بررسی پاسخ سکوهای فراسـاحلی ثابت فلزی مجهز به آلـیاژ حافظه دار شکلی درعمق های مختلف تحت نیروی امواج

ناصر شابختی[۱] ، امیر گیوکی[۲*]

[۱] استادیار، دانشگاه سیستان و بلوچستان, دانشکده مهندسی, گروه مهندسی عمران؛ shabakhty@eng.usb.ac.ir
[۲] کارشناس ارشد سازه های دریایی، شرکت نفت و گاز پارس؛ amir.givkay@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:
سکوهای فراساحلی ثابت فلزی
سیستم مهاربندی آلیاژ حافظه دار شکلی فوق ارتجاعی
پارامتر هندسی عمق

چکیده

در این مقاله پاسخ سکوهای فراساحلی ثابت فلزی در عمق های مختلف تحت اثر نیروی موج، که مهاربندهای آن مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی فوق ارتجاعی می باشد، مورد مطالعه قرار گرفته شده است. برای این منظور سکوهای واقع شده در عمق های آب مختلف شامل ۷۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ متری بررسی شده است. ابتدا برای ارزیابی رفتار غیرخطی سکوها و بدست آوردن مقاطع سکوها در رفتار غیرخطی از تحلیل بارافزون با استفاده از نرم افزار SACS استفاده شده است، سپس تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی با استفاده از نرم افزارالمان محدود ANSYS برای سکوهای در عمق های مختلف و در دو حالت مجهز به سیستم مهاربندی آلیاژحافظه دار شکلی وبدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت امواج طوفانی انجام شده است. با مقایسه وبررسی نتایج مشخص می گردد که سکوی موجود در عمق ۷۰ متری تحت امواج طوفانی دارای رفتار خطی بوده واستفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی تاثیری در رفتار سکو نخواهد داشت، در حالیکه درسکوهای واقع شده در عمق های ۱۱۰ و ۱۵۰ متری با استفاده از سیستم مهاربندی آلیاژ حافظه دار شکلی رفتار غیر خطی وکرنش های پسماند در سازه حذف گردیده وانرژی وارده به سکو بوسیله آلیاژ حافظه دار شکلی جذب می گردد و انرژی در المانهای اصلی سازه به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

Investigation on Response of Fixed Offshore Platforms Equipped With Shape Memory Alloy Elements at Different Depth under Extreme Wave Loading

Naser Shabakhty[1], Amir Givkay[2*]

[1] Assistance Professor, Sistan and Baluchistan University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering; *shabakhty@eng.usb.ac.ir*
[2] MSc in Marine Structures, Pars Oil and Gas Company; amir.givkay@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Sep. 2013
Accepted: 11 Mar. 2014
Available online: 19 Mar. 2014

Keywords:
Jacket Offshore Platforms
Shape Memory Alloy Bracing System
Super-elasticity
Water Depth Variation

ABSTRACT

In this research, the response of fixed offshore platforms equipped with shape memory alloy elements at the different depths under extreme wave loading are taken into account. For this purpose platforms located in different water depths 70, 110 and 150 has been considered. At first for evaluation of the nonlinear behavior of three platforms, pushover analysis using SACS has been engaged. Then nonlinear time history analysis under storm environmental condition using ANSYS finite element program has been performed on platforms situated in each water depths for two cases of with and without SMA. Based on results of this study, platform located in 70 meter water depth under storm wave has linear behavior and use of SMA doesn't have any effect on it, while with equipped SMAs on 110 and 150 meters water depth platforms, SMA can be used such as a damper in structure because they have re-centering and energy dissipation capabilities. Applying the SMA damper in the jacket bracing, topside displacement and energy dissipation is controllable via mechanical properties of SMA selected by designer judgment as well re-centering capability of related damper prevents to generate residual strain in structure joint cans and members.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]

۱ - مقدمه

بخش عمده ای از سکوهای دریایی به منظور استخراج و بهره برداری از مخازن هیدروکربنی استفاده می شود که این امر باعث می شود که عدم مقاومت کافی اعضا واتصالات سازه در اثر بارهای محیطی وارده در طول عمر مفید سازه موجب کاهش عمر و خرابی کلی وجزئی در این نوع از سازه ها شده و گاهاً خسارات جبران ناپذیری برجای گذارد. از طرف دیگر بعلت قرار گیری این سازه ها در محیط دریا، تعویض وتعمیر اعضا آسیب دیده سخت وگاه مستلزم هزینه های بسیاری می باشد. مهمترین بارگذاری محیطی وارد برسکوهای دریایی نیروی چرخه ای امواج می باشد که دارای ماهیت تصادفی می باشد ورفتار واقعی سازه دراثر این نیرو در شرایط عادی وطوفانی وهمچنین اثرات آن در پدیده خستگی و عمر مفید اعضا واتصالات سازه از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. سکوهای فراساحلی ثابت فلزی نوع شابلونی یا جکت ها [۱]، که ۹۸ درصد سکوهای فراساحلی موجود در جهان را بخود اختصاص می دهد، دارای مقاطع دایره ای و اتصالات صلب مهاربند به المان اصلی، که اصطلاحاً جوینت کن[۲] نامیده می شود، و همچنین عمدتاً دارای شیب وجوه جکت می باشند. در این سکوها بمنظور جلوگیری از شکست ناشی از پدیده خستگی در اتصالات جوینت کن در اثر نیروی چرخه ای امواج که باعث تمرکز تنش در محیط اتصال مهاربند به المان اصلی می گردد و همچنین برش پانچ ایجاد شده دراین اتصالات ،که بخش عمده ای از نیروهای انتقالی مهاربند به المان اصلی را تشکیل می دهد، در اثر نیروی موج در شرایط طوفانی وزلزله که منجر به کمانش موضعی در این اتصالات و نهایتاً شکست وفروپاشی سازه می گردد، ناگزیر به استفاده از مقاطع بسیار قوی می باشند. ویژگیهای خاص اشاره شده بالا در مورد سکوهای فراساحلی شابلونی وتحقیقات گسترده ای که درمورد رفتار غیرخطی این سازه تحت نیروهای تحمیل شده نظیر امواج طوفانی، زلزله، ضربه کشتی، انفجار وغیره انجام شده است[۱]، و همچنین از نتایجی که در این مقاله در تحلیل پوش اور سکوها دراثر بار افزایشی موج حاصل شده است نشان می دهد که این سکوها دارای سختی بالا، شکل پذیری محدود وظرفیت جذب انرژی پایین در محدوده الاستیک می باشند.

از آنجایی که رفتار غیرخطی سکوهای جکتی تحت بارگذاری محیطی امواج به میزان قابل توجهی وابسته به اعضا مهاربندی واتصالات جوینت کن می باشد، آلیاژ های حافظه دار شکلی (SMA)[۳] فوق ارتجاعی[۴] می تواند در سیستم مهاربندی بعنوان راهکاری برای بهبود رفتار غیر خطی این سازه ها مورد بررسی قرار گیرد. آلیاژ حافظه دار شکلی فوق ارتجاعی با داشتن ظرفیت جذب انرژی مناسب همراه با قابلیت بازگشت پذیری می تواند با جذب واستهلاک انرژی اعمالی امواج تلاشهای وارد بر اعضای اصلی سازه را کاهش و مانع از برجای گذاشتن کرنش پسماند در اعضا واتصالات سازه گردد. بعلاوه می تواند با کاهش مشخصات هندسی مقاطع مورد استفاده در سکو باعث بهینه شدن طرح وکاهش تاثیر نیروی امواج بر المانهای سازه گردد. با بازنگری تحقیقات گذشته آشکار شده است که تاکنون هیچگونه مطالعه ای در مورد کاربرد SMA در سکوهای دریایی انجام نشده است، بنابراین تحقیق حاضر با هدف رفع فقدان این اطلاعات و امکان و تاثیر استفاده از SMA در سکوهای فراساحلی ثابت فلزی بعنوان تجهیزات ابتکاری و جدید در کنترل رفتار این سازه ها برای محافظت آنها در برابر شرایط محیطی حاکم و بویژه نیروی امواج انجام شده است. اگرچه بارگذاری ها و حالات طراحی مختلفی در طراحی سکوهای ثابت فلزی موثر می باشند، در این مقاله که هدف آن تنها تحقیقات مقدماتی دراین زمینه می باشد رفتار سکوهای دریایی مجهز به مهاربندهای آلیاژهای حافظه دار شکلی و تاثیر پارامتر هندسی عمق بر پاسخ آنها توسط مدل های اجزا محدود دوبعدی سکوهای در عمق ۷۰، ۱۱۰ و۱۵۰ متری با انجام تحلیل بارافزون[۵] و تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی بررسی شده است.

