

Numerical and experimental study to identify the location and severity of damage at the pier using the improved modal strain energy method-Case study: Pars Asaluyeh LPG export pier

Seyed Reza Samaei¹, Madjid Ghodsi Hassanabad^{*2}, Mohammad Asadian ghahfarrokhi³, Mohammad Javad Ketabdari⁴

1- PhD student, Department of Civil Engineering, Qeshm International Trading Center- Science and Research Branch, Islamic Azad University, Qeshm. Iran.

2- Head of Marine industries department, faculty of engineering, Science and research branch, Islamic Azad University.

3- Assistant professor, Department of Marine Technology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Department of Marine Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Deck-pile pier structural system is one of the most common types of pier construction systems. Corrosion, ship collisions and huge storms cause general and extreme damages, especially in the deck and the splash zone of the wharf. If the location and severity of the damage is known at the early stages of the damage, they can be repaired as soon as possible. One of the available methods for identifying damage in structures, which is based on the changes in the dynamic properties of the structure, is the modal strain energy method. In recent years, modifications have been made to the original version of this method, the Stubbs index, one of which is the consideration of natural frequencies in locating the damage, known as the improved modal strain energy method. In the present study, using both Stubbs index method and improved method, an experimental and numerical study is performed to identify the location and determine the severity of damage in the members located in the deck and splash zone in a real LPG export deck- pile pier (pier number Fourteen) located in the port of Pars-Assaluyeh, in Persian Gulf. The results showed that the improved method has higher accuracy in locating the damage than the Stubbs index method. Also, single and multiple damage, with low and high severity, were predicted with appropriate accuracy by this method.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 September 2020

Revise Date: 30 September 2020

Accept Date: 29 December 2020

Keywords:

Deck-pile pier

Splash Zone

Damage detection

Improved modal strain energy (IMSE)

Stubbs index

Numerical and experimental study

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.246425.2225>

*Corresponding author: Madjid Ghodsi Hassanabad

Email address: m.ghodsi@srbiau.ac.ir

مطالعه عددی و آزمایشگاهی شناسایی محل و شدت آسیب در اسکله های شمع و عرشه به روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته-مطالعه موردی: اسکله صادرات LPG پارس عسلویه

سید رضا سمائی^۱، مجید قدسی حسن آباد^{۲*}، محمد اسدیان قهفرخی^۳، محمد جواد کتابداری^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، گرایش سواحل، بندر و سازه های دریایی، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

۲- استادیار، گروه صنایع دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه صنایع دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

سیستم سازه ای شمع و عرشه یکی از متداولترین انواع سیستمهای سازه ای برای ساخت اسکله است. خوردگی، برخورد شناورها و طوفانهای بزرگ دریایی، سبب می شود که اسکله های شمع عرشه، به ویژه عرشه و ناحیه پاشش آب در معرض آسیبهای شدید و کلی قرار گیرند. چنانچه محل و شدت این آسیبها در مراحل اولیه رشد آسیب تعیین گردد، امکان ترمیم هر چه سریعتر آنها فراهم می گردد. یکی از روشهای موجود برای شناسایی آسیب در سازه ها که مبتنی بر استفاده از تغییر در خصوصیات دینامیکی سازه است، روش انرژی کرنشی مودال است. در سالیان اخیر، اصلاحاتی بر نسخه اولیه این روش یعنی شاخص استابنس صورت گرفته که یکی از آنها، در نظر گرفتن فرکانسهای طبیعی در تعیین مکان آسیب است که به روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته معروف می باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از هر دو روش شاخص استابنس و روش بهبود یافته، به صورت عددی و آزمایشگاهی به شناسایی مکان و تعیین شدت آسیب در اعضای واقع در عرشه و ناحیه پاشش آب در یک نمونه واقعی اسکله شمع و عرشه صادرات LPG (اسکله شماره چهارده) واقع در بندر پارس-عسلویه خلیج فارس پرداخته شده است. نتایج نشان داد که روش بهبود یافته دقت بالاتری در مکان یابی آسیب نسبت به روش شاخص استابنس دارد. همچنین، آسیبهای تکی و چندگانه، با شدت کم و زیاد، توسط این روش با دقت مناسبی پیش بینی گردید.

کلمات کلیدی: اسکله شمع و عرشه، ناحیه پاشش آب، شناسایی آسیب، انرژی کرنشی مودال بهبود یافته، شاخص استابنس، مطالعه عددی و آزمایشگاهی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.246425.2225	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.246425.2225	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۰۹	۱۳۹۹/۱۰/۰۹	۱۳۹۹/۰۷/۰۹	۱۳۹۹/۰۶/۱۲
				*نویسنده مسئول:		
				مجدید قدسی حسن آباد		
				m.ghodsi@srbiau.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

اسکله‌ها از جمله مهمترین سازه‌های بندری هستند که عمدتاً برای پهلوگیری شناورها و کشتیها، باراندازی و بارگیری انواع کالاها و محصولات و همینطور سوار و پیاده شدن مسافین احداث شده و از نظر شکل سازه به انواع اسکله شمع و عرشه، سپری و وزنی تقسیم بندی می‌شوند. هر یک از انواع اسکله با توجه به شرایط محل اجرا از قبیل خوردگی و کاهش عمر مفید در محیط دریایی، دشواریهای کاری و نحوه کوبش، تطویل شمع و هزینه‌های اجرایی دارای مزایا و معایبی هستند. سیستم سازه‌ای شمع و عرشه یکی از شناخته شده ترین و متداولترین انواع سیستمهای سازه‌ای برای ساخت اسکله در سراسر دنیا بوده و عموماً در مناطقی احداث می‌شود که بستر سست بوده و لایه‌های با ظرفیت باربری بالا در اعماق نسبتاً زیادی از بستر دریا قرار گرفته باشند. اسکله‌های شمع و عرشه فولادی به خصوص در محیط مرطوب ساحلی خلیج فارس که دارای یون کلرید فراوانی است، در مقابل خوردگی و فرسایش بسیار آسیب پذیر هستند [1]. این اسکله‌ها در تعداد زیادی از بنادر ایران خصوصاً در خلیج فارس و دریای عمان از جمله بنادر کیش، گناوه، قشم، بندر عباس و بندر ماهشهر و چندین بندر دیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نحوه انتقال بار در اسکله‌های شمع و عرشه به این صورت است که نیروهای قائم از دال عرشه به تیرهایی که سر شمعها را به یکدیگر متصل می‌کنند منتقل می‌شود و از این تیرها به شمعها و سپس به بستر دریا انتقال می‌یابد. نیروهای افقی نیز توسط شمع‌های مایل به زمین منتقل شده و بخشی از آن نیز توسط ضربه گیر جذب می‌شود. در حین طوفانهای بزرگ دریایی که به ساحل برخورد می‌کنند، اسکله‌ها در معرض آسیبهای شدید و تخریب کلی قرار می‌گیرند. اصل اساسی در نگهداری سازه‌های ساحلی همانند هر نوع سازه دیگر، اطمینان از عملکرد ایمن در طول عمر سازه است. وقوع آسیبهای ایجاد شده در اسکله‌ها در خلال طوفانهای ساحلی در بخشهای مختلف دنیا، اهمیت بررسی این پدیده را به وضوح نشان می‌دهد [2, 3]. یکی از اصلی ترین قسمتهای سازه که در مواقع طوفانی تبدیل به بحرانی ترین عضو این سازه‌ها می‌شود، نیروهای وارد بر عرشه یا روسازه است.

اسکله‌های واقع در سواحل شمالی خلیج فارس، تاثیر چشمگیری در اقتصاد ایران دارند. یکی از مهمترین این اسکله‌ها، اسکله صادرات LPG عسلویه است. طبق آمار سال ۲۰۱۸، ایران سالیانه ۱۰ میلیون تن LPG تولید می‌کند که خروجی آن به تدریج با عملیاتی شدن فازهای ۲۲ تا ۲۴ پارس جنوبی افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۸، ایران ۱۷٪ تجارت LPG در خاورمیانه را در اختیار داشته است. LPG دارای کاربردهای مختلفی از جمله تجاری، صنعتی، حمل و نقل و خانگی است که آن را به عنوان یک سوخت دوستدار محیط زیست در سطح جهانی جذاب کرده است. بر اساس گزارش آژانس بین المللی در اکتبر ۲۰۱۸، بازار تقاضا برای LPG و اتان ۵،۱۲٪ از کل تقاضای روزانه فرآورده‌های نفتی بوده و در نیمه سال ۲۰۱۸ بالغ بر ۱۲،۴ میلیون بشکه در روز بوده است. رشد تقاضای LPG تقریباً چهار برابر کل تقاضا برای فرآورده‌های نفتی است. این سبب شده است که در سالیان اخیر، مطالعاتی در مورد اجزای مختلف چرخه حمل و نقل این سوخت صورت گیرد.

