مکانیکی میراگرها به‌عنوان ورودی برنامه در نظر گرفته شده‌اند. سکوی دریایی مجهز به میراگر به همراه نمودار نیرو- تغییر مکان میراگرها و متغیرهای تعریف‌شده برای تحلیل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳) سکوی مجهز به میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار

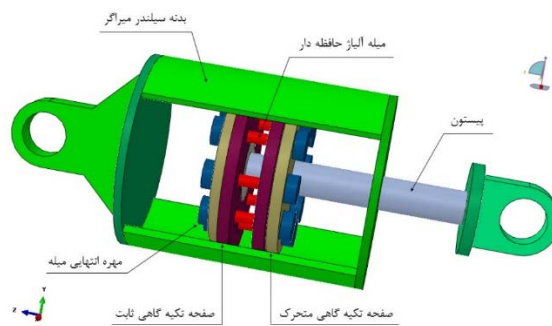
با استفاده از اصل دالامبر، معادله تعادل دینامیکی مجموعه سکو و میراگرها (معادله حاکم بر ارتعاش) را می‌توان مطابق رابطه ۲ ارائه نمود.

$$[M] \{\ddot{v}\} + [C] \{\dot{v}\} + [K] \{v\} + \{F_{sh}\} = \{F_{w,c}\} \quad (2)$$

دسته سوم روابط چرخه‌ای، مدل سختی و میرایی لزج معادل بوده که مطابق توصیه‌های آیین‌نامه آشتو ارائه شده است. مقادیر سختی و میرایی لزج معادل، با توجه به سطح زیر نمودار چرخه‌ای ایده‌آل آلیاژ حافظه‌دار، تنش فازهای آستنیت و مارتنزیت و مدول ارتجاعی فازها تعیین می‌گردند [17]. لازم به ذکر است که برای بیان رفتار چرخه‌ای نیرو- تغییر مکان میله‌های آلیاژ حافظه‌دار تحقیق پیش رو از مدل ایده‌آل چندخطی آنها استفاده شده که در بخش ۴-۲ ارائه شده‌اند.

#### ۳- ساختار میراگر آلیاژ حافظه‌دار

ویژگی‌های هندسی سازه، شرایط بارگذاری، اهداف کنترل و محدودیت‌های اجرایی از عوامل تعیین‌کننده در طراحی یک میراگر می‌باشند. بیشترین میزان استهلاک و اتلاف انرژی، در آلیاژهای حافظه‌دار در شرایط بارگذاری محوری آنها حاصل می‌گردد. لذا سعی بر این است که از این آلیاژها به گونه‌ای استفاده شود که تحت تنش‌های محوری قرار گیرند. یک میراگر آلیاژ حافظه‌دار در شرایط تجربه تغییر شکل‌های بزرگ، قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود در جذب و استهلاک انرژی را نشان می‌دهد. بنابراین، کرنش به‌وجودآمده در میراگر می‌بایست به گونه‌ای محدود شود که اولاً، کارایی و بازدهی بالای میراگر حاصل شده و ثانیاً، تغییر مکان‌های سازه نیز کاهش یابند. شکل ۲، تصویر کلی میراگر آلیاژ حافظه‌دار پیشنهادی را نشان می‌دهد. عملکرد میراگر به گونه‌ای است که صفحات تکیه‌گاهی متحرک، توسط نیروی بیستون جابجا شده و باعث افزایش طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار می‌گردند.



شکل ۲) میراگر آلیاژ حافظه‌دار پیشنهادی (طراحی‌شده در نرم‌افزار آباکوس)

در میراگرهای ساخته‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار، طول و مساحت مقطع میله‌های حافظه‌دار، تاثیر بسیار زیادی در استهلاک انرژی وارده دارد. بدین منظور جهت تنظیم طول میله‌ها می‌توان پیچ‌هایی در بدنه سیلندر تعبیه نمود. در این میراگر، طول میله‌های حافظه‌دار می‌تواند از مقدار ۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر و به‌صورت متغیر و مرتبط با سختی مورد نیاز، انتخاب گردد. مقطع میراگر فوق دایره‌ای یا مستطیلی بوده و جهت کاهش تمرکز تنش، بهتر است حداقل از ۴ میله (یا بیشتر و به‌صورت متقارن در مقطع) در آن استفاده نمود. قطر بیرونی میراگر حدود ۲۰۰ میلی‌متر و طول کلی آن حدود ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به شرایط زنگ‌زدگی و خوردگی



(نمودار ۲) نیروی آغاز تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت می‌باشد. رابطه ۵، قادر به کنترل حدود فوقانی و تحتانی نمودار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان میراگر نیست. بنابراین، با استفاده از روابط ۶ و ۷، می‌توان رابطه ۵ را اصلاح نمود.

$$F_{shj} = F_s^{AM} + k_2 (x_j - x_s^{AM}) \quad (6)$$

اگر  $F_{shj}$  بزرگتر از حدود فوقانی نمودار چرخه‌ای باشد، آنگاه:

$$F_{shj} = F_f^{MA} + k_3 (x_j - x_f^{MA}) \quad (7)$$

اگر  $F_{shj}$  کوچکتر از حدود فوقانی نمودار چرخه‌ای باشد، آنگاه:

در روابط ۶ و ۷، متغیر  $k_2$ ، سختی محوری میله در ناحیه تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت و متغیر  $k_3$ ، سختی محوری میله در ناحیه تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت است. اگر طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار با  $L$ ، مساحت مقطع کل میله‌ها با  $A$  و مدول ارتجاعی فازهای آستنیت و مارتنزیت با  $E_{SMA}$  نمایش داده شوند، متغیرهای سختی  $k_1$ ،  $k_2$  و  $k_3$  را می‌توان با استفاده از روابط ۸ تا ۱۰ محاسبه نمود.

$$k_1 = \frac{A E_{SMA}}{L} \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{F_f^{AM} - F_s^{AM}}{x_f^{AM} - x_s^{AM}} \quad (9)$$

$$k_3 = \frac{F_s^{MA} - F_f^{MA}}{x_s^{MA} - x_f^{MA}} \quad (10)$$

مقادیر نیروهای آغاز و پایان فازها، از ضرب تنش‌های آغاز و پایان فازها در مساحت  $A$  به‌دست می‌آیند. مقدار این تنش‌ها به نوع آلیاژ حافظه‌دار وابسته بوده و معمولاً در محدوده ۱۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال می‌باشند. در رابطه ۱۰،  $k_3$  شیب حدود تحتانی نمودار چرخه‌ای در مراحل باربرداری را کنترل می‌کند. در مدل نیرو-تغییر مکان ایده‌آل چندخطی آلیاژهای حافظه‌دار، معمولاً نمودار به صورت ۳ خطی تعریف شده و از تغییرات سختی  $k_3$  در مراحل باربرداری صرف نظر می‌گردد. اما در تحقیق حاضر، جهت افزایش دقت نتایج، مقادیر متفاوت سختی  $k_3$  بر مبنای درصد تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در مرحله بارگذاری محاسبه گردیده است. لازم به ذکر است که در دقیق‌ترین حالت مدل‌سازی ایده‌آل چندخطی، مقادیر سختی  $k_2$  نیز متغیر بوده و به درصد تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت در مراحل باربرداری و بارگذاری پس از آن بستگی دارد.

