

# پایش سلامت سازه‌های دریایی به روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده (مطالعه موردی: زیرسازه شابلونی چهار پایه توربین بادی فراساحلی)

سید رضا سمائی<sup>۱</sup>، مجید قدسی حسن آباد<sup>۲\*</sup>، محمد اسدیان قهفرخی<sup>۳</sup>، محمد جواد کتابداری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران seyedreza.samaei@yahoo.com  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه صنایع دریایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران m.ghodsi@srbiau.ac.ir  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه صنایع دریایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران asadian@srbiau.ac.ir  
<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران ketabdar@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷	سکوه‌های شابلونی چهارپایه از پرکاربردترین سازه‌های فراساحلی هستند که در طول عمر بهره‌برداری در معرض آسیب‌های مختلفی قرار می‌گیرند. برخلاف سازه‌های خشکی، این سازه‌ها دائماً در معرض برخورد امواج، خوردگی و آسیب اعضاء به‌ویژه در ناحیه پاشش آب هستند. در عمق‌های کم تا متوسط استفاده از این سازه توربین‌های بادی فراساحلی رایج است. با سپری شدن عمر سرویس بسیاری از توربین‌های بادی دریایی، پایش سلامت آنها ضرورت یافته است. در این تحقیق از روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده و در نظر گرفتن فرکانس‌های طبیعی برای تشخیص عیوب احتمالی اعضاء واقع در عرشه و ناحیه پاشش آب که بیش از سایر اعضا در معرض بارهای تناوبی امواج و خوردگی بالای آب دریا هستند، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند، روش اصلاح شده دقت بالاتری در مکان‌یابی آسیب نسبت به روش اولیه (شاخص استابس) دارد. همچنین، آسیب‌های تکی و چندگانه، با شدت کم و زیاد، توسط این روش با دقت مناسبی تعیین گردیدند.
کلمات کلیدی: توربین بادی فراساحلی شناسایی آسیب انرژی کرنشی مودال اصلاح شده شاخص استابس	

## Structural health monitoring of offshore structures using a modified modal strain energy method (Case study: four-leg jacket substructure of an offshore wind turbine)

Seyyed Reza Samaei<sup>1</sup>, Madjid Ghodsi Hassanabad<sup>2\*</sup>, Mohammad Asadian Ghahfarrokhi<sup>3</sup>, Mohammad Javad Ketabdari<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Department of Civil engineering-Coasts, ports and Marine structures, Qeshm branch, Islamic Azad university, Qeshm, Iran ; seyedreza.samaei@yahoo.com

<sup>2\*</sup> Assistant professor, Department of Marine industries, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; m.ghodsi@srbiau.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant professor, Department of Marine industries, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; asadian@srbiau.ac.ir

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Marine Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; ketabdar@aut.ac.ir

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 29 Jun. 2020

Accepted: 07 Dec. 2020

#### Keywords:

Offshore wind turbine

Damage detection

Modified modal strain

energy method

Stubbs index

### ABSTRACT

Four-leg jacket is one of the most widely used offshore structures that is exposed to various damages during its service life. Unlike land structures, offshore structures are always exposed to waves, corrosion and damages, especially in the splash zone. At shallow to intermediate water depths, these structures are commonly used as the substructure of offshore wind turbines. Passing their service life has made the structural health monitoring of offshore wind turbines necessary. In this research, a modified modal strain energy method is used for damage detection in deck and splash zone members which are more exposed to periodic loads of waves and high corrosive seawater than other members. The results showed the higher accuracy of the improved modal strain energy method compared to the original method (Stubbs index). Also, using improved method resulted in prediction of single and multiple damages, with low and high intensities with appropriate accuracy.

در طول عمر بهره‌برداری در محیط خشن دریایی، سازه‌های دریایی به طور مداوم در معرض آسیب‌های پیش‌رونده و تجمعی قرار دارند. این امر به دلیل ایجاد و رشد ترک در اثر خوردگی و نیروهای تناوبی امواج است که به عنوان یک تهدید جدی برای سازه محسوب می‌شود. این ترک‌ها می‌توانند به تغییرات سختی اعضا منجر شوند که با تغییر در فرکانس طبیعی و شکل مود ارتعاشی سازه قابل بررسی هستند و می‌توان با تحلیل این تغییرات، آسیب را در سازه شناسایی نمود.