افزایش عمر سازه‌ها در کنار طبیعت غیر قابل پیش بینی بارها و احتمال طراحی ضعیف اعضا، سبب ناکارآمد شدن سازه‌ها می‌شود. سازه‌های دریایی و از جمله اسکله‌های شمع و عرشه در طول عمر مفید خود دائماً در معرض نیروهای محیطی قرار دارند. اسکله‌ها به دلیل قرارگیری در محیط دریا، در طول مدت وقوع طوفانهای دریایی تحت اثر نیروهای بزرگی از جمله نیروهای موج، باد و جریان قرار می‌گیرند. اسکله شمع و عرشه به طور مداوم در محیط خشن دریا، در معرض آسیبهای پیش رونده و تجمعی قرار دارد که می‌تواند به دلیل گسیختگی مواد تشکیل دهنده، سبب شکست‌های سازه‌ای شود. آغاز این گسیختگی‌ها با ترکهای موضعی و نهفته در سازه توام است که به طور پیوسته افزایش یافته و می‌تواند به عنوان یک تهدید جدی برای رفتار سازه محسوب شود. این تهدیدات در مورد اسکله‌های شمع و عرشه صادرات میعانات نفتی و گازی که در تماس مستقیم با شناورهای حامل LPG بوده و در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد اهمیت بیشتری دارد [4]. تاثیر ترک بر ساختار سازه به صورت تغییرات موضعی سختی است که با تغییر در فرکانس طبیعی و شکل مود ارتعاشی سازه قابل مشاهده بوده و تحلیل این تغییرات شناسایی ترک را ممکن می‌سازد. به این منظور، تحقیقاتی بر روی

روشهای پایش سلامت سازه ها صورت گرفته است. کنترل و بازرسی اسکله ها جهت اطمینان از ایمنی سازه ای و افزایش عمر بهره برداری آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. جهت شناسایی میزان و محل آسیب سازه اسکله ها و همچنین جلوگیری از گسترش خرابی و آسیب بیشتر، تشخیص به موقع آسیب در سازه در طول مدت بهره برداری و عمر مفید آنها حائز اهمیت بوده و تعیین محل دقیق آسیب وارده و همچنین شدت آن و اقدامات لازم و بموقع جهت ترمیم عضو سازه ای آسیب دیده امری مهم، ضروری و از لحاظ اقتصادی نسبت به تعویض اعضای آسیب دیده امری بهینه می باشد، چرا که از وقوع خطرات بعدی و در نهایت از فروپاشی جزء و یا کل سازه جلوگیری بعمل آید. تاکنون روشهای مختلفی برای شناسایی مکان و شدت آسیب در سازه ها ابداع شده است، ولی گاهی به علت پایین بودن دقت این روشها در شناسایی محل و یا شدت آسیب، وقت گیر بودن و یا قابل اجرا نبودن و مخرب بودن آنها در شرایط عملیاتی و اجرایی، خرابی ناگهانی عضو و سازه به صورت کلی و وقوع حوادث جبران ناپذیری به وجود آمده است.

یکی از روشهای مورد استفاده در پایش سلامت سازه ها، بازرسی چشمی است که منجر به حصول اطلاعات مهمی در مورد سلامت سازه می گردد. با این وجود، زمان بر بودن و پر هزینه بودن بازرسی چشمی در کنار عدم امکان بازرسی کل سازه به دلیل در دسترس نبودن برخی مقاطع آن و در نتیجه عدم امکان تشخیص خرابی در این اعضا و نیز مشکل بودن تشخیص خرابی های داخلی و منشا آنها منجر به استفاده از روشهای شناسایی غیر مخرب آسیب برای افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود شده است. یکی از این روشها، روش شناسایی آسیب مبتنی بر ارتعاش است که به عنوان یک راه حل تکمیلی در کنار بازرسی های چشمی به کار گرفته می شود [5, 6]. در تمامی روشهای شناسایی آسیب مبتنی بر ارتعاش، خصوصیات مودال سازه (فرکانس، شکل مودها و میرایی مودال) تابعی از خصوصیات فیزیکی آن است. بنابراین می توان با استفاده از تغییر در پاسخ استاتیکی یا دینامیکی سازه ها، تغییر در خصوصیات فیزیکی آنها و در نتیجه نقایص سازه ای را در مراحل اولیه رشد آسیب شناسایی نمود. تشخیص زود هنگام این خرابیها سبب کاهش هزینه های نگهداری و جلوگیری از شکست سازه می گردد.

به طور کلی، شناسایی آسیب در سازه ها در چهار سطح به صورت زیر طبقه بندی می شود:

سطح اول: تشخیص وجود و یا عدم وجود خرابی در سازه ها

سطح دوم: سطح اول+ تعیین موقعیت هندسی خرابی

سطح سوم: سطح دوم+ کمیت شدت خرابی

سطح چهارم: سطح سوم+ تخمین عمر باقی مانده [7]

روش های تشخیص و نمایان سازی آسیب و ترک با توجه به اهمیت آن در شکست سازه، موضوع تحقیقات گسترده ای بوده است. به عنوان یکی از اولین تلاشها برای شناسایی آسیب در سازه ها، کاولی و آدامز (۱۹۷۹) فرکانس های طبیعی سازه را به عنوان شاخصی برای شناسایی محل آسیب ارائه نمودند [8]. شهریور و بوکامپ (۱۹۸۶) با استفاده از اطلاعات ارتعاشی به شناسایی آسیب در یک سکوی دریایی هشت پایه فولادی پرداختند. آنها تاثیرات مهاربندی های مورب را بر فرکانس و شکل مود ارتعاش قابل اندازه گیری در عرشه سکو مورد بررسی قرار دادند. اثرات تغییر در جرم عرشه، تغییر در جرم سکو و خروج از مرکزیت جرم عرشه بر پارامترهای انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که آنها متفاوت از اثرات آسیب هستند [9]. هانسن و واندرپلاتس (۱۹۹۰) به منظور شناسایی آسیب در سازه از فرکانس و شکل مودهای سازه استفاده نموده و محل و شدت خرابی را با دقت بسیار خوبی تعیین نمودند [10]. دوئیلینگ و همکاران (۱۹۹۳) روشی را بر اساس انرژی کرنشی مودال برای انتخاب یک زیرمجموعه از مودهای ارتعاشی سازه های مشخص و تشخیص آسیب سازه ای در آنها ارائه کردند [11]. کیم و استابس (۱۹۹۵) الگوریتمی برای مکان یابی و تعیین میزان آسیب در سکوهایی جکت ارائه