تفاوت روابط نیرو-تغییر مکان چرخه‌ای ارائه‌شده در این تحقیق (روابط ۳ تا ۱۰) با روابط ارائه‌شده توسط سایر محققین (مانند روابط آوورچیو)، در این است که نیاز به استفاده از متغیر  $\dot{x}$  (سرعت) و توابع تعیین علامت نیروی چرخه‌ای میراگر نیست. بنابراین با توجه به تعداد زیاد میراگرها، تعداد روابط و مجهولات کاهش یافته و سرعت انجام تحلیل‌ها افزایش خواهد یافت.

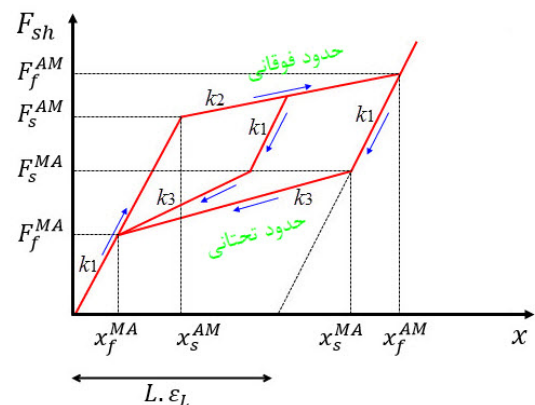
### ۳-۴- صحت‌سنجی

جهت کسب اطمینان از صحت روابط چرخه‌ای آلیاژ حافظه‌دار و عملکرد برنامه رایانه‌ای، مقایسه‌ای با تحقیق *عسگریان* و *مرادی* صورت پذیرفته است. در تحقیق *عسگریان* و *مرادی*، یک عضو

در رابطه ۲،  $[M]$  ماتریس جرم،  $\{\dot{v}\}$  بردار شتاب درجات آزادی،  $[C]$  ماتریس میرایی سازه‌ای،  $\{v\}$  بردار سرعت درجات آزادی،  $[K]$  ماتریس سختی و  $\{v\}$  بردار تغییر مکان درجات آزادی سیستم است. بردار  $\{F_{sh}\}$  نیروی چرخه‌ای میراگرها و  $\{F_{w,c}\}$  نیز بردار نیروهای ناشی از امواج و جریان آب می‌باشند. در نمودارهای شکل ۳، متغیرهای  $x_1$  تا  $x_n$ ، تغییر طول میراگرها بوده (معادل تغییر طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار) و با توجه به نحوه اتصال میراگر به سازه و دنظرگرفتن سازگاری تغییر شکل‌ها به تغییر مکان‌های درجات آزادی سیستم،  $v_1$  تا  $v_n$ ، مرتبط می‌گردند.

### ۲-۴- مدل ایده‌آل چندخطی رفتار چرخه‌ای آلیاژهای حافظه‌دار

پیچیده‌ترین قسمت رابطه ۲، ارزیابی مؤلفه‌های بردار  $\{F_{sh}\}$  یا همان نیروی چرخه‌ای میراگرها می‌باشد. بنابراین در گام اول تحلیل مسأله، بهتر است روابط نیرو-تغییر مکان میراگرها توسعه داده شود. روش‌های حل عددی معادلات حاکم بر ارتعاش سازه‌ها مانند روش آلفا، پاسخ‌های دینامیکی سازه را از روی هم‌گذاری نتایج در گام‌های زمانی، برآورد می‌نمایند. بنابراین در هر گام زمانی رو به جلو می‌توان تغییرات نیروی میراگر را تعیین نموده و با نیروی گام قبلی جمع نمود. اگر  $k_1$  سختی میراگر حافظه‌دار در فاز آستنیت باشد (نمودار ۲)، نیروی چرخه‌ای میراگر یا  $F_{sh}$  را می‌توان به صورت روابط ۳ تا ۵ ارائه نمود.



نمودار ۲) نمودار رفتار چرخه‌ای ایده‌آل آلیاژ حافظه‌دار

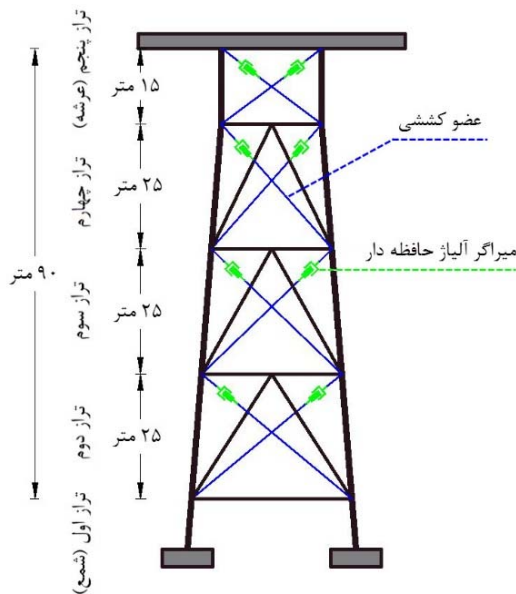
$$F_{shj} = F_{shj-1} + k_1 (x_j - x_{j-1}) \quad x_j \leq x_f^{MA} \quad (3)$$

$$j=1,2,3, \dots \quad (4)$$

$$F_{shj} = F_{shj-1} + k_1 (x_j - x_{j-1}) \quad x_j > x_f^{MA} \quad (5)$$

در روابط ۳ و ۵، متغیرهای  $F_{shj}$  و  $x_j$  به ترتیب نیروی میراگر و تغییر طول میراگر در یک تراز ارتفاعی سکو می‌باشند. متغیر  $j$ ، بیانگر گام زمانی بوده و از ارائه نمایه مرتبط با تراز میراگر در ارتفاع سکو، صرف نظر شده است. در نمودار ۲ و روابط ۳ تا ۵، نمایه‌های  $AM$  و  $MA$ ، به ترتیب بیانگر تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت و مارتنزیت به آستنیت بوده و نمایه‌های  $s$  و  $f$  نیز به ترتیب بیانگر آغاز و پایان تبدیل فازهای آلیاژ می‌باشند. به‌عنوان نمونه، در رابطه ۳،  $x_f^{MA}$  جابجایی در پایان تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت بوده و  $F_s^{AM}$

۳۲۰ مگا پاسکالی فولاد می توان گفت که قطر مقاطع اعضای سکو و ضخامت آنها در محدوده قابل قبولی قرار دارند.