۱-۱-آلیاژهای حافظه دار شکلی

آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMA) بعنوان یک مصالح هوشمند، نوین و بسیار کارامد شناخته شده است. از مزایا و ویژگیهای منحصر به فرد آلیاژهای حافظه دار شکلی می توان به: قابلیت تحمل کرنش های زیاد تا حدود ۱۰٪ بدون اثرات غیرخطی و باقی گذاشتن کرنش پسماند، بدون محدودیت عمر مفید (عدم نیاز به تعویض، پس از زلزله یا بارهای محیطی در شرایط حداکثر)، مقاومت بالا در برابر خوردگی، مقاومت بالا در برابر خستگی، توانایی بازگشت به شکل اولیه بوسیله اعمال دما و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالا اشاره کرد [۳،۲]. SMA ها درسال ۱۹۳۲ کشف شدند و در سال ۱۹۶۰ آلیاژهایی بر پایه عناصر نیکل و تیتانیوم (نایتینول) تولید شدند که بهترین رفتار را نسبت به سایر آلیاژهای حافظه دار شکلی از خود نشان دادند. پس از آن تحقیقات گسترده ای در مورد کاربردهای عملی SMA ها در علوم مختلف از جمله علم پزشکی، صنعت هوافضا، مهندسی عمران وغیره انجام گردید. SMA ها مواد چندریختی می باشند، به این معنی که با یک ترکیب شیمیایی دارای چندین ساختار یا فاز کریستالی می باشد. فاز کریستالی غالب در SMA وابسته به دما وتنش اعمالی می باشد. فاز غالب در دمای بالا آستنیت و در دمای پایین مارتنزیت می باشد[۵،۴]. رفتار ماکروسکپی متمایز SMA مربوط به انتقالات بین این دو فاز می باشد. اثر حافظه شکلی و فوق ارتجاعی دو ویژگی منحصر به فرد SMA می باشند. اثر حافظه دار شکلی قابلیت بازگشت به شکل اولیه با فرآیند حرارت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

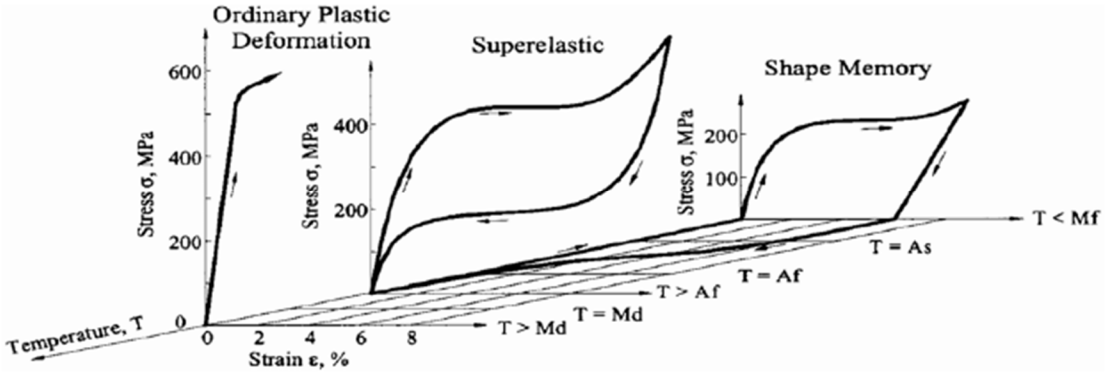
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]

دهی و اثر فوق ارتجاعی مربوط به توانایی برگشت پذیری در تغییر شکلهای بزرگ بعد از باربرداری می باشد [۶]. شکل۱ رفتار مکانیکی SMA را بعنوان تابعی از تنش، کرنش ودما را نشان می دهد. چنانچه دیده می شود، در دمای کمتر از پایان فاز مارتنزیت، M_f، SMA دارای رفتار حافظه شکلی می باشد، در این حالت تغییر مکان پسماند ایجاد شده در اثر تنش اعمالی با حرارات دهی، بالاتر از دمای پایان فاز آستنیت، A_f، حذف گردیده و نمونه به شکل اولیه خود باز می گردد. در دمای بالاتر از A_f ، SMA در فاز آستنیت قراردارد و بمحض بازگذاری آستنیت به مارتنزیت در اثر اعمال تنش تبدیل می شود که با باربرداری فاز مارتنزیت ناپدید شده و دوباره به آستنیت تبدیل می گردد، که این خاصیت رفتار فوق ارتجاعی یا سوپرالاستیک نامیده می شود. در دماهای بالاتر (بالاتر از M_d)، SMA رفتار الاستوپلاستیک با مقاومت بسیار بالا را نشان می دهد[۳]. لازم به ذکر است که A_s دمای شروع فاز آستنیت به مارتنزیت می باشد. این دو رفتار منحصر بفرد SMA باعث شده است که در یک دهه اخیر تحقیقات عددی وآزمایشگاهی زیادی در زمینه کاربرد SMA بعنوان سیستم های کنترل رفتار لرزه ای فعال، نیمه فعال و غیر فعال درسازه های مهندسی عمران از جمله ساختمان و پل ها انجام گردد[۷،۵،۴].

تعداد زیادی از این تحقیقات مربوط به ارزیابی عملکرد لرزه ای پل های مجهز به SMA بعنوان سیستم جداگرلرزه ای[۸] و تجهیزات کنترل غیرفعال لرزه ای [۹] می باشد. علاوه براین مطالعات گسترده ای در مورد کاهش خطر لرزه ای وارزیابی عملکرد ساختمانها با استفاده از تجهیزات SMA ، با تمرکز روی قابلیت جذب انرژی وخاصیت بازگردانندگی آنها، در مهاربندهای قابهای ساختمانی[۱۱،۱۰]، میراگرها[۱۳،۱۲]، اتصالات در سازه های فولادی و بتنی[۱۵،۱۴] و بهسازی بناهای موجود[۱۶] انجام شده است. واضح است که بعلت فقدان اطلاعات در زمینه امکان کاربرد وتاثیر تجهیزات SMA در سکوهای دریایی تحت شرایط محیطی خاص آنها، وجود تحقیقات عددی وآزمایشگاهی و توسعه ضوابط طراحی این سازه ها مجهز به این مصالح نوین ضروری بنظر می رسد.

۲-مشخصات قابها و بارگذاری محیطی مورد بررسی

در این مقاله بمنظور بررسی رفتار غیرخطی سکوهای فراساحلی ثابت شابلونی و مقایسه پاسخ آنها با سازه های مجهز به سیستم مهاربندی SMA فوق ارتجاعی ، سه گروه از قابهای دو بعدی سکو، که از دیدگاه عمق متفاوت می باشند، مطالعه شده است. چنانچه در شکل ۲ نشان داده شده است، این سکوها دارای مهاربند نوع K و در عمق های ۷۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ درنظر گرفته شده است. مقاطع مورد استفاده در این سکوها در جدول ۱ ارائه شده است، که در آنها بمنظور ساده سازی مدل، تمامی المانهای پایه، شمع، بادبند قطری، افقی و غیره از یک تیپ واحد انتخاب شده اند. مقاطع المان پایه و مهاربندها قطری از نتایج تحلیل پوش اور بمنظور ایجاد رفتار غیرخطی در سکوها حاصل شده است. در این تحقیق سکوهای مورد مطالعه تحت اثر نیروی امواج در شرایط حداکثر طوفانی (با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله) بررسی شده اند که برای سکوی موجود در عمق ۷۰ متر شرایط امواج طوفانی در خلیج فارس و برای سکوهای موجود در عمق ۱۱۰ و۱۵۰ متری شرایط امواج طوفانی در خلیج مکزیک مطابق با پیشنهاد آیین نامه API استفاده شده است. همچنین بمنظور انتخاب تئوری موج مناسب از نمودار موجود در آیین نامه API که محدوده تئوری های موج براساس عمق آب و ارتفاع موج را نشان میدهد[۱۷]، استفاده شده است، که درسه گروه عمق مورد بررسی در این مقاله تئوری موج مناسب، مرتبه پنجم استوکس در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- نمودار سه بعدی ارتباط بین تنش، کرنش و دما برای مشخصات مکانیکی SMA [۳]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]

برای محاسبه بار توزیع شده روی المانها از معادله موریسون که درآن برای محاسبه سرعت وشتاب از سرعت وشتاب نسبی که هم سرعت ذرات آب وهم سرعت سازه در نظر گرفته می شود، استفاده شده است. در معادله موریسون برای محاسبه سرعت سازه با استفاده از استدلال انتگرال گیری زمانی نیومارک در تحلیل تاریخچه زمانی استفاده می گردد. از دو نقطه انتگرال گیری در امتداد طول المان برای ایجاد بردار نیرو استفاده می شود که نقاط انتگرال گیری زیر خط بستر دریا در نظر گرفته نمی شود. برای المانهای متقاطع با سطح آزاد آب، نقاط انتگرال گیری فقط در امتداد منطقه خیس توزیع می شود. همچنین به منظور درنظرگرفتن اثرات نیروهای امواج اعمالی به سازه واقعی سه بعدی والمانهای عمود برصفحه سکو در قاب دو بعدی از معادل سازی ضرایب دراگ واینرسی معادل سازی شده در رابطه موریسون استفاده شده است. با توجه به اینکه در رابطه موریسون عبارت نیروی اینرسی با مربع قطر المان لوله ای و عبارت نیروی دراگ با قطر المان لوله ای متناسب می باشد ضرایب اینرسی ودراگ به صورت روابط (۱) و (۲) معادل سازی می گردد.