نموده، به تعیین مکان و تخمین شدت آسیب با استفاده از تغییرات در شکل مودها پرداخته و سپس روشی برای تعیین پارامترهای مودال سازه فرمول بندی نمودند [12]. کیم و استابز (۱۹۹۵ و ۱۹۹۶) استفاده از روش شاخص خرابی مبتنی بر انرژی کرنشی مودال را برای سازه های تیر مانند پیشنهاد داده، کارایی این روش را بر روی یک پل فولادی بررسی نموده و به درستی موفق به شناسایی مکان آسیب شدند [13, 14]. سالوو (۱۹۹۷) مطالعه ای در مورد استفاده از فرکانس های طبیعی برای شناسایی آسیب انجام داده و نتیجه گرفت که تنها استفاده از فرکانسهای طبیعی برای شناسایی موضعی آسیب کافی نیست، هر چند در شناسایی کلی آسیب میتواند موثر باشد [15]. فرار و جریگو (۱۹۹۸) پنج روش از روشهای شناسایی آسیب مبتنی بر مشخصات ارتعاشی، شامل روش شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال، روش انحنای شکل مودی، روش تغییر در انعطاف پذیری، روش تغییر در انحنای بار یکنواخت سطحی و روش تغییر در سختی را بر روی یک پل فولادی بررسی نموده و نتیجه گرفتند که روش شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روشهای مورد استفاده است [16]. کیم و استابز (۲۰۰۲) شاخص خرابی بهبود یافته ای را به منظور بهبود دقت شناسایی آسیب در سازه های با اعضای زیاد توسعه داده و کارایی آن را بر روی یک تیر دو دهانه آزمایش نمودند [17]. چنگ و همکاران (۲۰۰۲) روشی را برای شناسایی مکان آسیب های یک المان صفحه ای با استفاده از شکل مودهای بدست آمده از روش رایلی ریتز ارائه کرده و با مدلسازی عددی و آزمایش تجربی نشان دادند که این روش قابلیت بالایی برای شناسایی آسیب های تکی و چندگانه دارد [18]. یانگ و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال و با استفاده از دو شاخص ضریب تغییر انرژی کرنشی مودال (CMSECR) و نیز ضریب خمشی انرژی کرنشی مودال (FMSECR)، آسیب را در سازه های دریایی بر اساس بارهای محیطی مورد بررسی قرار دادند [19]. جی و لویی (۲۰۰۵) روشی را بر پایه مدل اجزا محدود و با استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه که شامل فرکانس ها و اشکال مودی بود، به منظور شناسایی و تعیین شدت آسیب ارائه دادند [20]. شی و همکاران (۲۰۰۹) روش شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال را برای تشخیص آسیب در تیر و صفحه مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که می توان از این روش در شناسایی آسیب در شاهتیر و عرشه پلها که رفتاری نظیر تیر و صفحه دارند استفاده نمود [21]. هو و وو (۲۰۰۹) شاخص آسیب را برای شناسایی آسیب در ورقها بر اساس روش انرژی کرنشی مودال توسعه دادند [22]. سیدپور (۲۰۱۲) یک روش دو مرحله ای را برای شناسایی دقیق موقعیت و شدت آسیب های چند گانه در سیستمهای سازه ای ارائه نمود که در مرحله اول، یک شاخص انرژی کرنشی مودال برای مکانیابی دقیق آسیب در یک سازه مورد استفاده قرار گرفته و در مرحله دوم، شدت آسیب با استفاده از الگوریتم بهینه سازی particle swarm optimization با استفاده از نتایج مرحله اول تعیین گردید [23]. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تفاضل انرژی کرنشی مودال سازه در حالت سالم و آسیب دیده، برای شناسایی مکان آسیب در پایه های توربین بادی، شاخصی بر مبنای انرژی کرنشی مودال ارائه نمودند که نسبت به سایر روشهای سنتی انرژی کرنشی حساسیت بالاتری داشت [24]. سید پور و یزدان پناه (۲۰۱۴) روشی را برای شناسایی مکان آسیب بر مبنای انرژی کرنشی ناشی از بارهای استاتیکی وارد بر سازه، در دو حالت سالم و آسیب دیده ارائه نمودند. آنها کارایی این روش را بر روی یک خرپای سیزده عضوی، یک قاب سه دهانه ای و یک خرپای فضایی بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که با اعمال بارگذاری در یک گره از خرپاهای مورد بررسی و محاسبه جابه جایی گره ها به راحتی شناسایی مکان آسیب امکان پذیر است [25]. ونگ و همکاران (۲۰۱۴) از روش انرژی کرنشی مودال برای مکان یابی آسیب بر روی یک سکوی دور از ساحل استفاده نموده و نتیجه گرفتند که از میان تمامی روش های تشخیص خرابی تا کنون، روش های مبتنی بر انرژی کرنشی مودال برای تشخیص محل آسیب نتیجه بخش تر از سایر روش ها است [26]. چاندراسکاران و کومار (۲۰۱۹) ضمن نامناسب دانستن مدلسازی آسیب با کاهش سختی برای مدل کردن ویژگیهای پیچیده غیر خطی آسیب مواد بتنی، از یک مدل concrete damage plasticity constitutive به منظور توسعه مدل عددی یک تیر عرشه اسکله پهلوگیری در نرم افزار آباکوس استفاده نمودند [27].

مطالعات فوق الذکر، نشان دهنده دقت و توانایی بالای روش انرژی کرنشی مودال در شناسایی آسیب در سازه های دریایی است. در این تحقیق به شناسایی مکان و تعیین میزان آسیب بصورت عددی و آزمایشگاهی در یک نمونه واقعی سازه اسکله شمع و عرشه روش

انرژی کرنشی مودال پرداخته خواهد شد. با توجه به اینکه عرشه از اجزای مهم اسکله شمع و عرشه بوده و همچنین ناحیه پاشش آب به دلیل تر و خشک شدن پیاپی بیشتر از سایر اعضای سازه در معرض آسیبهای ناشی از خوردگی قرار دارد، تمرکز این تحقیق بر روی اعضای واقع در عرشه و ناحیه پاشش آب خواهد بود. اهمیت این موضوع از آنجاست که یکی از اصلی ترین مشکلات اسکله ها، نیروهای وارد بر عرشه اسکله در مواقع طوفانی است. تمرکز بیشتر جرم اسکله در عرشه صورت می گیرد و عرشه، نقش مهمی در مقاومت سازه در برابر نیروهای وارده دارد [28]. با توجه به مطالب ذکر شده و همچنین اهمیت بالای اسکله های LPG از لحاظ عملکردی و حساسیت های بالای این سازه در زمان بهره برداری و از طرفی دقت بالا، جامع بودن و کارآمدی روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته در این تحقیق بصورت آزمایشگاهی و عددی با استفاده از این روش به شناسایی میزان و محل آسیب سازه در اسکله LPG پروژه بندر پتروشیمی پارس عسلویه که تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته می پردازیم.

۲- انرژی کرنشی مودال

وقتی یک جسم الاستیک تحت اثر نیرو قرار می گیرد، در آن تنش ایجاد شده، جسم تغییر شکل داده و وضعیت نقاط مختلف آن نسبت به حالت اولیه تغییر پیدا میکند. تغییر نقطه اثر نیروهای اعمالی به جسم سبب می شود که در هنگام اعمال آنها مقداری کار انجام شود. کار مزبور که همراه با تغییر شکل جسم در وضعیت تنش است، باعث ذخیره مقداری انرژی به صورت انرژی ارتجاعی در جسم می شود که به آن انرژی کرنشی گفته می شود. انرژی کرنشی مودال وضعیتی است که نیرویی به سازه وارد نمی شود و سازه در حالت ارتعاش آزاد قرار دارد که با تحلیل دینامیکی و حل روابط ارائه شده می توان انرژی کرنشی مودال هر عضو را بدست آورد. خرابی در یک سازه معمولاً سبب کاهش سختی سازه می شود و بر ماتریس جرم سازه تاثیری نمی گذارد.

در یک سازه خطی بدون آسیب، با NE المان و N گره، i امین سختی مودال سازه از رابطه زیر بدست می آید [17]

$$K_i = \Phi_i^T C \Phi_i \quad (1)$$

که در این رابطه، Φ_i i امین بردار شکل مود سازه و C ماتریس سختی سازه است. مشارکت i امین عضو در i امین سختی مودال از رابطه زیر بدست خواهد آمد

$$K_{ij} = \Phi_i^T C_j \Phi_i \quad (2)$$

در این رابطه، K_{ij} i امین سختی مودال المان j ام و C_j مشارکت المان j ام در ماتریس سختی سازه است.

نسبت حساسیت المان j ام در مود i ام سازه سالم از رابطه ۳ محاسبه خواهد شد.

$$F_{ij} = \frac{K_{ij}}{K_i} \quad (3)$$

همین نسبت برای سازه در حالت آسیب برابر است با:

$$F_{ij}^* = \frac{K_{ij}^*}{K_i^*} \quad (4)$$

که K_i^* و K_{ij}^* به ترتیب زیر تعریف می شوند:

$$K_i^* = \Phi_i^{*T} C^* \Phi_i^* \quad (5)$$

$$K_{ij}^* = \Phi_i^{*T} C_j^* \Phi_i^* \quad (6)$$

در روابط فوق، علامت * نشانگر حالت آسیب دیده است.

با تقسیم معادله ۴ بر معادله ۳ داریم :

$$\frac{F_{ij}^*}{F_{ij}} = \frac{K_{ij}^* K_i}{K_{ij} K_i^*} \quad (7)$$

مقدار C_j و C_j^* از رابطه زیر بدست می آید:

$$C_j = E_j C_{j0} \quad (8)$$

$$C_j^* = E_j^* C_{j0} \quad (9)$$

که E_j^* و E_j به ترتیب برابر مشخصات سختی مصالح (مدول الاستیسیته) از امین المان در حالت سالم و آسیب دیده است و C_{j0} تنها مشخصات هندسی را در بر می گیرد.