شکل ۴) سکوی دریایی ثابت فولادی مطالعه موردی، مجهز شده به میراگرهای آلیاژ حافظه دار

جدول ۱) مشخصات مکانیکی اعضای سکو

مقدار	مشخصات مکانیکی فولاد
۲۵۰ مگا پاسکال	مدول الاستیسیته
۰/۳	ضریب پواسون
۳۲۰ مگا پاسکال	تنش تسلیم
۴۰۵ مگا پاسکال	تنش نهایی
۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی فولاد

جدول ۲) مشخصات هندسی اعضای سکو

نوع عضو	مهاربند افقی	مهاربند قائم	پایه
قطر بیرونی (متر)	۱/۰۰	۱/۱۰	۱/۵۰
قطر داخلی (متر)	۰/۹۷۶	۱/۰۷۶	۱/۴۵۰

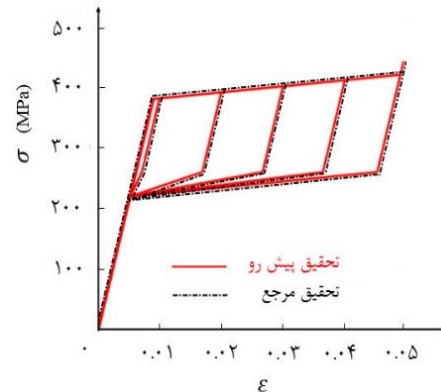
جدول ۳) مشخصات دینامیکی امواج و تغییرات سرعت جریان در عمق

مشخصات دینامیکی موج	
ارتفاع موج	۱/۸ متر
زمان تناوب میانگین	۷/۸ ثانیه
عمق آب	۸۰ متر
سرعت جریان آب (متر بر ثانیه)	
نزدیک به کف دریا	۰/۱۶
عمق های میانی	۰/۲۷
نزدیک به سطح آب	۰/۸۳

#### ۲-۵- توسعه معادله ارتعاش سکو و میراگرها

شکل ۵، تغییر شکل جانبی تراز ارتفاعی  $i$  سکوی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه دار را نشان می دهد. با استفاده از تئوری تغییر شکل های کوچک حاکم بر رفتار سازه ها و فرض صلب بودن تکیه گاه های

میله ای از جنس آلیاژ حافظه دار، تحت بارگذاری چرخه ای محوری قرار گرفته و نمودارهای تنش ( $\sigma$ ) و کرنش ( $\epsilon$ ) آن ترسیم شده است [19]. انطباق نمودارهای چرخه ای ارائه شده در نمودار ۳، صحت روابط چرخه ای و دقت نتایج برنامه رایانه ای این تحقیق را تایید می نماید.



نمودار ۳) نمودار تنش-کرنش چرخه ای آلیاژ حافظه دار (تحقیق پیش رو در مقایسه با تحقیق مرجع [19]).

#### ۵- مطالعه موردی

##### ۱-۵- مشخصات هندسی و دینامیکی سکو و موج

جهت انجام تحلیل های عددی و دستیابی به آثار و نتایج استفاده از میراگرهای آلیاژ حافظه دار، یک سکوی دریایی ثابت فولادی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و به میراگرهای پیشنهادی آلیاژ حافظه دار مجهز شده است. ارتفاع نهایی سازه سکو ۹۰ متر بوده و در پلان، متقارن می باشد. ابعاد سکو در کف دریا  $32 \times 32$  متر و در تراز عرشه،  $20 \times 20$  متر است. مجموع کل بارهای مرده و زنده عرشه نیز  $4800$  تن می باشد. سکو دارای ۴ پایه بوده و در ارتفاع دارای مهاربندی هشتی شکل است. برای در نظر گرفتن اثر اندرکنش شمع ها و خاک از قاعده گیردسازی پای ستون ها در ارتفاعی معادل ۸ برابر قطر شمع ها استفاده شده است [20]. شکل ۴، سازه سکو، نحوه الحاق میراگرهای آلیاژ حافظه دار و همچنین ترازهای ارتفاعی سکو را نشان می دهد. مشخصات مکانیکی و هندسی اعضای سکو به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده اند.

مشخصات دینامیکی امواج و سرعت جریان به گونه ای انتخاب گردیده اند که سکو تحت بار امواج، تغییر مکان های نسبتاً بزرگ داشته و اعضای سکو نیز وارد ناحیه غیرخطی خود نگردند. ورود اعضای سکو به ناحیه غیرخطی و تجربه تغییر شکل های بزرگ، آسیب در لوله ها و تجهیزات حفاری (و استخراج) را به همراه دارد. مشخصات دینامیکی موج، عمق آب و همچنین تغییرات خطی سرعت جریان آب در ارتفاع مطابق جدول ۳ می باشد.

مطابق یک تحلیل دینامیکی خطی اجزاء محدود انجام شده روی سکوی بدون میراگر، بیشینه تنش فون میزز مشاهده شده در پایه های اعضای سکو با فرض ضریب واحد برای ترکیب بارهای مرده، زنده و موج،  $135$  مگا پاسکال بوده است. با توجه به تنش تسلیم

نیروهای جریان آب و موج وارد بر ترازهای ارتفاعی سکو می‌باشند. در تراز اول سکو (تراز شمع‌ها)، اتصال میراگر به سازه امکان‌پذیر نیست. از این رو در دریاچه اول بردار  $\{F_{sh}\}$  رابطه ۱۵، نیروی این میراگر صفر در نظر گرفته شده است (سایر متغیرهای استفاده شده در روابط ۱۲ تا ۱۶ در روابط ۲ و ۱۱ معرفی گردیده‌اند).