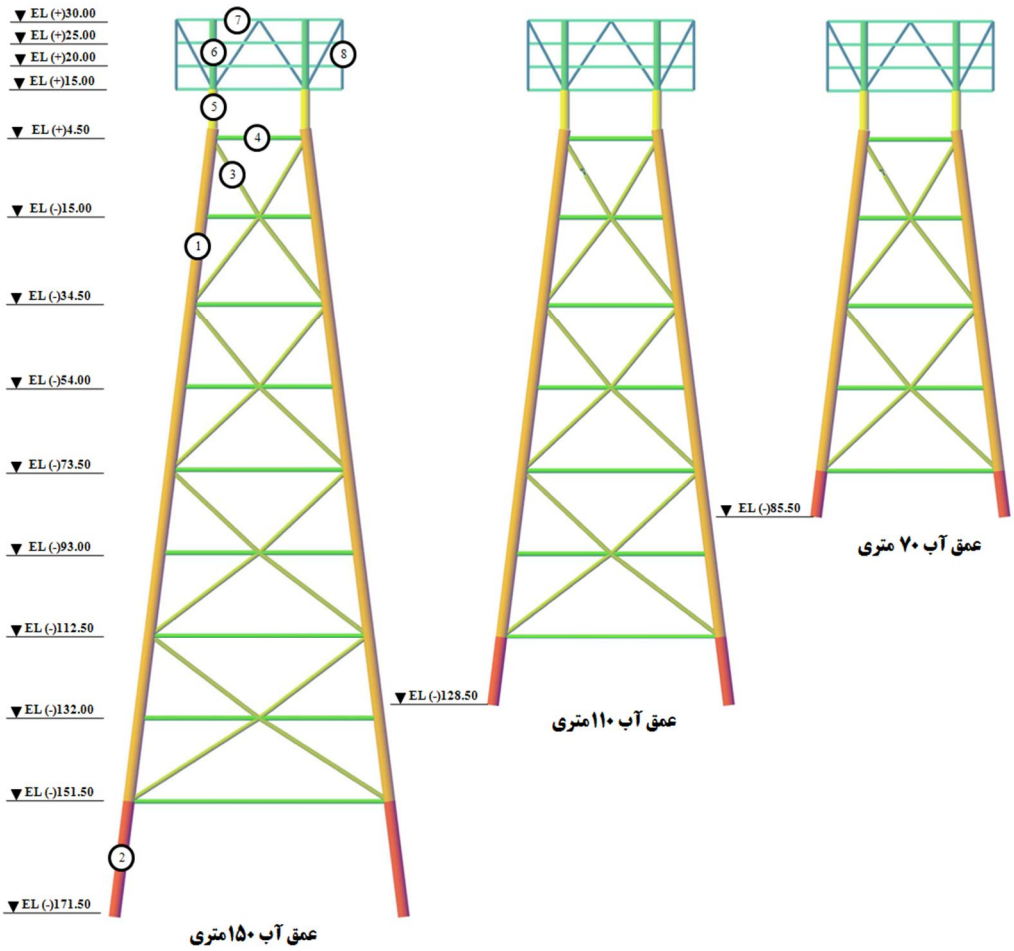
$$F_{D\ (Total)} = F_{D(In-Plane)} + F_{D\ (Out\ of\ Plane)}$$

$$C_{D\ eq}LD = C_D LD + D_P L_P C_D \qquad (۱)$$

$$F_{I\ (Total)} = F_{I(In-Plane)} + F_{I\ (Out\ of\ Plane)}$$

$$C_{m\ eq}LD^2 = C_m LD^2 + D_P^2 L_P C_m \qquad (۲)$$

در این روابط C_m و C_D ضریب اینرسی ودراگ در سازه ابتدایی سه بعدی می باشد، L_p طول کل المانهای موجود در وجوه دیگر زیر سازه سکو (به استثنای وجه دو بعدی مورد نظر) ، D_p قطر المانهای موجود در وجوه دیگر زیر سازه سکو ، L طول کل المان ها در قاب دو بعدی مورد نظر و D قطر المان در قاب دو بعدی مورد نظر می باشد. در جدول ۲ شرایط محیطی وپارامترهای مربوط به سه گروه سکوها ارائه شده است. لازم ذکر می باشد که دراین تحقیق از اثر جریان دریایی به علت آنکه تاثیرات دینامیکی برروی نیروها وتنش ها دراعضا واتصالات سازه در تحلیل تاریخچه زمانی ایجاد نمی نماید، صرفنظر شده است.



شکل ۲- سکوهای بررسی شده در عمق های مختلف ۷۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ متری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]

جدول ۱- مشخصات هندسی سکوهای موجود در عمق های ۷۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ متری

عمق	نوع المان	شماره مقطع (شکل ۲)	تراز	قطر [C*m*]	ضخامت [C*m*]	طول [C*m*]	ضریب کمانش K
۷۰ متری	المان پایه	۱	درتمامی ترازها	۱۵۰	۱/۰۰	۱۸/۱۴	۱
	شمع	۲		۱۵۰	۱/۰۰	۱۲/۰۰	۱
	مهاربند قطری	۳		۳۰	۰/۸	۱۹-۲۶	۰/۸
۱۱۰ متری	المان پایه	۱	درتمامی ترازها	۲۰۰	۱/۵۰	۱۸/۱۴	۱
	شمع	۲		۲۰۰	۱/۵۰	۱۶/۰۰	۱
	مهاربند قطری	۳		۵۰	۱/۰۰	۱۹-۲۹	۰/۸
۱۵۰ متری	المان پایه	۱	درتمامی ترازها	۲۵۰	۲/۵۰	۱۸/۱۴	۱
	شمع	۲		۲۵۰	۲/۵۰	۲۰/۰۰	۱
	مهاربند قطری	۳	درتمامی ترازها	۶۰	۱/۱۰	۱۹-۳۳	۰/۸
در تمامی عمق ها	مهاربند افقی	۴	درتمامی ترازها	۳۰	۰/۸	۲۰-۳۸	۰/۸
در تمامی عمق ها	قطعه انتقالی	۵		۱۲۰	۱/۰۰	۸/۵۰	۱
در تمامی عمق ها	ستون اصلی عرشه	۶	درتمامی ترازها	۱۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۱
در تمامی عمق ها	تیر عرشه	۷	درتمامی ترازها	IPE60		۳۶	۰/۷
در تمامی عمق ها	خرپای عرشه	۸	درتمامی ترازها	۳۰	۰/۶	۱۸	۱

جدول ۲- شرایط محیطی وپارامتر های در نظر گرفته شده برای سه گروه سکوها

انواع سکوهای مورد مطالعه از دیدگاه عمق آب	ارتفاع موج (متر)	پریود موج (ثانیه)	ضریب دراگ معادل $C_{D\,eq}$	ضریب اینرسی معادل $C_{M\,eq}$	تئوری موج
سکوی در عمق ۷۰ متری شرایط امواج طوفانی در خلیج فارس	۱۲	۱۰	۱/۵	۲/۰	استوکس مرتبه ۵
سکوی در عمق ۱۱۰ متری شرایط امواج طوفانی در خلیج مکزیک مطابق با API RP 2A	۱۸	۱۲	۱/۷	۲/۲	استوکس مرتبه ۵
سکوی در عمق ۱۵۰ متری شرایط امواج طوفانی در خلیج مکزیک مطابق با API RP 2A	۲۴	۱۵	۱/۹	۲/۵	استوکس مرتبه ۵

۳-مدل سازی عددی

در این تحقیق بمنظور شبیه سازی مدل عددی از دو نرم افزار SACS و ANSYS استفاده شده است، که ابتدا با استفاده از زیر برنامه Collapse از نرم افزار SACS [۱۸] و انجام تحلیل بارافزون، رفتار غیرخطی سکوها مورد ارزیابی قرار گرفته و همچنین مقاطع سکوها در رفتار غیرخطی بدست آورده شده است، سپس با استفاده از نرم افزارالمان محدود ANSYS [۱۹]، تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی برای سکوهای در عمق های مختلف و در دو حالت مجهز به سیستم مهاربندی آلیاژحافظه دار شکلی وبدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت امواج طوفانی انجام شده است. برای مدل سازی المان ها در ناحیه تغییر شکلهای غیرخطی، فولاد ST37-2 با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش دوخطی مستقل از جرم و نیرو از مجموعه مصالح نرم افزار ANSYS انتخاب شده است. بمنظور بررسی رفتار الاستوپلاستیک ایدآل برای مصالح فولادی تنش های تسلیم کششی وفشاری مساوی با تنش تسلیم فولاد در نظر گرفته شده است. همچنین کرنش سختی ۲ درصد وماکزیمم شکل پذیری ۱۵ تا ۲۰ درصد برای محدوده غیرخطی تغییر شکل بررسی گردیده است (شکل ۳). برای شبیه سازی کامل جرم سازه سه بعدی در تحلیل دینامیکی، جرم ترازهای مختلف سکو با استفاده از ایجاد جرم متمرکز در گره های سکو اعمال شده است. ضریب میرایی ۵ درصد درنظر گرفته شده است. ستونها ومهاربندها برای تسلیم وکمانش در حین امواج طوفانی فرض شده اند، از اینرو هر دو غیرخطی مصالح و هندسی در مدل سازه لحاظ گردیده است. در این تحقیق از اثراندرکنش شمع وخاک صرفنظر شده است و از روش طول گیرداری معادل (۸ برابر قطر المان پایه برای خاک های سست[۲۰]) برای مدل سازی شمع ها استفاده شده است.