اگر میزان آسیب در سازه کوچک باشد معادله ۷ برابر واحد خواهد شد در نتیجه :

$$F_{ij} = F_{ij}^* \quad (10)$$

با جایگزین کردن معادلات ۱، ۲، ۵، ۶ و ۸ در معادله ۷ و بازنویسی معادله خواهیم داشت

$$\beta_{ij} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{[\Phi_i^{*T} C_{j0} \Phi_i^*] K_i}{[\Phi_i^T C_{j0} \Phi_i] K_i^*} \quad (11)$$

در این رابطه، β_{ji} شاخص شناسایی آسیب برای از امین عضو و i امین مود است. چنانچه $K_i^* \approx \Phi_i^{*T} C \Phi_i^*$ تنظیم شود، تمام کمیتها در سمت راست (از جمله Φ_i^* و Φ_i) را می توان تعیین نموده و یا از پارامترهای مودال به دست آمده از اندازه گیریهای تجربی و هندسه سازه (C_{j0}) تقریب زد. بر طبق معادله فوق، آسیب در از امین عضو و i امین شکل مود در صورتی تعیین می شود که $\beta_{jj} > 1$ باشد. هر چند، چنانچه از امین عضو در یا در نزدیکی گره i امین شکل مود باشد، مخرج معادله فوق به سمت صفر می رود ($F_{ij} \ll 1$) و یک پیش بینی غلط از نتایج آسیب رخ می دهد. این محدودیت را به شیوه زیر می توان برطرف کرد. در صورتی که به طرفین رابطه (۱۰) مقدار واحدی را اضافه کنیم خواهیم داشت:

$$1 = \frac{F_{ij}^* + 1}{F_{ij} + 1} \quad (12)$$

با جایگذاری معادلات (۳) و (۴) در معادله (۱۲) داریم:

$$1 = \frac{(K_{ij}^* + K_i^*) K_i}{(K_{ij} + K_i) K_i^*} \quad (13)$$

در صورت جایگذاری معادلات ۱، ۲، ۵ و ۶ در معادله بالا برای تمام مود های موجود (NM) و تمام المان ها (NE) به یک شاخص آسیب برای هر المان می رسیم که خواهیم داشت:

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^{*T} C_{jo} \Phi_i^* + \sum_{i=1}^{NE} \Phi_i^{*T} C_{ko} \Phi_i^*) K_i}{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^T C_{jo} \Phi_i + \sum_{i=1}^{NE} \Phi_i^T C_{ko} \Phi_i) K_i} \quad (14)$$

لازم به ذکر است که بدلیل مشخص نبودن ماتریس سختی سازه و المان ها در حالت آسیب دیده، از ماتریس سختی سازه سالم برای هر دو حالت استفاده می شود. بنابر این در رابطه بالا نیز از ماتریس سختی سازه سالم استفاده شده است.

بعد از بدست آوردن β_j برای هر المان با استفاده از رابطه زیر شاخص آسیب نرمالیزه می گردد [17].

$$Z_j = \frac{\beta_j - \bar{\beta}}{\sigma_\beta} \quad (15)$$

۳- روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته

در تعیین شاخص خرابی Stubbs تنها از شکل مودها استفاده می شود و فرکانسهای طبیعی در تعیین محل آسیب در نظر گرفته نمی شوند. با این وجود، تحقیقات قبلی نشان داده است که فرکانسهای مودال را می توان با دقت بسیار بیشتری نسبت به شکل مودها تعیین نمود. لی و همکاران (۲۰۱۶) به منظور بهبود روش Stubbs، از اطلاعات فرکانس در تعیین شاخص آسیب استفاده نمودند [29]. تحلیل ویژه^۱ برای سازه های سالم و آسیب دیده را می توان به صورت زیر نوشت

$$K \phi_i = \omega_i^2 M \phi_i \quad (16)$$

$$K^* \phi_i^* = \omega_i^{*2} M^* \phi_i^* \quad (17)$$

در این رابطه، M و M^* ماتریسهای جرم سیستم در حالت های سالم و آسیب دیده بوده و ω_i و ω_i^* ، آیین فرکانس مودال در حالات سالم و آسیب دیده هستند.

به طور کلی، آسیبهای موضعی سبب کاهش سختی سازه می شوند تا کاهش جرم آن. بنابراین، جرم سازه پیش و پس از آسیب باید یکسان باشد، به طوری که $M = M^*$ است. با ضرب رابطه ۱۶ در ϕ_i^T و معادله ۱۷ در ϕ_i^{*T} خواهیم داشت

$$S_i = \phi_i^T K \phi_i = \omega_i^2 \phi_i^T M \phi_i \quad (18)$$

$$S_i^* = \phi_i^{*T} K^* \phi_i^* = \omega_i^{*2} \phi_i^{*T} M^* \phi_i^* \quad (19)$$

چنانچه مواد تشکیل دهنده سازه یکسان باشند، تمام اعضا سازه سالم مدول الاستیسیته یکسانی هستند، به طوری که $E_j = E$, for $j = 1, 2, \dots, ne$. با ضرب رابطه ۱۴ در E خواهیم داشت

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^m (\phi_i^{*T} K_j \phi_i^* + \phi_i^T K_j \phi_i) S_i}{\sum_{i=1}^m (\phi_i^T K_j \phi_i + \phi_i^{*T} K_j \phi_i^*) S_i^*} \quad (20)$$

¹ Eigen Analysis

وقتی خرابی به صورت موضعی رخ می دهد، رابطه تقریبی $S_i^* = \phi_i^{*T} K^* \phi_i^* \approx \phi_i^{*T} K \phi_i^*$ برقرار است. بنابراین شاخص خرابی Stubbs را می توان به صورت زیر تخمین زد

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^m (\phi_i^{*T} K_j \phi_i^* + S_i^*) S_i}{\sum_{i=1}^m (\phi_i^T K_j \phi_i + S_i) S_i^*} \quad (21)$$

با جایگزینی معادلات ۱۸ و ۱۹ در رابطه ۲۱ داریم

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^m (\phi_i^{*T} K_j \phi_i^* + \omega_i^{*2} \phi_i^{*T} M \phi_i^*) \omega_i^2 \phi_i^T M \phi_i}{\sum_{i=1}^m (\phi_i^T K_j \phi_i + \omega_i^2 \phi_i^T M \phi_i) \omega_i^{*2} \phi_i^{*T} M \phi_i^*} \quad (22)$$

مجددا می توان با استفاده از رابطه ۱۷، شاخص فوق را نرمالیزه نمود.

۳-۱- تخمین شدت آسیب

شدت آسیب را می توان مستقیماً از معادله ۱۱ تعیین نمود. چنانچه نسبت تغییرات در سختی عضو α_j را با α_j نشان دهیم به طوری که $\alpha_j \geq -1$ باشد، طبق تعریف داریم

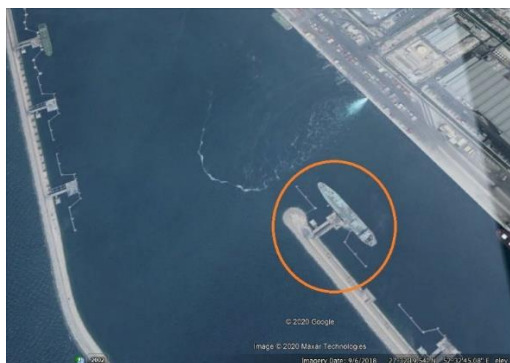
$$E_j^* = E_j (1 + \alpha_j) \quad (23)$$

با ترکیب معادلات ۱۱ و ۱۶ خواهیم داشت

$$\alpha_j = \frac{[\phi_i^T C_{jo} \phi_i] K_i^*}{[\phi_i^{*T} C_{jo} \phi_i^*] K_i} - 1 \quad (24)$$