با محاسبه جرم و سختی ترازهای ارتفاعی سکو و جای‌گذاری آنها در روابط ۱۲ و ۱۴، ماتریس‌های جرم و سختی سیستم برآورد می‌گردند. در رابطه ۱۳، ماتریس میرایی ذاتی سکو بر اساس روش میرایی رایلی و با در نظر گرفتن ۵، ۳ و ۲ درصد میرایی به ترتیب برای مدهای اول، دوم و سوم نوسان ارزیابی می‌گردد. در این تحقیق، مؤلفه‌های بردار نیروی امواج و جریان آب وارد بر درجات آزادی سیستم، رابطه ۱۶، با استفاده از رابطه موريسون برآورد شده‌اند [22]. با توجه به اینکه زمان تناوب سازه سکو کوچکتر از ۳ ثانیه است، می‌توان از اندرکنش سازه و سیال صرف نظر نموده و رابطه موريسون را به صورت رابطه ۱۷ در نظر گرفت.

$$F(z, v, t) = \rho \pi \frac{D^2}{4} C_m \ddot{U}(z, v, t) + \frac{1}{2} \rho D C_d |\dot{U}(z, v, t)| \dot{U}(z, v, t) \quad (17)$$

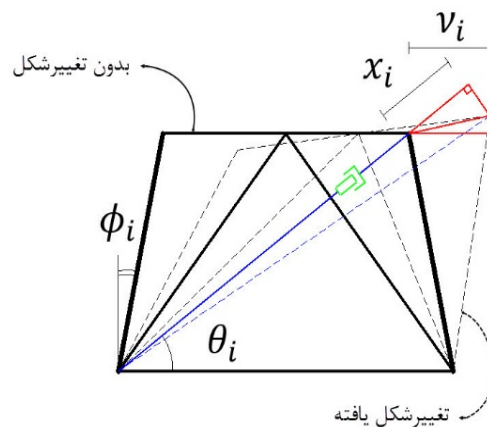
در رابطه ۱۷،  $F(z, v, t)$  نیروی گسترده وارد بر واحد طول یک عضو مستغرق در فاصله قائم از سطح آزاد دریا،  $z$  فاصله افقی از مبدأ  $v$  و زمان  $t$  می‌باشد.  $\ddot{U}(z, v, t)$  شتاب امواج و  $\dot{U}(z, v, t)$  مجموع سرعت امواج و جریان آب بوده و پس از اعتبارسنجی با استفاده از تئوری موج مرتبه پنجم استوکس ارزیابی گردیده‌اند. متغیرهای  $\rho$  و  $D$  به ترتیب چگالی آب و قطر خارجی اعضای سکو بوده و متغیرهای  $C_m$  و  $C_d$  نیز به ترتیب ضرایب اینرسی و درگ می‌باشند. در تعدادی از مطالعات آماری انجام شده در زمینه تغییرات این ضرایب در حالت استفاده از تئوری موج مرتبه ۵ام استوکس، ضریب اینرسی حدود ۲ و ضریب درگ در محدوده ۰/۸ تا ۱ برآورد شده است. از این رو در تحقیق حاضر برای ضرایب اینرسی و درگ، به ترتیب مقادیر ۲ و ۰/۸ انتخاب شده و از وابستگی آنها به عدد فروید (و تغییرات در عمق) صرف نظر شده است [23]. مقادیر جرم هر یک از درجات آزادی، سختی ترازها و همچنین بیشینه دامنه نیروی امواج و جریان مطابق جدول ۴ برآورد گردیده است. لازم به ذکر است که نیروی وارد بر هر یک از درجات آزادی سیستم جرم متمرکز معادل سکو، جمع نیروهای وارد بر نیمه بالا و نیمه پایین اعضای سکو در هر تراز می‌باشد.

جدول ۴) مشخصات دینامیکی سیستم پنج درجه آزادی جرم متمرکز سکو

تراز ارتفاعی سکو	تراز اول (تراز شمع‌ها)	تراز دوم	تراز سوم	تراز چهارم	تراز پنجم (تراز عرشه)
جرم (تن)	۲۲۰	۲۰۰	۱۹۵	۱۳۰	۴۸۵۰
سختی (مگا نیوتن بر متر)	۹۰	۳۵۰	۲۱۰	۱۱۵	۴۲
بیشینه دامنه نیروی موج و جریان (کیلو نیوتن)	۲۸/۵	۱۳۳	۵۳۰	۸۲۵	۱۱۱

کششی میراگرها می‌توان تغییر شکل جانبی تراز  $i$ ام سکو و افزایش طول میراگرهای این تراز را مطابق رابطه ۱۱ به یکدیگر مرتبط نمود.

$$x_i = [\sqrt{1 + \tan^2 \phi_i} \cos(\theta_i - \phi_i)] v_i \quad (11)$$



شکل ۵) تغییر شکل جانبی تراز  $i$  سکو

در رابطه ۱۱،  $v_i$  تغییر شکل جانبی،  $x_i$  افزایش طول میراگرها،  $\phi_i$  زاویه راستای پایه‌های سکو با امتداد قائم و  $\theta_i$  زاویه راستای میراگر با امتداد افق در تراز  $i$ ام سکو می‌باشند. مجموعه سازه به صورت سیستم ۵ درجه آزادی جرم متمرکز در نظر گرفته شده و بخش‌های متفاوت رابطه ۲، مطابق با روابط ۱۲ تا ۱۶ توسعه می‌یابند.

$$[M] [\dot{v}] = \begin{bmatrix} M_1 & & & 0 \\ & M_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & M_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \vdots \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[C] [\dot{v}] = (\alpha_1 [M] + \alpha_2 [K]) \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \vdots \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[K] [v] = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & & 0 \\ -K_2 & K_2 + K_3 & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & -K_5 \\ 0 & & -K_5 & K_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_5 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\{F_{sh}\} = 2 \times \begin{bmatrix} 0 - F_{sh_2} \times \cos(\theta_2) \\ F_{sh_2} \times \cos(\theta_2) - F_{sh_3} \times \cos(\theta_3) \\ \vdots \\ F_{sh_5} \times \cos(\theta_5) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\{F_{w,c}\} = \begin{bmatrix} F_{1w,c} \\ F_{2w,c} \\ \vdots \\ F_{5w,c} \end{bmatrix} \quad (16)$$