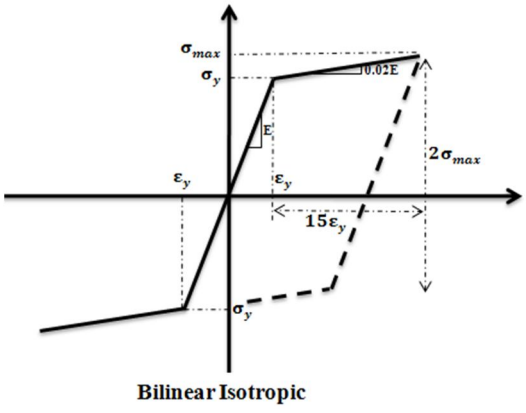
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]

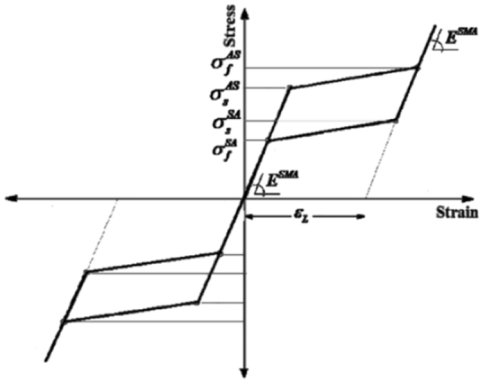
۴-مدل سازی وطراحی سیستم مهاربندی SMA فوق ارتجاعی

در یک دهه گذشته مدل سازی تحلیلی رفتار SMA توجه بسیاری را بخود جلب نموده است و چندین پژوهشگر مدل های عددی سازگار با رفتار SMA را پیشنهاد کرده اند. در این مقاله برای شبیه سازی رفتار فوق ارتجاعی SMA از مدل عددی سازگار پیشنهادی Auricchio و همکاران[۲۱]، که یک مدل یک محوره می باشد، استفاده شده است. پارامترهای کمی برای ساختن این مدل مورد نیاز می باشد، که همانطور که در شکل ۴ بصورت شماتیک نشان داده شده است، عبارتست از: تنش شروع فاز آستنیت به مارتنزیت (σ_s^{AS})، تنش پایان فاز آستنیت به مارتنزیت (σ_f^{AS})، تنش شروع فاز مارتنزیت به آستنیت (σ_s^{SA})، تنش پایان فاز مارتنزیت به آستنیت (σ_f^{SA})، مدول ارتجاعی برای فازهای آستنیت ومارتنزیت (E^{SMA}) و طول کرنش مسطح فوق ارتجاعی (ε_L). مزایای عمده این مدل توانمندی در شبیه سازی رفتار فوق ارتجاعی وسادگی در اجرای آن، سادگی در گرفتن پارامترهای مورد نیاز مصالح (پارامترهای استخراج شده ازآزمونهای تک محوره برای میله و مفتول) و قابلیت شبیه سازی الگوهای انتقالی جزئی (حلقه های جزئی) وکامل (حلقه های کامل انتقالی از آستنیتی کامل به مارتنزیتی کامل) درهر دوتنش فشاری وکششی می باشد. این مدل یک بعدی می تواند رفتار SMA را تحت بارگذاری های اختیاری نظیر زلزله و امواج تصادفی (با ارتفاع وپریود متفاوت) شبیه سازی کند. معادلات معرفی شده توسط Auricchio ، براساس پدیده رژیم تغییر شکلهای کوچک و بافرض ارتباط میان تنش ها وکرنش های یکسری منحنی های خطی، که فرم آنها بوسیله میزان انتقال فاز تعیین شده است، پایه گذاری شده است. نقاط ضعف این مدل پیشنهادی داشتن مدول ارتجاعی یکسان در فاز آستنیت و مارتنزیت و مستقل بودن آن از سرعت بارگذاری، دما، تعداد سیکلهای بارگذاری می باشد که تاثیر هر یک از این عوامل در رفتار SMA توسط چندین محقق مطالعه شده است[۲۲،۳]. اما با وجود این نواقص، این مدل می تواند با تقریب خوبی رفتار فوق ارتجاعی نایتینول را شبیه سازی نماید، که برای صحت این موضوع و اطمینان از رفتار مناسب المانهای SMA در سازه، قابلیت این مدل تحلیلی در شبیه سازی رفتاری مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. برای این منظور ابتدا یک آزمون عددی با الگوی تنش یک محوره افزایشی روی یک المان ساده SMA فوق ارتجاعی در نرم افزار ANSYS مطابق شکل ۵ انجام شده وسپس پاسخ این مدل فوق ارتجاعی با داده های آزمایشگاهی بدست آمده توسط Fuggaza [۲۳]، که برروی یک نوع تجاری مفتول نایتینول فوق ارتجاعی به قطر ۱ میلیمتر تولیدشده توسط CNR-IENI (Lecco Italy)[۲۳] انجام گردیده، همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می گردد، مقایسه شده است. از بازبینی منحنی های تنش-کرنش آزمایشگاهی، مشخصات مکانیکی SMA مطابق با جدول ۳ برای شبیه سازی عددی استخراج شده است. نتایج این مقایسه حاکی از توانایی بالای این مدل در بازتولید منحنی تنش-کرنش برای SMA می باشد.

برای طراحی سیستم مهاربندی پیشنهادی SMA در مدل تحلیلی مطابق شکل ۷ المان های SMA در داخل هر مهاربند مدل شده است. برای کاهش طول SMA این المان توسط میله های صلب به ابتدا وانتهای مهاربند متصل شده است. با استفاده از چندین فرآیند تکرار و سعی و خطا در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، سطح مقطع این المان طوری درنظر گرفته شده است که تحت اثر بارگذاری موج اعمالی SMA دارای رفتار غیرخطی بوده و حلقه پسماند کامل ایجاد گردد (در محدوده مقاطعی از ۶*۶ تا ۸*۸ سانتیمتر در سکوهای با عمق های مختلف و درتراز های مختلف) و طول المان بصورتی است که تغییر شکل کلی سازه از حد مجاز ۱÷۲۰۰ تجاوز ننماید (در محدوده طول های ۴۰ سانتیمتر برای سکوی در عمق ۷۰ متری، ۵۰ سانتیمتر برای سکوی در عمق ۱۱۰ متری و ۶۰ سانتیمتربرای سکوی در عمق ۱۵۰ متری).



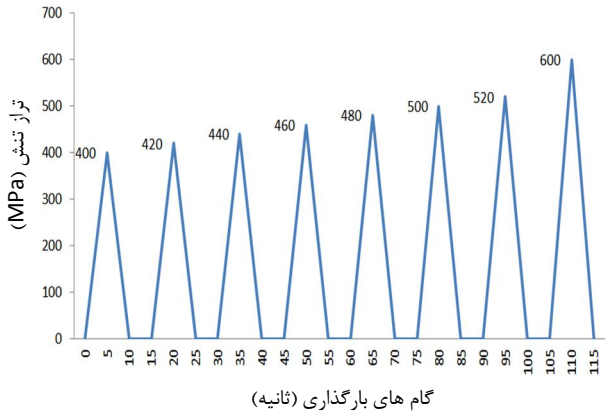
شکل ۳- منحنی تنش– کرنش فولاد در نظر گرفته شده



شکل ۴- پارامتر های مورد نیاز برای معرفی مدل SMA [۲۳]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]



شکل ۵- الگوی تنش اعمالی به المان SMA

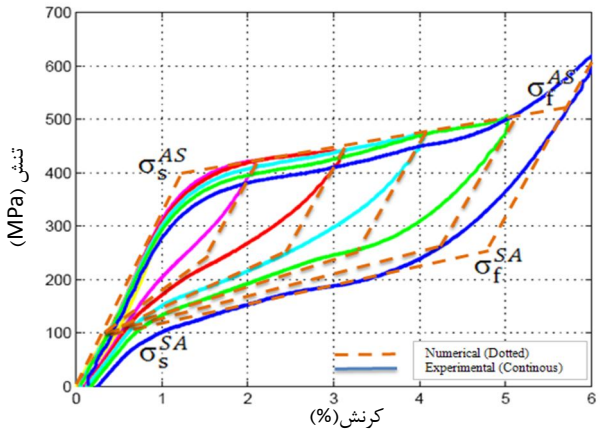
جدول ۳: مشخصات مکانیکی SMA استخراج شده از نتایج آزمایشگاهی Fuggaza [۲۳].