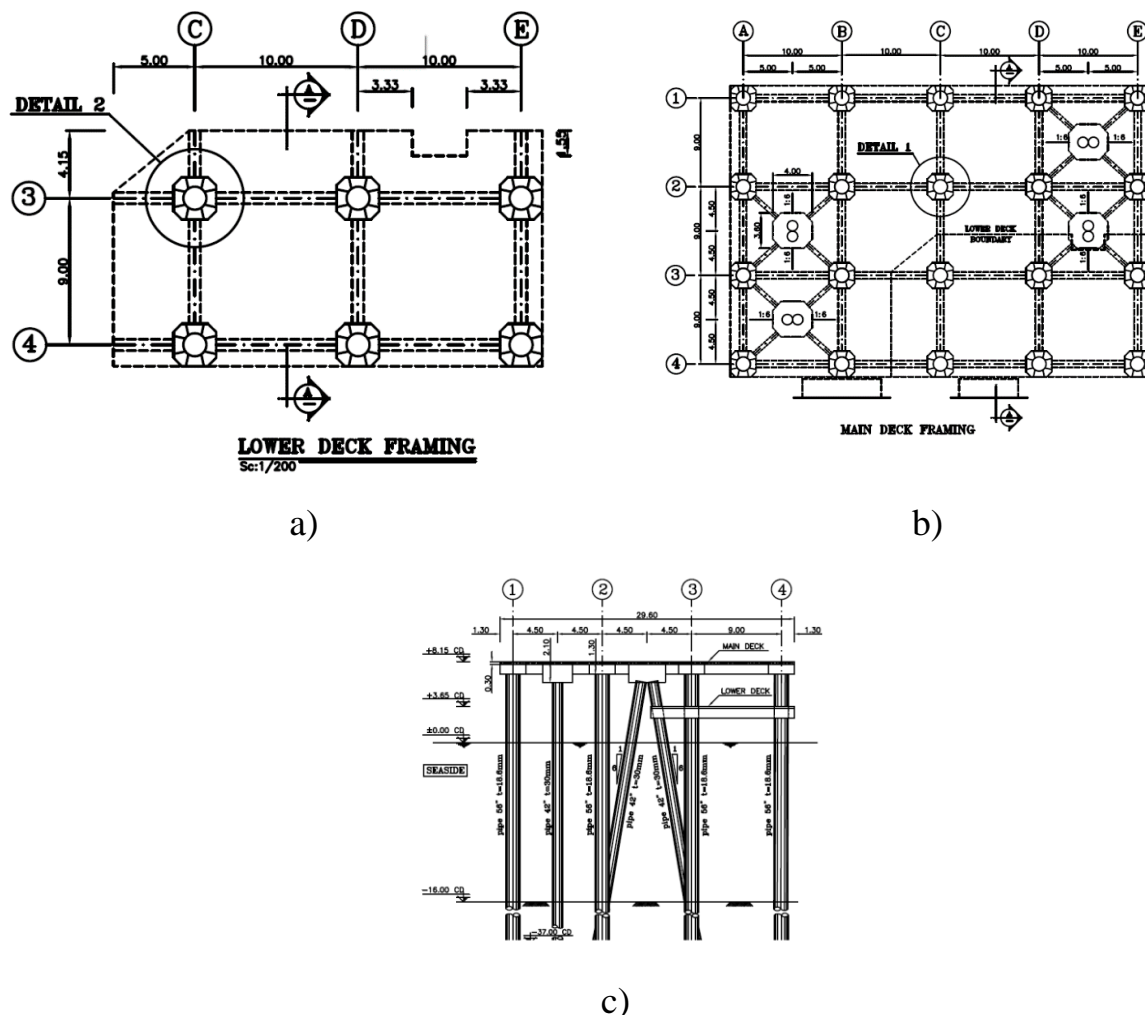
۴- تشخیص مکان و شدت آسیب در اسکله شمع و عرشه پایانه LPG عسلویه

بندر پتروشیمی عسلویه (شکل ۱) که شناسایی آسیب در یک نمونه از اسکله های موجود در آن (اسکله شماره ۱۴) در این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت، دارای طول بازوی موج شکن غربی ۲۶۷۰ متر، طول بازوی موج شکن شرقی ۱۱۶۰ متر، مساحت حوضچه بندر ۲۱۰ هکتار، طول اسکله ها ۲۱۰۰ متر، تعداد اسکله ها ۱۵ پست، ۳۶ هکتار مساحت پسرانه بندر، دهانه حوضچه ۴۰۰ متر و شعاع چرخش حوضچه ۶۰۰ متر می باشد. اسکله شماره ۱۴ بندر پتروشیمی عسلویه دارای ظرفیت پذیرش ۷۰۰۰۰ تن، از نوع شمع و عرشه بوده، آبخور آن ۱۴،۶ متر، طول آن ۲۵۰ بوده و کاربرد آن صادرات مواد گازی، بوتان و آمونیاک است [30].



شکل ۱ اسکله شماره ۱۴ بندر پتروشیمی پارس عسلویه.

تمام پروفیل‌های فولادی به کار رفته در این اسکله از نوع ST37 با $F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ می باشند. تمام اعضای فولادی با پوشش 400 MIC Suitable Epoxy-Resin Coating پوشش داده شده اند. نماهای مختلف از این اسکله در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱- (a) پلان عرشه پایینی، (b) پلان عرشه فوقانی و (c) نمای جانبی از اسکله شمع و عرشه تحت مطالعه.

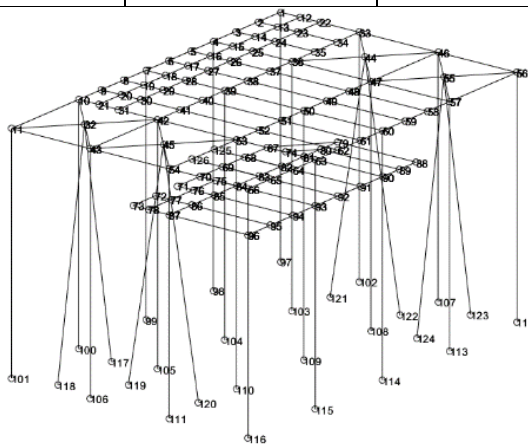
۵- اعمال آسیب فرضی بر روی سازه و تعریف سناریوهای مختلف آسیب

با توجه به کاهش مشخصات مصالح سازه در صورت آسیب دیدگی، آسیب فرضی با کاهش مدول الاستیسیته المان در برنامه نوشته شده اعمال می گردد. به منظور نشان دادن دقت روش انرژی کرنشی مودال در شناسایی مکان و شدت آسیب، سناریوهای مختلف آسیب های تکی و چندتایی برای سازه تعریف شده است. برای شناسایی آسیب به روش انرژی کرنشی مودال به اطلاعات مودال سازه در حالت قبل و بعد از آسیب نیاز است. بدین منظور بعد از مدلسازی سکو و تعریف ماتریس های سختی و جرم المان ها و بر هم چینی آن ها جهت دست یابی به ماتریس سختی و جرم کل سازه، بردارهای ویژه و مقادیر ویژه که به ترتیب همان شکل مودها و فرکانس های طبیعی سازه هستند، استخراج می گردند. سپس فرکانس های طبیعی از کوچک به بزرگ مرتب می شوند که کوچک ترین فرکانس، اولین فرکانس طبیعی سازه و شکل مود متناظر با آن، اولین شکل مود سازه است. سایر شکل مودهای سازه نیز به شیوه فوق مرتب می گردند. در جدول ۱، سناریوهای

مختلف آسیبهای وارده به زیرسازه در کنار سه فرکانس طبیعی اول سازه آسیب دیده در هر سناریو نشان داده شده است. مکان هندسی اعضای آسیب دیده در سناریوهای مختلف نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تنها چند شکل مود اول سازه در محاسبات مربوط به شناسایی آسیب در نظر گرفته شده اند.

جدول ۱- سناریوهای مختلف آسیبهای وارده به اسکله شمع و عرشه فولادی و فرکانسهای طبیعی اول سازه در هر حالت

فرکانس طبیعی عددی، تجربی			شدت آسیب	عضو آسیب دیده	سناریوی آسیب
مود سوم	مود دوم	مود اول			
۱۸,۷۰۸۶	۱۷,۹۱۶۱	۱۴,۰۷۵۸	٪۲۵	۳۶	۱
۱۶,۹۸۵۰	۱۶,۰۱۴۵	۱۲,۹۸۵۱			
۱۸,۷۰۸۱	۱۷,۹۱۵۸	۱۴,۰۷۵۸	٪۲۰	۱۱۷	۲
۱۶,۹۷۸۳	۱۶,۰۱۳۹	۱۲,۹۸۵۱			
۱۸,۷۰۸۶	۱۷,۹۱۶۱	۱۴,۰۷۶۰	٪۱	۱۱۷	۳
۱۶,۰۱۴۵	۱۶,۰۱۴۵	۱۲,۹۸۶۷			
۱۸,۷۰۸۰	۱۷,۹۱۵۶	۱۴,۰۷۵۵	٪۲۵	۱۲۲	۴
۱۶,۹۷۷۸	۱۶,۰۱۳۷	۱۲,۹۸۴۳			



شکل ۳ مدل ساخته شده اسکله شمع و عرشه.