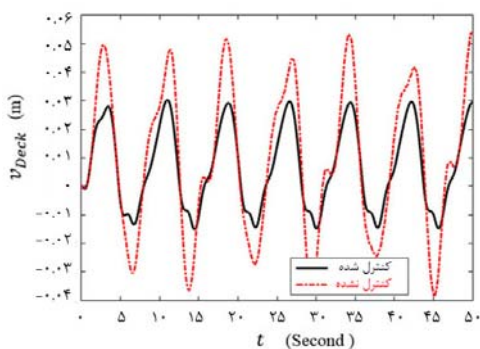
در رابطه ۱۲ متغیرهای  $M_1$  تا  $M_5$  به ترتیب جرم ترازهای ارتفاعی سکو، در رابطه ۱۳ متغیرهای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  به ترتیب ضرایب میرایی رایلی ماتریس جرم و ماتریس سختی [21]، در رابطه ۱۴ متغیرهای  $K_1$  تا  $K_5$  به ترتیب سختی ترازهای ارتفاعی سکو، در رابطه ۱۵ متغیرهای  $F_{sh_2}$  تا  $F_{sh_5}$  به ترتیب نیروی میراگرهای ۴ تراز فوقانی سکو و نهایتاً در رابطه ۱۶ متغیرهای  $F_{1w,c}$  تا  $F_{5w,c}$  به ترتیب



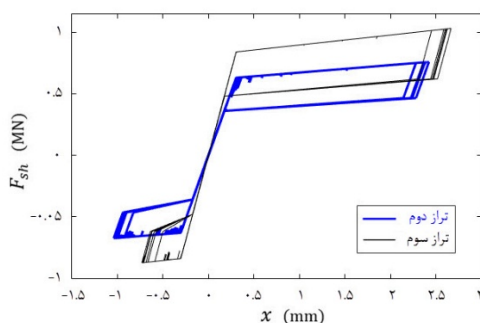
مراحل بارگذاری و باربرداری)، معادل میزان انرژی مستهلک‌شده توسط میراگرها است که در قالب انرژی کرنشی داخلی در عضو، ذخیره نشده و تلف می‌گردد.

نمودارهای نیرو- تغییر مکان چرخه‌ای میراگرهای تراز دوم و سوم سکو در نمودار ۵ و میراگرهای تراز چهارم و پنجم در نمودار ۶ نشان داده شده‌اند. تغییر طول بزرگ میراگرها در این ۲ نمودار، درصد بالای تبدیلات فازی آستنیت به مارتنزیت و بر عکس را نشان می‌دهد. سطح بسیار بزرگ نمودار چرخه‌ای میراگرها و کاهش قابل ملاحظه جابجایی‌های عرشه، تاییدی بر مشخصات هندسی مناسب میله‌های آلیاژ حافظه‌دار است. نکته قابل توجه در نمودارهای ۵ و ۶، سطح نسبتاً کوچک ناحیه منفی نمودارهای چرخه‌ای میراگرها است. علت این امر، ماهیت ذاتی جابجایی و ارتعاش سکوی دریایی تحت بار امواج و جریان آب است (معمولاً، دامنه جابجایی‌های عرشه سکو در جهت موافق امواج، بزرگتر از جهت مخالف امواج است). لازم به ذکر است که در تمامی تحلیل‌های عددی این تحقیق جهت افزایش دقت پاسخ‌های دینامیکی سکو و میراگرها از گام‌های زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه استفاده شده است.

الحاق میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار به سکوی دریایی با هدف افزایش استهلاک انرژی وارده از طرف امواج و کاهش جابجایی‌های عرشه، کاهش شتاب و نیروی برشی ترازهای ارتفاعی سکو را نیز به همراه داشته است. نمودارهای ۷ و ۸، کاهش مقادیر شتاب عرشه ( $\ddot{v}_{Deck}$ ) و همچنین کاهش نیروی برشی پایه ( $V$ ) را نشان می‌دهند.



نمودار ۴) تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های عرشه سکو در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده



نمودار ۵) نمودار نیرو- تغییر مکان چرخه‌ای میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار ترازهای دوم و سوم

### ۳-۵- مشخصات هندسی و مکانیکی میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار

مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار به کار گرفته‌شده در این تحقیق، مشابه تحقیق انجام‌شده توسط دس‌روچر و همکاران می‌باشد (جدول ۵) [24]. میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار ۲ ویژگی سختی و میرایی را به صورت همزمان دارا می‌باشند. مساحت زیاد و طول کم میله‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش قابلیت سختی ارتجاعی میراگر و کاهش قابلیت میرایی و استهلاک آن خواهد شد. کاهش مساحت میله‌ها نیز باعث کاهش مساحت زیر نمودار چرخه‌ای نیرو- تغییر مکان میراگر خواهد شد. بنابراین مشخصات هندسی میله‌های آلیاژ حافظه‌دار می‌بایست با دقت زیادی انتخاب گردند.

در تحلیل‌های بهینه‌سازی انجام‌شده روی آلیاژهای حافظه‌دار اغلب به استفاده از طول‌های بسیار کوتاه برای میله یا سیم آلیاژ حافظه‌دار توصیه شده است [25]. بنابراین با در نظر گرفتن محدودیت‌های هندسی و سازه‌ای میراگر پیشنهادی، طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار برابر ۴۰ میلی‌متر انتخاب شده‌اند. با انجام تعداد محدودی تحلیل عددی برای مجموع مساحت میله‌های آلیاژ حافظه‌دار میراگرهای ترازهای دوم تا پنجم سکو به ترتیب مقادیر ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۷۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر مربع انتخاب شده‌اند. این مقادیر به گونه‌ای تعیین شده‌اند که افزایش طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار، کوچکتر مساوی افزایش طول انتهای تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت بوده و پاسخ‌های دینامیکی سکو نیز کاهش مناسبی داشته باشند.