کمیت	مقدار
$E^{SMA}[GPa]$	۳۰
$\sigma_s^{AS}[MPa]$	۴۰۰
$\sigma_f^{AS}[MPa]$	۵۲۰
$\sigma_s^{SA}[MPa]$	۲۵۰
$\sigma_f^{SA}[MPa]$	۱۰۰
$\varepsilon_L[\%]$	۴

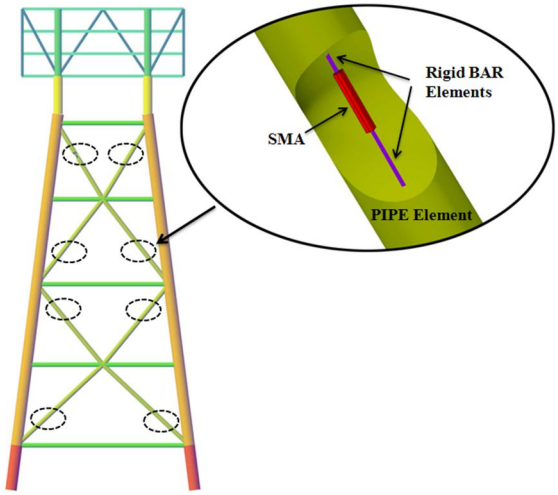
۵-تحلیل بارافزون ونتایج

همانطور که پیشتر ذکر گردید، تحلیل غیرخطی بارافزون با بار فزاینده موج بمنظور ارزیابی رفتار غیرخطی و عملکرد سازه انجام شده است. این تحلیل با استفاده از زیر برنامه Collapse از نرم افزار SACS انجام شده است. در این تحلیل سکوهای مختلف که دارای پیکربندی مهاربند یکسان نوع K می باشند در عمق های آب ۷۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ متری با یکدیگر مقایسه شده اند.

درتحلیل غیر خطی بارافزون ظرفیت نهایی اعضا و اتصالات وبطور کلی پایداری سکوی بدون تجهیز به المان SMA در معرض بارگذاری افزایشی موج ارزیابی میگردد. در این تحلیل تراز بارگذاری موج گام به گام افزایش می یابد بطوری که در ابتدا رفتارسازه بصورت ارتجاعی ودارای تغییر شکل های الاستیک بوده و سپس با افزایش بار، سازه به محدوده پلاستیک وارد شده و تغییر شکلهای پسماند درسازه ایجاد میگردد، که دراین حالت میزان تنش موضعی در اعضا و ظرفیت اتصالات زیر سازه سکو از حد مجاز متجاوز گردیده وکمانش موضعی[۶] در اعضا واتصالات لوله ای حادث شود. با تداوم روند افزایش بار، مفاصل پلاستیک دائمی[۷] در اتصالات شکل گرفته ودرنهایت شکست وفروپاشی کلی[۸] در سازه اتفاق می افتد. خروجی این تحلیل شامل اشکال و نمودارهایی می باشد که بیانگر رفتار غیر خطی و شکست سازه



شکل ۶- حلقه پسماند تنش-کرنش برای الگوی تنش در شکل ۵ (خط چین)
و مقایسه نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی [۲۳] (خطوط ممتد)



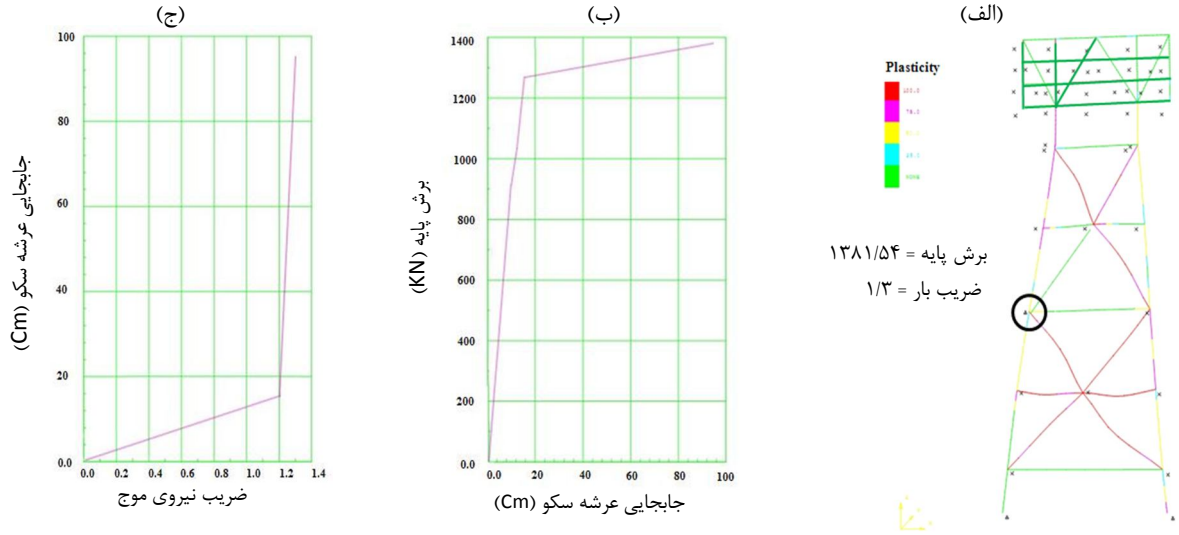
شکل ۷- طراحی سیستم مهاربندی پیشنهادی SMA

می باشد. اشکال ۸، ۹، ۱۰ الف، میزان ودرصد غیرخطی یا پلاستیسیته، با تقسیم بندی در رنگ، برش پایه و نقطه شکست سازه مشخص شده است. اشکال ۸، ۹، ۱۰ ب، تغییرات برش پایه نسبت به جابجایی عرشه سکو، که منحنی بارافزون نامیده می شود، را نشان میدهد، با استفاده از آنها جابجایی حد ارتجاعی، حد شکست و ضریب شکل پذیری، که نسبت جابجایی حد شکست به حد ارتجاعی می باشد، حاصل میگردد. همچنین در اشکال ۸، ۹، ۱۰ ج، تغییرات جابجایی عرشه سکو نسبت به ضریب نیروی موج اعمالی به سازه[۹] می باشد، که با استفاده از آن می توان میزان مقاومت باقیمانده سازه در برابر بار وارده را ارزیابی نمود. علاوه براین در این تحلیل با سعی وخطای صورت گرفته، مقاطع المان پایه و مهاربندهای زیر سازه سکو، بطوری که سازه تحت امواج طوفانی در نظر گرفته شده رفتار غیرخطی از خود نشان دهد،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]

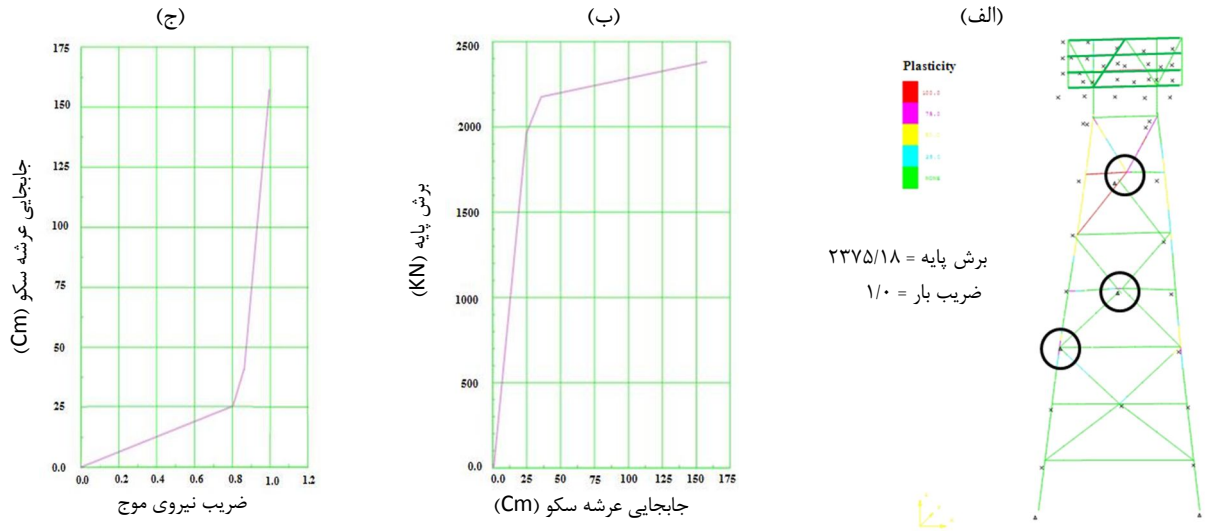
مطابق با جدول ۱ برای سکوها درعمق های مختلف بدست می آید.