۶- مشخصات مدل آزمایشگاهی و نحوه انجام آنالیز مودال تجربی

در این مطالعه یک مدل فیزیکی بر اساس مقیاس یک بیست و دوم ابعاد واقعی اسکله شمع و عرشه پایانه LPG عسلویه با همان مشخصات فنی شامل عرشه اصلی، زیر عرشه و تعداد ۲۸ شمع برای انجام آزمایش های آنالیز مودال شکل ۴ ساخته شد.



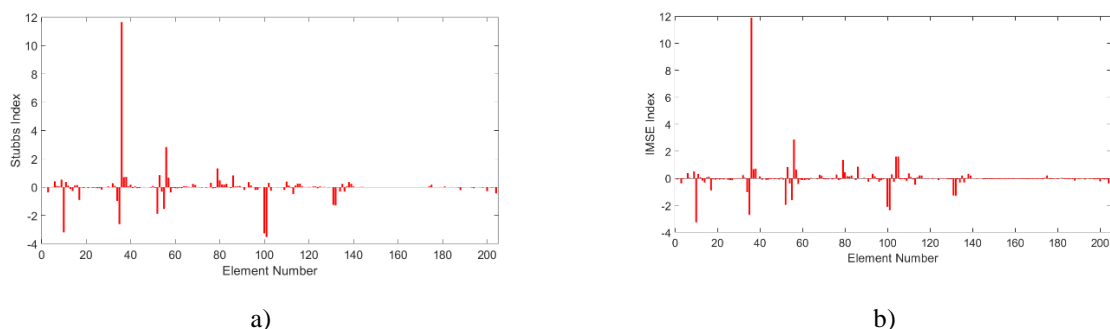
شکل ۴ مدل مورد مطالعه و تجهیزات مورد استفاده جهت آنالیز مودال تجربی.

تحلیل مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانسهای طبیعی، ضرایب میرایی و مود شکل ها و به کارگیری آنها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم می باشد. جهت انجام آنالیز مودال، گوشه عرشه اسکله به عنوان نقطه مبدأ، تحریک کننده و شتاب سنج ها مستقیم به دو گره انتخابی متصل می شوند. ابزاربندی سازه شامل دو عدد شتاب سنج سه محوری مونتاژ شده سبک وزن از نوع ADXL345 برای ثبت پاسخ های سازه ای بعلاوه سیستم تحلیل داده ها شامل کامپیوتر برای تبدیل دیتاهای اولیه بود. هر ۲۸ شمع سازه به یک صفحه فلزی کاملاً صلب و سنگین جوش داده شد، بطوریکه امکان شبیه سازی اتصال گیردار در محل تکیه گاه را برای سازه فراهم می سازد. نتایج فرکانسهای طبیعی تجربی در جدول ۱ نشان داده شده است.

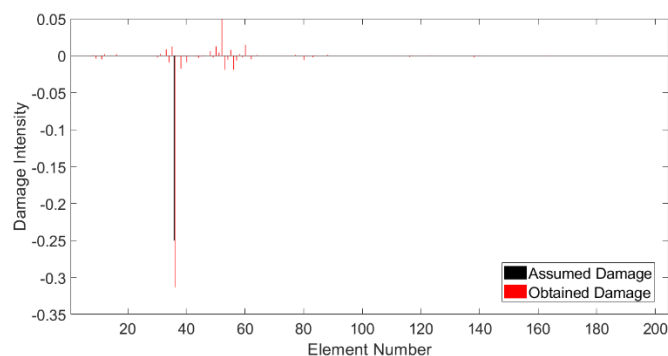
۷- نتایج: تعیین محل و شدت آسیب در سناریوهای مختلف

۷-۱- سناریوی اول

در این حالت، فرض می شود که عضو شماره ۳۶ به میزان ۲۵ درصد دچار آسیب شده است. شکل مود های سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده استخراج شده و با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال، نمودار محل آسیب در شکل ۵ و شدت آسیب در شکل ۶ ترسیم گردیده است. همانطور که شکل ۵ نشان می دهد، روش انرژی کرنشی مودال با دقت بالایی قادر به تعیین مکان آسیب در سازه سکو بوده است. با این وجود، استفاده از روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته سبب شده تا شاخص شناسایی آسیب در عضو آسیب دیده مقداری بیشتر و در سایر اعضای آسیب ندیده، مقدار کمتری را نشان دهد که بیان کننده دقت بیشتر روش بهبود یافته نسبت به شاخص استاباس است. شکل ۶ نشان می دهد روش انرژی کرنشی مودال با دقت بسیار بالایی شدت آسیب در عرشه را برای شدت آسیب بالا (۲۵٪) پیش بینی نموده است.



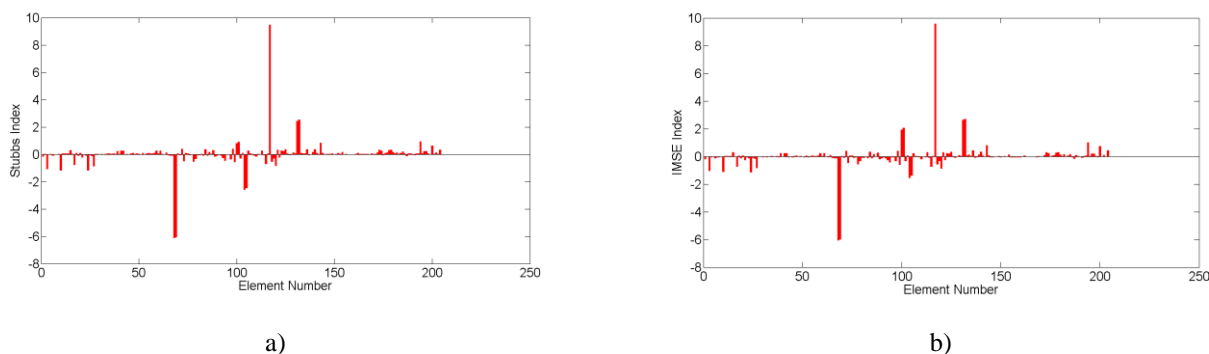
شکل ۵ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص های (a) Stubbs و (b) IMSE در سناریوی اول



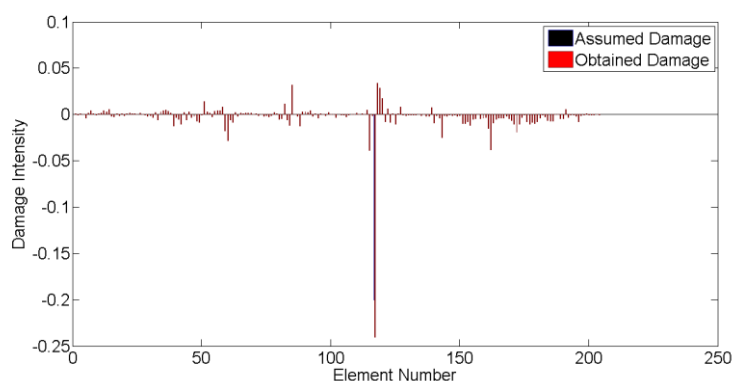
شکل ۶ تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی اول

۲-۷- سناریوی دوم

در این حالت، فرض می شود که عضو شماره ۱۱۷ به میزان ۲۰ درصد دچار آسیب شده است. شکل موده‌های سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده استخراج شده و با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال، نمودار محل آسیب در شکل ۷ و شدت آسیب در شکل ۸ ترسیم گردیده است. همانطور که شکل ۷ نشان می دهد، روش انرژی کرنشی مودال با دقت بالایی قادر به تعیین مکان آسیب در سازه سکو بوده است. با این وجود، استفاده از روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته سبب شده تا شاخص شناسایی آسیب در عضو آسیب دیده مقداری بیشتر و در سایر اعضای آسیب ندیده، مقدار کمتری را نشان دهد که بیان کننده دقت بیشتر روش بهبود یافته نسبت به شاخص استاباس است. شکل ۸ نشان می دهد که روش انرژی کرنشی مودال با دقت بسیار بالایی شدت آسیب در عرشه را برای شدت آسیب بالا (۲۰٪) پیش بینی نموده است.