جدول ۵) مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار

مشخصات مکانیکی	مقدار	واحد
مدول ارتجاعی (آستنیت و مارتنزیت)	۵۵	گیگاپاسکال
کرنش فوق ارتجاعی	۶	درصد
تنش آغاز (آستنیت به مارتنزیت)	۴۲۰	مگاپاسکال
تنش پایان (آستنیت به مارتنزیت)	۵۲۰	مگاپاسکال
تنش آغاز (مارتنزیت به آستنیت)	۳۲۰	مگاپاسکال
تنش پایان (مارتنزیت به آستنیت)	۲۴۰	مگاپاسکال

### ۴-۵- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی

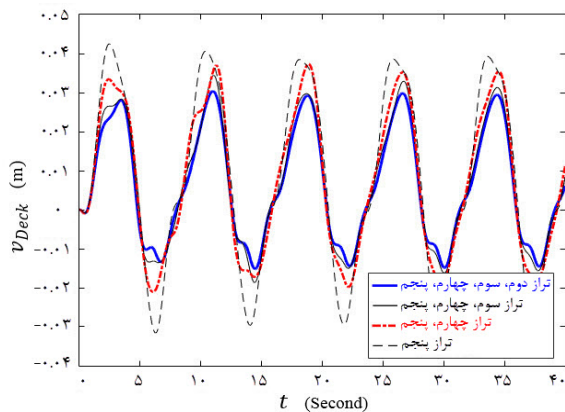
پس از تعیین مشخصات مکانیکی و هندسی سکوی دریایی و آلیاژهای حافظه‌دار و همچنین برآورد بارهای جانبی، می‌توان تاریخچه زمانی پاسخ‌های دینامیکی سکوی مجهز به میراگرها را محاسبه نمود. نمودار ۴، تاریخچه تغییر مکان‌های عرشه ( $v_{Deck}$ ) برای دو حالت "با" و "بدون" میراگر را نشان می‌دهد. از نمودار ۴ می‌توان نتیجه گرفت که میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار به کار گرفته‌شده، قابلیت بالایی در استهلاک انرژی وارده و کاهش تغییر مکان‌های عرشه دارند.

در این تحقیق، اعضای سازه سکو رفتار خطی داشته و استهلاک انرژی توسط میرایی ذاتی سکو و میراگرها صورت می‌پذیرد. جابجایی نسبی ترازهای ارتفاعی سکو باعث تغییر طول میراگرها و ورود آلیاژها به نواحی تبدیلات فازی (آستنیت به مارتنزیت و برعکس) شده و سطوح بسته‌ای در نمودارهای نیرو- تغییر مکان میراگرها تولید می‌نماید. مساحت‌های محدودشده توسط این نمودارها (در

محاسبه گردیده است. نمودار ۹ تغییرات پاسخ تغییر مکان‌های عرشه با توجه به حذف میراگرها در ترازهای ارتفاعی سکو را نشان می‌دهد. واضح است که الحاق میراگر در تراز دوم تاثیر چندانی در کاهش پاسخ تغییر مکان‌های عرشه ندارد. بنابراین با توجه به مشکلات اجرایی نصب، تعمیر و بازرسی میراگر در تراز تحتانی سکو بهتر است فقط در ۳ تراز فوقانی از وجود میراگرها استفاده شود.

جدول ۶) بیشینه پاسخ‌های دینامیکی سکو برای حالت‌های کنترل‌شده و کنترل‌نشده

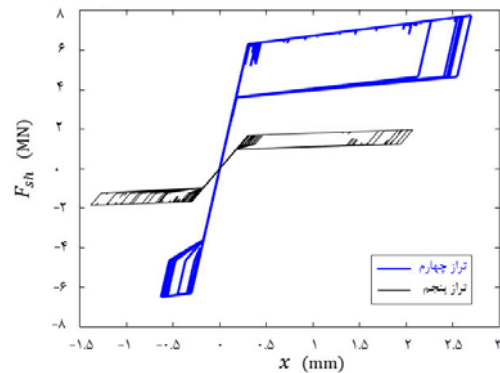
درصد کاهش	سکوی کنترل‌نشده	سکوی کنترل‌شده	
۴۲	۵۴	۳۱	جابجایی بیشینه عرشه (میلی‌متر)
۶۲	۱۳۴	۵۱	شتاب بیشینه عرشه (میلی‌متر بر ثانیه)
۳۲	۲۵۰۰	۱۷۰۰	برش پایه بیشینه سکو (کیلو نیوتن)



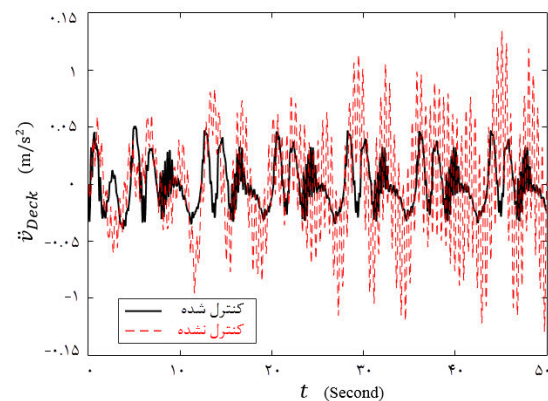
نمودار ۹) تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های عرشه برای حالت‌های مختلف جانمایی میراگر در ترازهای ارتفاعی سکو

### ۶- نتیجه‌گیری

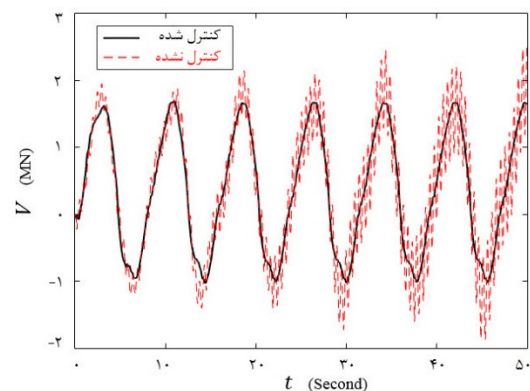
در این تحقیق به بررسی آثار استفاده از میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار در بهبود رفتار دینامیکی سکوهایی دریایی ثابت تحت بار موج منظم پرداخته شد. برای مدل‌سازی رفتار نیرو-تغییر مکان چرخه‌ای آلیاژ حافظه‌دار از مدل ایده‌آل چندخطی و برای حل معادله ارتعاش نیز از روش انتگرال‌گیری مستقیم استفاده گردید. به‌عنوان مطالعه موردی نیز یک سکوی دریایی به ارتفاع ۹۰ متر به‌صورت سیستم جرم متمرکز مدل‌سازی شده و به میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار با میله‌های نایتینول مجهز گردید. مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخ‌های دینامیکی سکو نشان می‌دهند که الحاق میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار به سکوی دریایی مورد مطالعه، ۴۲ درصد کاهش در جابجایی بیشینه عرشه، ۶۲ درصد کاهش در شتاب بیشینه عرشه و ۳۲ درصد کاهش در برش پایه بیشینه سکو را به همراه داشته است. با این وجود، میراگرهای طراحی‌شده در این تحقیق دارای سه ویژگی خاص می‌باشند:



نمودار ۶) نمودار نیرو- تغییر مکان چرخه‌ای میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار ترازهای چهارم و پنجم



نمودار ۷) تاریخچه زمانی پاسخ‌های شتاب عرشه سکو در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده



نمودار ۸) تاریخچه زمانی پاسخ‌های برش پایه سکو در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده

در جدول ۶، بیشینه پاسخ‌های دینامیکی سکوی "با" و "بدون" میراگر (کنترل‌شده و کنترل‌نشده) ارائه شده‌اند. با مقایسه نتایج ارائه‌شده می‌توان نتیجه گرفت که الحاق میراگر حافظه‌دار به سکوی دریایی، کاهش چشمگیر جابجایی و شتاب عرشه و همچنین کاهش قابل قبول نیروی برشی پایه را به همراه داشته است.

در انتهای این تحقیق، اثر جانمایی متفاوت میراگرها روی پاسخ تغییر مکان عرشه سکو نیز بررسی شده است. به این ترتیب که میراگرها از ترازهای پایین‌تر سکو حذف شده و پاسخ ارتعاش سکو

روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۳٪)؛ ناصر شایختی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۳٪)  
**منابع مالی:** تحت حمایت دانشگاه سیستان و بلوچستان بوده است.

### فهرست علائم

علائم انگلیسی	
$A$	مجموع مساحت مقطع میله‌های آلیاژ حافظه‌دار میراگر
$C$	ماتریس میرایی سازه‌ای سیستم
$C_d$	ضریب درگ
$C_m$	ضریب اینرسی
$D$	قطر بیرونی مقاطع اعضای سکو
$E_{SMA}$	مدول ارتجاعی اولیه آلیاژ حافظه‌دار
$F_{sh}$	نیروی عضو میله‌ای آلیاژ حافظه‌دار
$F_{ys}$	نیروی تسلیم عضو میله‌ای آلیاژ حافظه‌دار
$F_{w,c}$	بردار نیروی موج و جریان سیستم
$F_f^{AM}$	نیروی پایان فاز آستنیت به مارتنزیت
$F_f^{MA}$	نیروی پایان فاز مارتنزیت به آستنیت
$F_s^{AM}$	نیروی آغاز فاز آستنیت به مارتنزیت
$F_s^{MA}$	نیروی آغاز فاز مارتنزیت به آستنیت
$F(z, v, t)$	نیروی امواج در رابطه موربوسون
$\dot{F}_{sh}$	تغییرات نیروی محوری عضو میله‌ای آلیاژ حافظه‌دار نسبت به زمان
$i$	ترازهای ارتفاعی سکو
$K$	ماتریس سختی سیستم چندین درجه آزادی سکو
$k_1$	سختی محوری میله در فاز آستنیت و مارتنزیت
$k_2$	سختی محوری میله در ناحیه تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت
$k_3$	سختی محوری میله در ناحیه تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت
$L$	طول میله آلیاژ حافظه‌دار
$M$	ماتریس جرم سیستم چندین درجه آزادی سکو
$\dot{U}(z, v, t)$	سرعت موج و جریان
$\ddot{U}(z, v, t)$	شتاب موج
$V$	نیروی برشی پایه سکو
$v$	بردار جابجایی سیستم چندین درجه آزادی سکو
$v_i$	جابجایی تراز $i$ سیستم
$\dot{v}$	بردار سرعت سیستم چندین درجه آزادی سکو
$\ddot{v}$	بردار شتاب سیستم چندین درجه آزادی سکو
$x$	تغییر طول میله آلیاژ حافظه‌دار
$x_i$	تغییر طول میله آلیاژ حافظه‌دار میراگر تراز $i$
$x_f^{AM}$	تغییر طول پایان فاز آستنیت به مارتنزیت
$x_f^{MA}$	تغییر طول پایان فاز مارتنزیت به آستنیت
$x_s^{AM}$	تغییر طول آغاز فاز آستنیت به مارتنزیت
$x_s^{MA}$	تغییر طول آغاز فاز مارتنزیت به آستنیت
$\dot{x}$	سرعت تغییر طول میله آلیاژ حافظه‌دار
علائم یونانی	
$\alpha_1$	ضریب میرایی رایلی ماتریس جرم
$\alpha_2$	ضریب میرایی رایلی ماتریس سختی
$\varepsilon$	کرنش محوری میله آلیاژ حافظه‌دار
$\varepsilon_L$	کرنش محوری بیشینه تبدیل فازها
$\eta$	کنترل‌کننده تیزی نمودار در مسیر رفت و برگشت
$\theta_i$	زاویه راستای میراگر با مهاربند افقی

۱- مشخصات هندسی و کارایی میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار برای کاهش ارتعاشات سکوی دریایی تحت بار یک موج منظم شدید با ارتفاع ۱۱/۸ متر و زمان تناوب ۷/۸ ثانیه، تعیین گردید. با تغییر مشخصات دینامیکی امواج، کارایی میراگرهای طراحی‌شده نیز تغییر خواهند یافت.

۲- سطوح زیر نمودارهای نیرو- تغییر مکان چرخه‌ای، میزان اتلاف انرژی توسط میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار را نشان می‌دهند. بررسی سطوح محصورشده توسط نمودارها، حاکی از این هستند که مساحت‌های تولیدشده در ناحیه مثبت نمودارها (جابجایی در جهت امواج) بزرگتر از ناحیه منفی (جابجایی در خلاف جهت امواج) می‌باشند.

۳- بررسی جانمایی میراگرها در ترازهای ارتفاعی سکو نشان داد که میراگرهای نصب‌شده در تراز دوم تاثیر قابل توجهی در کاهش جابجایی‌های عرشه نداشته‌اند. بنابراین با توجه به دشواری‌های نصب و بازرسی میراگرها در ترازهای تحتانی سکو بهتر است میراگرها را فقط در ترازهای فوقانی به سکو متصل نمود.

با توجه به ویژگی‌های ۱ و ۲ برای مقاصد عملی کنترل ارتعاشات سکوها بهتر است از میراگرهای فعال یا نیمه‌فعال آلیاژ حافظه‌دار با قابلیت تنظیم سختی میله‌ها، استفاده نمود. در این تحقیق برای اتصال میراگرها به سکو از اعضای کششی با سطح مقطع کوچک استفاده شد. از این روش اتصال می‌توان در طرح‌های مقاوم‌سازی سکوها دریایی موجود بدون افزایش قابل ملاحظه نیروی امواج، استفاده نمود.