مهمترین نتیجه گیری که از تحلیل بارافزون سکوها می توان داشت، این واقعیت می باشد که فروپاشی در سکوهای دریایی ناشی از شکست در اتصال المان اصلی به مهاربند یا اتصال جوینت کن می باشد. همانطور که در اشکال ۸، ۹، ۱۰ و جدول ۴ ملاحظه می گردد، پریود ارتعاشی سازه با افزایش عمق افزایش می یابد که ناشی از افزایش جرم و کاهش سختی سازه می باشد. با مقایسه ضریب نیروی موج برای سکوها باعمق های مختلف مشاهده میگردد که سکوی موجود در عمق ۷۰ متری با مقاطع فرض شده در برابر امواج طوفانی اعمالی رفتار خطی داشته وبا افزایش نیروی موج به میزان ۳۰٪ رفتار غیرخطی وشکست درسازه رخ می دهد وبیانگر این واقعیت می باشد که در سکوی موجود در عمق ۷۰ متری بدلیل سختی بسیار بالای سازه ورفتار خطی سازه تحت امواج طوفانی، استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی تاثیری در رفتار سازه نخواهد داشت. در مورد جابجایی حد ارتجاعی وشکست مشاهده می گردد که با افزایش عمق، میزان این جابجایی ها بیشتر شده بطوری که ضریب شکل پذیری سازه در تمامی عمق ها تقریباً یکسان وبرابر ۶/۴ می باشد.



شکل ۸- نتایج تحلیل بار افزون تحت گام های افزایشی بار موج برای سکوی واقع در عمق ۷۰ متری

(الف): درصد غیر خطی و نقطه شکست سازه در گام نهایی، (ب): منحنی بارافزون سازه، (ج): نمودار جابجایی عرشه نسبت به ضریب نیروی موج

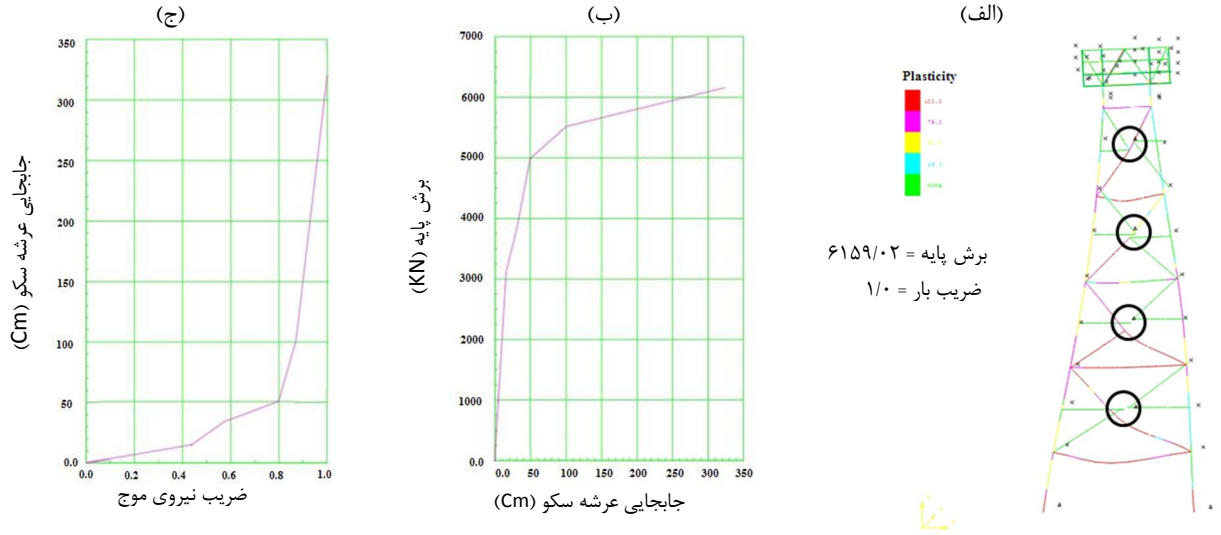


شکل ۹- نتایج تحلیل بار افزون تحت گام های افزایشی بار موج برای سکوی واقع در عمق ۱۱۰ متری

(الف): درصد غیر خطی و نقطه شکست سازه در گام نهایی، (ب): منحنی بارافزون سازه، (ج): نمودار جابجایی عرشه نسبت به ضریب نیروی موج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]



شکل ۱۰- نتایج تحلیل بار افزون تحت گام های افزایشی بار موج برای سکوی واقع در عمق ۱۵۰ متری
(الف): درصد غیر خطی و نقطه شکست سازه در گام نهایی، (ب): منحنی بارافزون سازه، (ج): نمودار جابجایی عرشه نسبت به ضریب نیروی موج

جدول۴- نتایج تحلیل بارافزون برای عمق های مختلف

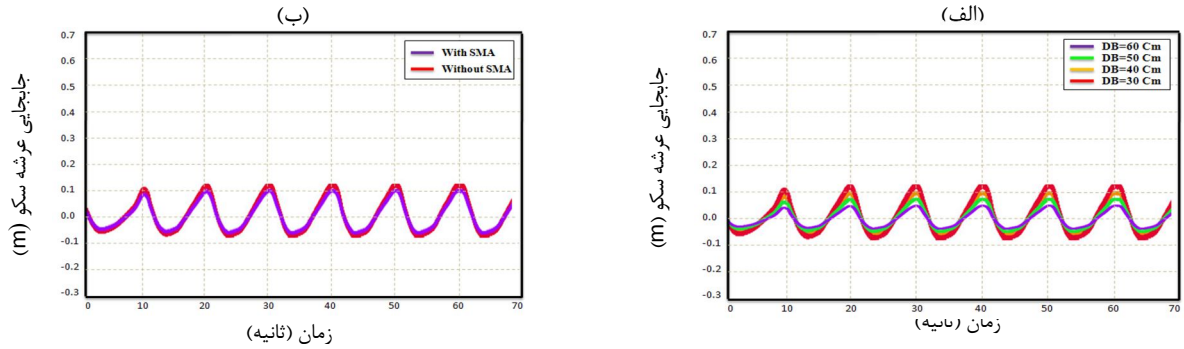
نوع سکو از دیدگاه عمق آب	پریود طبیعی	ضریب نیروی موج	برش پایه (KN)	جابجایی عرشه حد ارتجاعی Δ_{Yield} (Cm)	جابجایی عرشه حد شکست $\Delta_{Failure}$ (Cm)	ضریب شکل R
پیکر بندی مهاربندی نوع K - عمق ۷۰ متری	۲/۶۷	۱/۳	۱۳۸۱/۵۴	۱۵	۹۵	۶/۳۰
پیکر بندی مهاربندی نوع K - عمق ۱۱۰ متری	۳/۶۵	۱/۰	۲۳۷۵/۱۸	۲۵	۱۵۵	۶/۲۰
پیکر بندی مهاربندی نوع K - عمق ۱۵۰ متری	۴/۵۶	۱/۰	۶۱۵۹/۰۲	۵۰	۳۲۰	۶/۴۰

۶-تحلیل تاریخچه زمانی ونتایج

پس از مطالعه و بررسی رفتارغیرخطی انواع سکوهای بدون مهاربند SMA درعمق های مختلف، در این بخش به بررسی رفتار این سکو ها تحت امواج طوفانی و مقایسه نتایج هر یک از سکوها با سکوهای نظیر مجهز به آلیاژ حافظه دارشکلی پرداخته می شود. این تحلیل با استفاده از نرم افزار ANSYS و با مشخصات المانها و بارگذاری موج و سایر پیش فرضهای گفته شده انجام شده است. در این بخش تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی سکوها درمعرض امواج طوفانی بادرنظر گرفتن عوامل مختلفی از قبیل تغییرات در قطر مهاربندهای زیر سازه سکوی بدون تجهیز به آلیاژ حافظه دار شکلی به منظور ارزیابی عملکرد رفتار غیرخطی آن دراشکال ۱۱، ۱۲، ۱۳- الف به ترتیب برای سکوهای در عمق ۷۰، ۱۱۰ و۱۵۰ متری نشان داده شده است، همچنین جابجایی عرشه سکوی مجهز به مهاربند های آلیاژحافظه دار شکلی و مقایسه آن با سکوی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی در اشکال ۱۱، ۱۲، ۱۳- ب به ترتیب برای سکوهای در عمق ۷۰، ۱۱۰ و۱۵۰ متری نشان داده شده است، نمودار برش پایه نسبت به جابجایی عرشه برای سکوی موجود درعمق ۱۵۰ متری مجهز به مهاربند های آلیاژحافظه دار شکلی و مقایسه آن با سکوی نظیر بدون آلیاژ حافظه دار شکلی بمنظور ارزیابی میزان انرژی پلاستیک جذب شده توسط سازه در شکل ۱۴ مشخص شده است، تنش در اتصالات واعضا سازه درسکوی موجود در عمق ۱۵۰ متری بدون تجهیز به مهاربندهای SMA و مقایسه آن با سازه مجهز به مهاربندهای SMA نیز همچنانکه در شکل های ۱۵ و۱۶ ملاحظه می گردد، بررسی شده است.