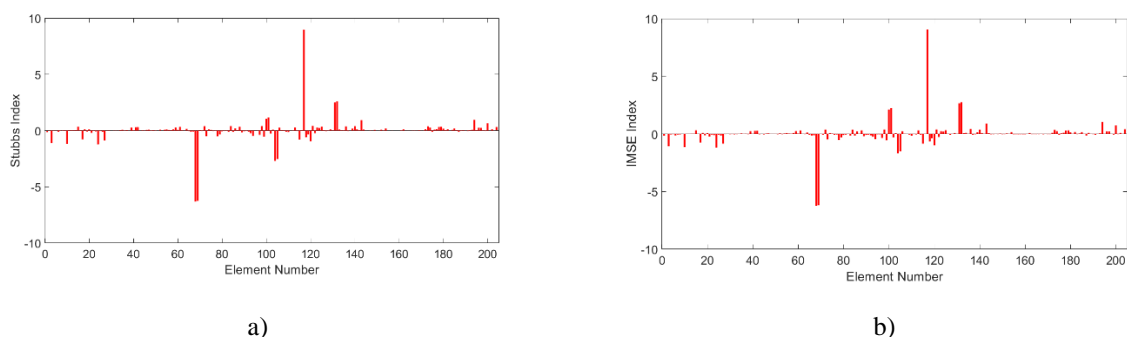
شکل ۷ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص های (a) Stubbs و (b) IMSE در سناریوی دوم



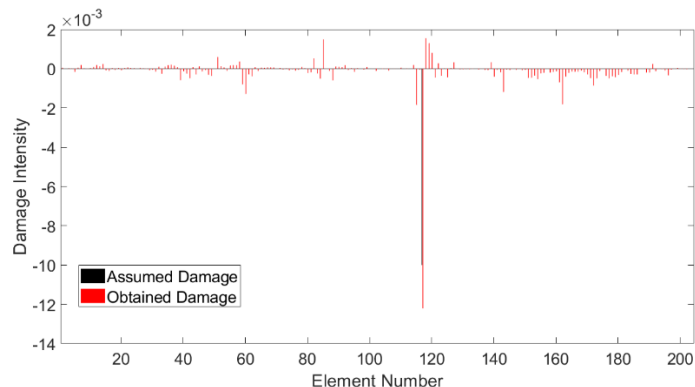
شکل ۸ تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی دوم

۳-۷- سناریوی سوم

در این سناریو، المان شماره ۱۱۷ به میزان ۱ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در شکل ۹ و نمودار شدت آسیب در این سناریو در شکل ۱۰ ترسیم شده است. همانطور که شکل ۹ نشان می دهد مجدداً روش بهبود یافته نتایج مناسبتری را نسبت به شاخص استابس ارائه نموده است. شکل ۱۰ نیز نشان می دهد که روش انرژی کرنشی مودال با دقت مناسبی شدت آسیب کم (۱٪) را در عضو پایه واقع در ناحیه پاشش آب تعیین نموده است. این مطلب نشان دهنده این است که روش انرژی کرنشی مودال قادر به شناسایی هر دو نوع آسیب های کم و آسیب های زیاد است.



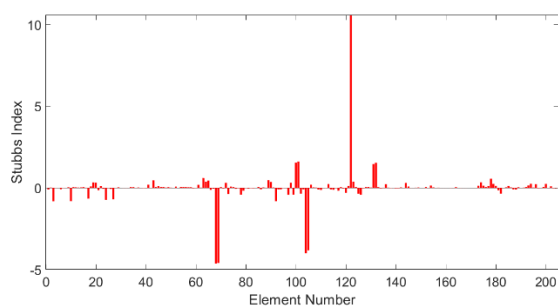
شکل ۹ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص های (a) Stubbs و (b) IMSE در سناریوی سوم



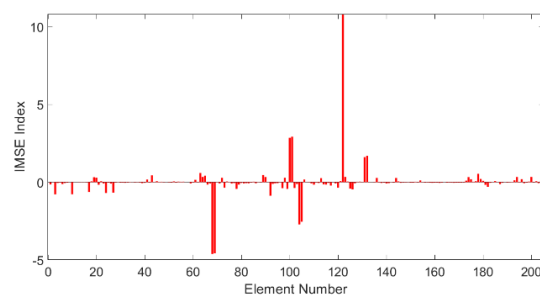
شکل ۱۰ تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی سوم

۴-۷- سناریوی چهارم

در این حالت، فرض می شود که عضو شماره ۱۲۲ به عنوان یکی از اعضای مورب واقع در منطقه پاشش به میزان ۲۵ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در این سناریو در شکل ۱۱ و نمودار شدت آسیب در شکل ۱۲ ترسیم گردیده است. شکل ۱۱ نشان دهنده بهبود دقت مکانیابی آسیب با استفاده از روش بهبود یافته نسبت به شاخص استابس است. شکل ۱۲ نیز نشان می دهد که روش انرژی کرنشی مودال برای اعضای مورب واقع در ناحیه پاشش نیز محل و شدت آسیب را با دقت مناسبی پیش بینی نموده است.

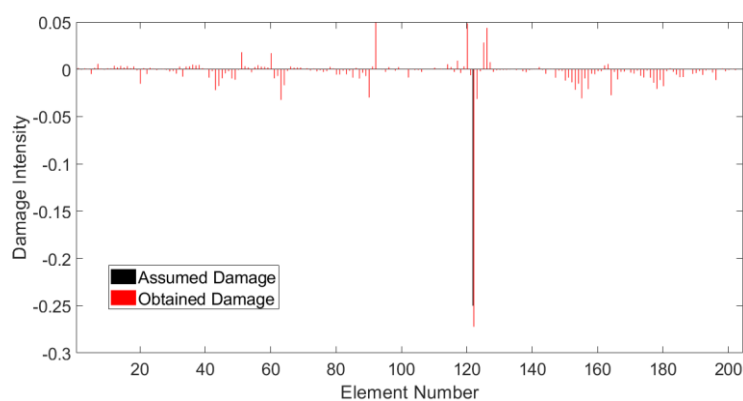


a)



b)

شکل ۱۱ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص های (a) Stubbs و (b) IMSE در سناریوی چهارم



شکل ۱۲ تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی چهارم

در این تحقیق تعیین محل و شدت آسیب در چهار سناریو انجام شد که خلاصه نتایج آن در جدول ۲ است.

جدول ۲- دسته بندی نتایج آسیب های تشخیص داده شده در دو مدل آزمایشگاهی و عددی

شماره المان	تشخیص محل آسیب	شدت آسیب در مدل آزمایشگاهی	شدت آسیب در مدل عددی	توضیحات
۳۶	یکسان در دو مدل عددی و آزمایشگاهی	۰,۲۵	۰,۳	این عضو یکی از شمع های قائم سازه بوده و بار وزنی سازه را تحمل می کند.
۱۱۷	یکسان در دو مدل عددی و آزمایشگاهی	۰,۲	۰,۲۴	این عضو یکی از شمع های مایل سازه بوده و در مجاورت لوله انتقال گاز قرار دارد و نیز بار جانبی سازه را تحمل می کند.
۱۱۷	یکسان در دو مدل عددی و آزمایشگاهی	۰,۰۱	۰,۰۱۲	این عضو یکی از شمع های مایل سازه بوده و در مجاورت لوله انتقال گاز قرار دارد و نیز بار جانبی سازه را تحمل می کند.
۱۲۲	یکسان در دو مدل عددی و آزمایشگاهی	۰,۲۵	۰,۲۷	یکی از اعضای اصلی افقی واقع در معرض پاشش آب دریا

۸- صحت سنجی

همانطور که اشاره شد، در این تحقیق مقیاس ۱:۲۲ اسکله شمع و عرشه پایانه LPG (اسکله شماره ۱۴) بندر پتروشیمی پارس عسلویه بوشهر در آزمایشگاه ساخته شد. براساس بررسی های صورت گرفته اعضای ۳۶، ۱۷۷ و ۱۲۲ این سازه بیشتر در معرض آسیب هستند. بنابراین به المان های مذکور در مدل آزمایشگاهی به میزان مشخصی (مطابق جدول ۱) آسیب وارد شد. روش عددی برای تشخیص محل و شدت آسیب به روش انرژی کرنشی مودال با کدنویسی در نرم افزار متلب با وارد نمودن مشخصات کامل سازه به کار گرفته شد. دیتاهای مربوط به ارتعاش به وجود آمده در سازه نیز توسط شتاب سنج برداشت گردید و وارد کد برنامه نویسی شدند. نتایج کد عددی برای عضو یا المان شماره ۳۶ برای تشخیص محل آسیب با مدل آزمایشگاهی کاملاً منطبق (شکل ۵) است و برای میزان شدت آسیب $0/2$ خطا نسبی (شکل ۶) نشان می دهد. در المان شماره ۱۱۷ نتایج عددی و آزمایشگاهی در تشخیص محل آسیب کاملاً منطبق (شکل های ۹ و ۷) بوده و برای شدت آسیب $0/18$ خطا نسبی (شکل های ۱۰ و ۸) نشان می دهد. برای المان ۱۲۲ نیز محل آسیب به طور دقیق تشخیص داده شده (شکل ۱۱) و در تشخیص شدت آسیب $0/08$ خطای نسبی (شکل ۱۲) مشاهده می شود. لذا نتایج عددی تطابق بسیار خوبی با خروجی های مدل آزمایشگاهی نشان می دهد.