روابط نیرو- تغییر مکان چرخه‌ای ایده‌آل آلیاژ حافظه‌دار ارائه‌شده در این تحقیق بر مبنای تغییرات جابجایی توسعه‌یافته و حذف متغیر سرعت از روابط چرخه‌ای، کاهش تعداد مجهولات و همچنین کاهش حجم محاسبات عددی را به همراه داشته است. بنابراین برای تحقیق‌های آینده پیشنهاد می‌گردد که مشخصات هندسی (و مکانیکی) میله‌های آلیاژ حافظه‌دار با به‌کار بستن این روابط چرخه‌ای و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تعیین گردد.

**تشکر و قدردانی:** از دانشگاه سیستان و بلوچستان که شرایط تحصیل را مهیا نموده‌اند، تشکر می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** مولفین این تحقیق، گواهی می‌دهند که تمامی ضوابط اخلاقی و قانونی نشر مقالات علمی را رعایت نموده‌اند. این مقاله، با مشخصات ارائه‌شده در آن، از هیچ مقاله داخلی یا خارجی کپی‌برداری نشده و بخشی از یک رساله دکتری مهندسی عمران است.

**تعارض منافع:** با توجه به اینکه، آقای محمدهادی انفرادی، دانشجوی مقطع دکتری مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان هستند، منافع این تحقیق به دانشگاه فوق‌الذکر تعلق خواهد داشت

**سهم نویسندگان:** محمدهادی انفرادی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۴٪)؛ محمدرضا قاسمی (نویسنده دوم)،

- opportunities. *Materials & Design* (1980-2015). 2014;56:1078-1113.
- 13- Guo Y, Klink A, Fu Ch, Snyder J. Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy. *CIRP Annals*. 2013;62(1):83-86.
- 14- Zhang Y, Zhu S. A shape memory alloy-based reusable hysteretic damper for seismic hazard mitigation. *Smart Materials and Structures*. 2007;16(5):1603-1613.
- 15- Wilde K, Gardoni P, Fujino Y. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering Structures*. 2000;22(3):222-229.
- 16- Auricchio F, Taylor RL, Lubliner J. Shape-memory alloys: Macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1997;146(3-4):281-312.
- 17- Ghodke Sh, Jangid RS. Equivalent linear elastic-viscous model of shape memory alloy for isolated structures. *Advances in Engineering Software*. 2016;99:1-8.
- 18- Paul S, Datta TK, Kapuria S. Control of fixed offshore jacket platform using semi-active hydraulic damper. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2009;131(4):041106.
- 19- Asgarian B, Moradi S. Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011;67(1):65-74.
- 20- Ranjbar P, Malayjerdi E. Determining of the capacity of the jacket platforms by non-linear pushover analysis. The 6<sup>th</sup> International Offshore Industries Conference, 2015 May 4-5, Sharif University of Technology, Tehran. Tehran: Iranian Association of Marine Engineering; 2015.
- 21- Baron Rayleigh JWS. *The Theory of Sound*. 2<sup>nd</sup> Edition. 2<sup>nd</sup> Volume. New York: Dover Publications; 1945.
- 22- Morison JR, Johnson JW, Schaaf SA. The force exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*. 1950;2(05):149-154.
- 23- Zhang SF, Chen Ch, Zhang QX, Zhang DM, Zhang F. Wave loads computation for offshore floating hose based on partially immersed cylinder model of improved Morison formula. *The Open Petroleum Engineering Journal*. 2015;8(1):130-137.
- 24- DesRoches R, McCormick J, Delemont M. Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars. *Journal of Structural Engineering*. 2004;130(1):38-46.
- 25- Masuda A, Noori M. Optimization of hysteretic characteristics of damping devices based on pseudoelastic shape memory alloys. *International Journal of Non Linear Mechanics*. 2002;37(8):1375-1386.

چگالی آب (۱۰۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب)	$\rho$
تنش محوری میله آلیاژ حافظه‌دار	$\sigma$
زاویه پایه سکو با امتداد قائم	$\phi_i$

## منابع

- 1- Li HN, Liu MM, Fu X. An innovative re-centering SMA-lead damper and its application to steel frame structures. *Smart Materials and Structures*. 2018;27(7):075029.
- 2- Wang Sh, Meng X, Ji Sh, Fang H, Liu Y, Duan L. All-metal brace with hysteresis dissipation for impact protection of jacket platforms. *Marine Structures*. 2019;66:1-15.
- 3- Vandiver JK, Mitome Sh. Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms. *Applied Ocean Research*. 1979;1(2):67-74.
- 4- Shafieefar M, Aghakouchak AA, Moharrami MR. Mass damper and buoyancy functioning of a submerged tank on the response of fixed offshore platforms. *Modares Civil Engineering Journal*. 2014;14(20):65-79. [Persian]
- 5- Patil KC, Jangid RS. Passive control of offshore jacket platforms. *Ocean Engineering*. 2005;32(16):1933-1949.
- 6- Jafarabad A, Kashani M, Adl Parvar MR, Golafshani AA. Hybrid damping systems in offshore jacket platforms with float-over deck. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;98:178-187.
- 7- Shabakhty N. System failure probability of offshore jack-up platforms in the combination of fatigue and fracture. *Engineering Failure Analysis*. 2011;18(1):223-243.
- 8- Zhang J, Ma Z, Liu F, Zhang Ch, Sharafi P, Rashidi M. Seismic performance and ice-induced vibration control of offshore platform structures based on the ISO-PFD-SMA brace system. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017;2017:3596094.
- 9- Tabeshpour MR, Komachi Y. Assessment and rehabilitation of jacket platforms. In: Moustafa A, editor. *Earthquake resistant structures—design, assessment and rehabilitation*. Rijeka: InTech. 2012. pp. 381-407.
- 10- Zhang BL, Han QL, Zhang XM, Tang GY. *Active control of offshore steel jacket platforms*. Singapore: Springer; 2019.
- 11- Wood WL, Bossak M, Zienkiewicz OC. An alpha modification of Newmark's method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1980;15(10):1562-1566.
- 12- Jani JM, Leary M, Subic A, Gibson MA. A review of shape memory alloy research, applications and