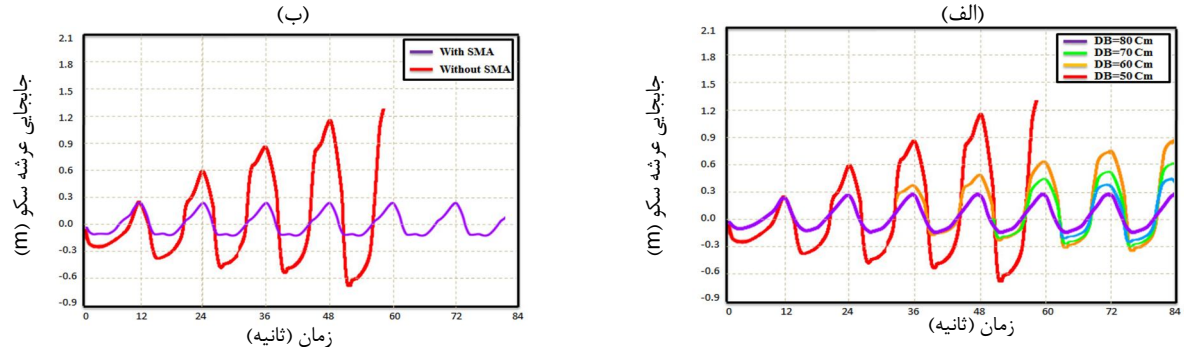
همانطور که درشکل ۱۱- الف ملاحظه می گردد با کمتر شدن قطر مهاربندهای زیر سازه سکوی موجود در عمق ۷۰ متری، سازه همچنان رفتار خطی از خود نشان می دهد، که این موضوع از نتایج تحلیل بارافزون اثبات گردید. درشکل ۱۱-ب می بینیم که با تجهیز سازه به مهاربند SMA هیچ تاثیری در رفتار سازه ایجاد نمی شود وتنها به میزان ناچیزی تغییر شکل سازه کاهش می یابد که دلیل آن سختی بالای ورفتار خطی سازه می باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]



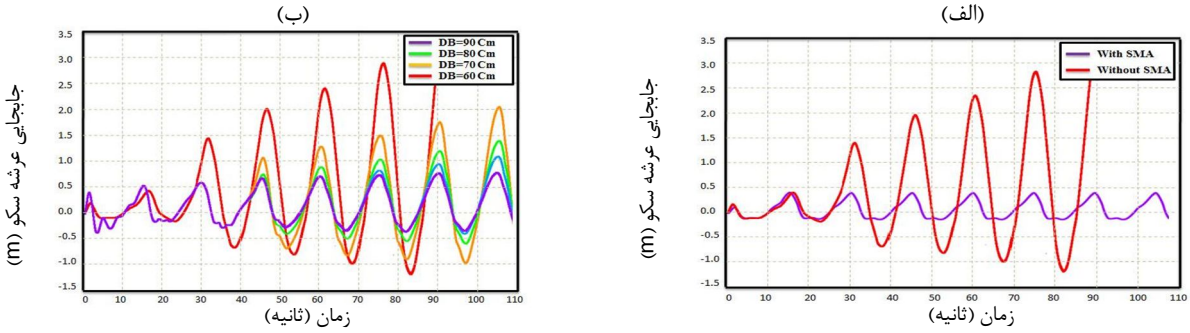
شکل ۱۱- تحلیل تاریخچه زمانی تحت امواج طوفانی برای سکوی واقع در عمق ۷۰ متری

(الف): تاثیر قطر مهاربند در پاسخ سکوی بدون تجهیز به مهاربند SMA، (ب): مقایسه پاسخ سکوی مجهز به SMA و بدون SMA



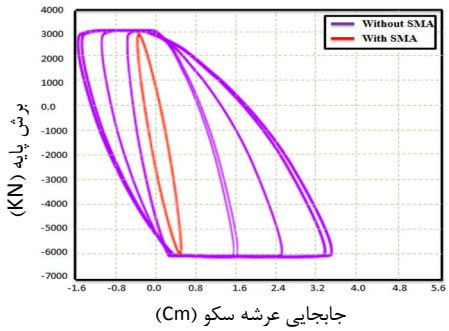
شکل ۱۲- تحلیل تاریخچه زمانی تحت امواج طوفانی برای سکوی واقع در عمق ۱۱۰ متری

(الف): تاثیر قطر مهاربند در پاسخ سکوی بدون تجهیز به مهاربند SMA، (ب): مقایسه پاسخ سکوی مجهز به SMA و بدون SMA

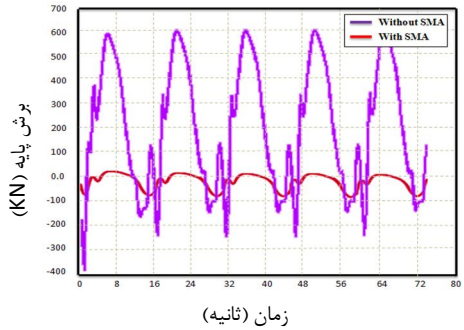


شکل ۱۳- تحلیل تاریخچه زمانی تحت امواج طوفانی برای سکوی واقع در عمق ۱۵۰ متری

(الف): تاثیر قطر مهاربند در پاسخ سکوی بدون تجهیز به مهاربند SMA، (ب): مقایسه پاسخ سکوی مجهز به SMA و بدون SMA



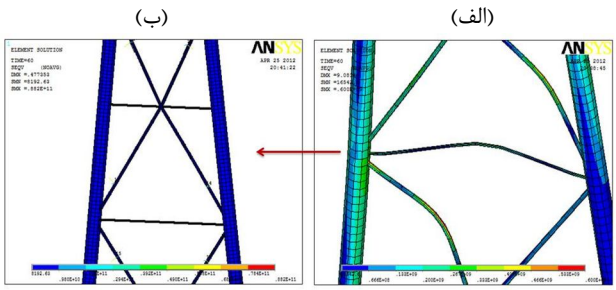
شکل ۱۴- جذب انرژی در سکوی مجهز به SMA وبدون SMA در سکوی واقع شده در عمق ۱۵۰ متری



شکل ۱۵- تنش در اتصالات سازه مجهز به SMA و بدون SMA در سکوی واقع شده در عمق ۱۵۰ متری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]



شکل ۱۶- مقایسه تنش در اتصالات سازه در سکوی واقع شده در عمق ۱۵۰ متری (الف): بدون تجهیز به SMA، (ب): با تجهیز به SMA

برای سکوهای در عمق ۱۱۰ و۱۵۰ متری، همانطور که در اشکال ۱۲و۱۳-الف ملاحظه می گردد با کمتر شدن قطر مهاربندها، به تدریج میزان جابجایی عرشه تحت شرایط موج طوفانی افزایش می یابد. یکی از دلایل آن می تواند رسیدن اعضا و اتصالات سازه به محدوده غیرخطی و پدیدآمدن تغییر شکل های پسماند در اثر سیکل های بارگذاری و باربرداری نیروی موج باشد. همچنین برای سکوهای در عمق ۱۱۰ و۱۵۰ متری، با مقایسه سکوی با مهاربندی SMA و بدون SMA در اشکال ۱۲و۱۳-ب، مشاهده میگردد که، درسازه دارای SMA جابجایی عرشه به میزان قابل توجهی کاهش یافته و سازه رفتار غیرخطی از خود نشان نمی دهد که این بدلیل استهلاک انرژی موج وقابلیت بازگردانندگی SMA هایی است که در مهاربندهای سکو اجرا شده است. مهاربندهای SMA ترازهای زیرسازه سکو را به حالت نسبتا صلب تبدیل نموده وباجذب واستهلاک بخش عمده ای از انرژی موج باعث کم شدن انرژی در اعضا اصلی سازه وکاهش رفتار غیر خطی آنها می گردد. کاهش جابجایی عرشه درسکوی واقع در عمق ۱۱۰ متری حدود ۸۰ درصد و در سکوی ۱۵۰ متری ۸۵ درصد می باشد.