۹- نتیجه گیری

با سپری شدن عمر سرویس اسکله های شمع و عرشه، نیاز به پایش سلامت آنها به منظور شناسایی مکان و شدت آسیب در آنها احساس می شود. از میان تمامی قسمتهای اسکله شمع و عرشه، پایش سلامت اعضای واقع در عرشه اسکله و همچنین اعضای واقع در ناحیه پاشش آب که به دلیل تر و خشک شدن پی‌پی، بیش از سایر اعضا در معرض آسیبهای ناشی از خوردگی قرار دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این تحقیق، بصورت آزمایشگاهی و عددی، با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال که یکی از مناسبترین روشهای شناسایی غیر مخرب آسیب در سازه ها است، به شناسایی آسیبهای تکی و چندگانه با شدتهای کم و زیاد در یک نمونه اسکله شمع و عرشه

واقعی که به صورت سه بعدی شبیه سازی و در آزمایشگاه ساخته شده، پرداخته شده و نتایج دو روش شاخص استابس و روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج زیر از این تحقیق بدست آمد:

۱- روش انرژی کرنشی مودال می تواند به نحو مناسبی شدت و مکان آسیب را در اسکله های شمع و عرشه قبل از شروع تخریب شناسایی نماید.

۲- این روش هم در شناسایی آسیبهای کوچک و هم در شناسایی آسیبهای بزرگ عملکرد قابل قبولی از خود ارائه داد.

۳- این روش در شناسایی آسیب در عرشه و ناحیه پاشش که از اهمیت بیشتری نسبت به سایر اعضای اسکله برخوردار بوده و از اهداف اصلی این تحقیق هستند، دارای عملکرد مناسبی بود.

۴- روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته با دقت بالاتری، مکان آسیب را در سازه شناسایی نموده و استفاده از این روش به جای روش شاخص استابس توصیه می گردد.

سپاسگزاری

محققین تحقیق حاضر از مؤسسه عمران ساحل و آقای مهندس سیداحمد حمیدی به جهت در اختیار گذاشتن نقشه ها و اطلاعات مرتبط با اسکله تشکر می نمایند. امید است نتایج تحقیق حاضر برای اسکله مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد.

۱۰ - مراجع

- [1] A. A. Ramezani-pour and F. Mowdi, "Chloride ion penetration and destruction of concrete structures in the Persian Gulf," in *Second International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures*, 1995.
- [2] M. Gholipour Feizi, V. Nourani, A. Mojtahedi and M. Barghian, "Evaluating the uncertainties in the semi-rigidity of connections of the pier base to optimization of finite element model updating," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 281-290, 2016.
- [3] M. Biklaryan, M. A. Lotfollahi-Yaghin, M. H. Aminfar and A. Mojtahedi, "Investigation into the uncertainty parameters in dynamics performance of pier stochastic finite element method using Wishart random matrix," *Journal of Marine Engineering*, vol. 19, pp. 1-11, 2014.
- [4] E. Akyuz and M. Celik, "Application of CREAM human reliability model to cargo loading process of LPG tankers," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 34, pp. 39-48, 2015.
- [5] S. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime and D. W. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review," Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [6] D. Balageas, "Introduction to Structural Health Monitoring," in *Structural Health Monitoring*, Wiley, 2006, pp. 13-43.
- [7] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime and D. W. Shevitz, "A summary review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties," *Journal of Shock Vibration*, vol. 30, pp. 91-105, 1995.
- [8] P. Cawley and R. D. Adams, "The location of defects in structures from measurement of natural frequencies," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 14, pp. 49-57, 1979.
- [9] F. Shahrivar and G. Bouwkamp, "Damage detection in offshore platforms using vibration information," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 108, pp. 97-106, 1986.
- [10] S. R. Hansen and G. N. Vanderplaats, "Approximation method for configuration optimization of trusses," *AIAA J*, vol. 28, pp. 161-168, 1990.
- [11] S. Doebling, F. Hemez, M. Barlow, L. Peterson and C. Farhat, "Selection of experimental modal data sets

- for damage detection via model update,” in *34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 1993.
- [12] J. T. Kim and N. Stubbs, “Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information,” *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 5, pp. 58-66, 1995.
- [13] N. Stubbs, J. T. Kim and C. R. Farrar, “Field verification of a non-destructive damage localization and severity estimation algorithm,” in *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1995.
- [14] N. Stubbs and J. T. Kim, “Damage localization in structures without baseline modal parameters,” *AIAA Journal*, vol. 34, pp. 1644-1649, 1996.
- [15] O. S. Salawu, “Detection of structural damage through changes in frequency: a review,” *Engineering Structures*, vol. 19, pp. 718-723, 1997.
- [16] C. R. Farrar and D. A. Jauregui, “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study,” *Smart Materials and Structures*, vol. 7, pp. 720-731, 1998.
- [17] J. T. Kim and N. Stubbs, “Improved damage identification method based on modal information,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 252, pp. 223-238, 2002.
- [18] Y. Y. Li, L. Cheng, L. H. Yam and W. O. Wong, “Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach,” *Computers & Structures*, vol. 80, pp. 1881-1894, 2002.
- [19] Y. He-Zhen, L. Hua-jun and W. Shu-qing, “Damage localization of offshore platforms under ambient excitation,” *China Ocean Engineering*, vol. 17, pp. 495-504, 2003.
- [20] M. Ge and E. M. Lui, “Structural damage identification using system dynamic properties,” *Computers & Structures*, vol. 83, pp. 2185-2196, 2005.
- [21] H. W. Shih, D. P. Thambiratnam and T. H. Chan, “Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 323, pp. 645-661, 2009.
- [22] H. Hu and C. Wu, “Development of scanning damage index for the damage detection of plate structures using modal strain energy method,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, pp. 274-287, 2009.
- [23] S. M. Seyedpoor, “A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization,” *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 47, pp. 1-8, 2012.
- [24] F. Liu, H. Li, W. Li and B. Wang, “Experimental study of improved modal strain energy method for damage localisation in jacket-type offshore wind turbines,” *Renewable Energy*, vol. 72, pp. 174-181, 2014.
- [25] S. M. Seyedpoor and O. Yazdanpanah, “An efficient indicator for structural damage localization using the change of strain energy based on static noisy data,” *Applied Mathematical Modeling*, vol. 38, pp. 2661-2672, 2014.
- [26] S. Wang, F. Liu and M. Zhang, “Modal strain energy based structural damage localization for offshore platform using simulated and measured data,” *Journal of Ocean University of China*, vol. 13, pp. 397-406, 2014.
- [27] S. Chandrasekaran and P. T. Kumar, “Damage detection in reinforced concrete berthing jetty using a plasticity model approach,” *Journal of Marine Science and Application*, 2019.
- [28] B. Seiffert, M. Hayatdavoodi and C. Ertekin, “Experiments and calculations of cnoidal wave loads on a coastal-bridge deck with girders,” *European Journal of Mechanics- B/Fluids*, vol. 52, pp. 191-205, 2015.
- [29] Y. Li, S. Wang, M. Zhang and C. Zheng, “An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures,” *Journal of Marine Science and Application*, vol. 15, pp. 182-192, 2016.
- [30] [Online]. Available: <https://asaluyehport.pmo.ir>.