با مقایسه میزان جذب انرژی در سکوهای دارای سیستم مهاربندی SMA و بدون SMA در شکل۱۴ ملاحظه می گردد که، در سازه بدون SMA انرژی موج توسط تغییر شکلهای پلاستیک در مهاربندها واتصالات سازه جذب می شود. هرچقدر سازه بیشتر وارد محدوده غیرخطی شود مقدار انرژی جذب شده توسط تغییر شکلهای پلاستیک بیشتر می شود وتعداد بیشتری از اعضا به حد پلاستیک می رسند. میزان این جذب انرژی در زمان پریود موج به مقدار حداکثر خود می رسد واین بدلیل ورود سازه به محل تغییر شکلهای خیلی بزرگ می باشد. درحالیکه در سازه مجهز به SMA انرژی ورودی به سازه کاهش یافته وتغییر شکلها نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد.

در نمودارهای ۱۵و ۱۶ مشاهده میگردد که با تجهیز سازه به مهاربندهای SMA تنش دراتصالات واعضا سازه بیش از ۸۵ درصد کاهش داشته که مطابق آنچه ذکر گردید دلیل آن جذب واستهلاک انرژی موج توسط SMA و کم شدن انرژی در اعضا اصلی سازه می باشد.

۷-نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در بررسی کلی سکوهای دریایی مجهز به SMA اینطور استنباط می گردد استفاده SMA در سازه های دریایی از اهمیت زیادی برخوردار می باشد و می تواند دربهبود رفتار این سازه ها تحت بارگذاری دینامیکی چرخه ای امواج مفید واقع شود. SMA ها از یک طرف با داشتن قابلیت استهلاک انرژی مناسب تلاشهای وارد بر اعضای اصلی سازه مانند اتصالات واعضای مهاربند والمان پایه را کاهش داده واز این طریق سازه از آسیب های عمده ناشی از امواج طوفانی درامان خواهد بود و از طرف دیگر با داشتن خاصیت بازگردانندگی مانع بوجودآمدن کرنش های پس ماند در اتصالات واعضا سازه می گردد. این دو خاصیت باعث می شود که در بارگذاری محیطی چرخه ای امواج درسازه های دریایی ویا حتی پس از زلزله مانع بوجودآمدن کرنش های پس ماند گردد و سازه به وضعیت اولیه خود بازگردد ومجدداً مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج بررسی پارامتر هندسی عمق آب دراین تحقیق نشان داد که این پارامتر در رفتارسکوها بسیار موثر می باشد. هرچه عمق سکو بیشتر می شود تاثیر مهاربند SMA دربهبود رفتار سازه بیشتر می گردد بطوری که در سکوی موجود در عمق ۷۰ متری با تجهیز زیر سازه سکو به مهاربند SMA هیچ تاثیری در رفتار سازه ایجاد نمی شود، در حالیکه در عمق های ۱۱۰ و۱۵۰ متری مهاربندهای SMA ، باجذب واستهلاک بخش عمده ای از انرژی موج باعث کاهش انرژی در اعضا اصلی سازه و تغییر شکلهای زیرسازه سکو شده و به سازه نسبتا صلب ودارای رفتار خطی تبدیل می گردد.

همچنین در بررسی ومقایسه تنش در اعضا واتصالات سکو مشاهده می گردد، در سازه مجهز به مهاربند SMA، تنش در اتصالات سکو بشدت کاهش داشته که درنتیجه جذب واستهلاک انرژی موج توسط SMA رخ می دهد. این کاهش تنش در اتصالات و اعضا سکو آثار ونتایج مثبتی را در پی خواهد داشت که عبارتست از کوچکتر وبهینه شدن مقاطع مورد استفاده در سکو، کاهش خرابی ناشی از پدیده خستگی و افزایش عمر مفید سکو می باشد.

در پایان دانستن این نکته ضروری می باشد که به این تحقیق، که برای اولین بار به بررسی استفاده از این مصالح در سکوهای دریایی پرداخته شده است، به دیده یک کار تحقیقاتی (و نه مهندسی) نگریسته شده است و هدف از آن، ایجاد فضایی برای نگاه متفاوت به سکوهای دریایی و گسترش تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی مفصل آتی و همچنین گسترش سیستم های جدید درساخت سکوهای دریایی بوده است. اگر چه در این مقاله از برخی بحث های مهندسی و الزامات آیین نامه ای (انواع بارگذاری ها و حالات

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]

دیگر طراحی) صرفنظر شده است، سیستم کنونی شاید درآینده بتواند بعنوان جایگزینی برای سیستم های فعلی که دربرگیرنده الزامات و ضرایب ایمنی بسیار بالا با صرف مصالح فراوان می باشد با الزامات مخصوص به خود مورد توجه محققان و شرکت های فعال در زمینه صنایع نفت وگاز قرار گیرد.

کلید واژگان

1- Jacket Platform
2-Joint Can
3-Shape Memory Alloy
4-Super-Elasticity
5-Analysis Pushover
6-Local Buckling
7-Permanent Plastic Hinge
8-Collapse
9-Load Factor

۸ - مراجع

1- Skallerud, B., and Amdahl, J., (2002), *Nonlinear analysis of offshore structures,* Research Studies Press LTD (RSP).

2- Dolce, M., Cardone, D. and Marnetto, R., (2000), *Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys*, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.29, p. 945-968.

3- DesRoches, R., McCormick, J. and Delemont, M., (2004), *Cyclic properties of shape memory alloy wires and bars*, Journal of Structural Engineering, Vol.130, p. 38-46.

4- Song, G., Ma, N., Li, H.N., (2006), *Applications of shape memory alloys in civil structures*, Engineering Structures Journal, Vol.28, p. 1266-74.

5- Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M., Ruth, J., (2006), *Applications of shape memory alloys in civil engineering structures-overview, limits and new ideas*, Materials and Structures Journal, Vol.38, p. 578-92.

6- Bruno, S., Valente, C., (2002), *Comparative response analysis of conventional and innovative seismic protection strategies*, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, p.1067-1092.

7- Alam, M.S., Yousef, M.A., (2007), *Utilizing shape memory alloy to enhance the performance and Safety of Civil Infrastructure: A Review*, Canadian journal of Civil Engineering, Vol.34, p. 1075-86.

8- Ozbulut, OE., Hurlebaus, S., (2010), *Evaluation of the performance of a sliding-type base isolation system with a NiTi shape memory alloy device considering temperature effects*, Engineering Structures Journal, Vol.32, p. 238-49.

9- Sharabash, AM., Andrawes, BO., (2009), *Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges*, Engineering Structures Journal, Vol.31, p. 607-16.

10- Yang, W., DesRoches, R., Leon, RT., (2010), *Design and analysis of braced frames with shape memory alloy and energy-absorbing hybrid devices*, Engineering Structures Journal, Vol.32, p. 498-507.

11- McCormick, J., DesRoches, R., Fugazza, D., Auricchio, F., (2007), *Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces*, Structural Engineering Journal, Vol. 133(6), p. 862-70.

12- Motahari, SA., Ghassemieh, M., Abolmaali, SA., (2007), *Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, p. 1570-9.

13- Pan, Q., C.h.o, C., (2007), *The investigation of a shape memory alloy micro-damper for MEMS applications*, Sensors Journal, Vol. 7, p. 1887-1900.

14- Ocel, J., DesRoches, R., Leon, RT., Hess, WG., Krumme, R, Hayes, JR., et al., (2004), *Steel beam-column connections using shape memory alloys*, Journal of the Structural Engineering, Vol. 130(5), p. 732-40.

15- Alam, M.S., Youssef, M.A., Nehdi, M., (2008), *Analytical prediction of the seismic behavior of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements*, Journal of Engineering Structures, Vol. 30, p. 3399–3411.

16- Cardone, D., Dolce, M., Ponzo, FC., (2004), *Experimental behavior of R/C frames retrofitted with dissipating and re-centering braces*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, p. 361-96.

17- *API RP 2A-WSD*, 21st Edition, Supplement 3, (2007).

18- *SACS Version 5.2-Collaps Module, Release 6 User's Manual, (2005)*.

19- *ANSYS Version 13.0 User's Manual, (2011)*.

20- Hallam, M. G., (1978), *DYNAMIC OF MARINE STRUCTURES: Method of calculating the dynamic response of fixed structures subject to wave and current action-* (Report - CIRIA Underwater Engineering Group).

21- Anricchio, F., (1995), *SHAPE MEMORY ALLOYS: micromechanics, macromodeling and numerical simulations,* PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley.

22- Dolce, M. and Cardone, D., (2001), *Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications 1. Martensite and austenite bars subjected to torsion*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.43, p. 2631-2656.

23- Fugazza, D., (2005), *Experimental Investigation on the Cyclic Properties of Superelastic NiTi Shape-Memory Alloy Wires and Bars*, PHD thesis, Italy, University of Pavia.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.6.0]