امروزه انرژی باد در دنیا مورد توجه زیادی قرار دارد. به‌ویژه به دلیل وجود مناطق وسیع در دریا و سرعت بالاتر بادهای دریایی نسبت به بادهای خشکی (به دلیل نبود عوارض طبیعی و مصنوعی) و پیوستگی وزش باد، استفاده از انرژی بادی دریایی به عنوان یک گزینه اولویت‌دار برای تولید انرژی مطرح است. بر اساس گزارش انجمن جهانی انرژی بادی (GWEC)، ظرفیت کلی نیروگاههای بادی فراساحلی نصب شده در دنیا تا سال ۲۰۱۹ برابر با ۲۹ گیگاوات اعلام شده است و با ظهور بازارهای جدید برای انرژی بادی دور از ساحل در ژاپن، ویتنام، آمریکا، تایوان، و کره جنوبی پیش بینی می‌شود که بیش از پنجاه گیگاوات ظرفیت انرژی بادی فراساحلی جدید در بین سالهای ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ نصب گردد [1]. توربین‌های بادی می‌توانند تا پنج بار در سال تحت تأثیر آسیب‌های پیش‌بینی نشده قرار گیرند. بنابراین به منظور کاهش هزینه‌های کلی تعمیر و نگهداری، افزایش طول عمر و قابلیت اقتصادی بیشتر توربین‌ها، سازه را می‌بایست به طور مداوم تحت پایش سلامت قرار داد [2].

با توجه به اینکه اولین توربین‌های بادی فراساحلی، نزدیک به سی سال پیش نصب شده‌اند و توربین‌های بادی به طور معمول برای عمر بین بیست تا بیست و پنج سال طراحی می‌شوند [3]، در حال حاضر پایش سلامت توربین‌های بادی فراساحلی اهمیت زیادی پیدا کرده است. از طرفی امکان دسترسی کمتر به توربین‌های بادی دریایی نسبت به توربین‌های بادی واقع در خشکی در کنار بارگذاری سازه‌ای شدیدتر به دلیل امواج، باد شدید و تأثیرات خوردگی سبب تفاوت روش پایش سلامت توربین‌های بادی خشکی و دریایی می‌شود. برای نیروگاههای واقع در خشکی، تمرکز اصلی بر پایش قسمت ماشین، به‌ویژه یاتاقان، پره‌ها و چرخ دنده‌ها و نیز پره‌های روتور قرار است، درحالی‌که برای توربین‌های بادی فراساحلی، پایش زیر سازه اهمیت فراوانی دارد [4].

با توجه به شرایط محیط دریا، دقت پایین و عدم شناسایی عیوب نامشهود برای پایه توربین بادی فراساحلی بازرسی چشمی در پایش سلامت سازه ناممکن است. بنابراین استفاده از روشهای غیرمخرب شناسایی آسیب برای افزایش ایمنی و اطمینان از

وضعیت موجود پیشنهاد می‌شود. یکی از این روشها، روش شناسایی آسیب مبتنی بر ارتعاش برای ارزیابی خرابی در سطح سازه است که به عنوان یک راه حل تکمیلی در کنار بازرسی‌های چشمی به کار گرفته می‌شود [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 می‌توان با استفاده از تغییر در پاسخ استاتیکی یا دینامیکی سازه‌ها، تغییر در خصوصیات فیزیکی آنها و در نتیجه آسیب‌های سازه‌ای را در مراحل اولیه رشد آسیب شناسایی نمود. تشخیص زود هنگام این خرابیها سبب کاهش هزینه‌های نگهداری و جلوگیری از شکست سازه می‌گردد.

به طور کلی، شناسایی آسیب در سازه‌ها در چهار سطح به صورت زیر طبقه بندی می‌شوند:

سطح اول: تشخیص وجود و یا عدم وجود خرابی در سازه‌ها

سطح دوم: سطح اول + تعیین موقعیت هندسی خرابی

سطح سوم: سطح دوم + کمیت شدت خرابی

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

روش‌های تشخیص و نمایان سازی آسیب و ترک با توجه به اهمیت آن در شکست سازه، موضوع تحقیقات گسترده‌ای بوده است. به عنوان یکی از اولین تلاشها برای شناسایی آسیب در سازه‌ها، کاولی و آدامز (۱۹۷۹) فرکانس‌های طبیعی سازه را به عنوان شاخصی برای شناسایی محل آسیب ارائه نمودند [8]. شهرپور و بوکامپ (۱۹۸۶) با استفاده از اطلاعات ارتعاشی به شناسایی آسیب در یک سکوی دریایی هشت پایه فولادی پرداختند. آنها تأثیرات مهاربندی‌های مورب را بر فرکانس و شکل مود ارتعاش قابل اندازه‌گیری 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 گرفت و مشخص شد که آنها متفاوت از اثرات آسیب هستند [9]. هانسن و واندربلاتس (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]. دوئبلینگ و همکاران (۱۹۹۳) روشی را بر اساس انرژی کرنشی مودال برای انتخاب یک زیرمجموعه از مودهای ارتعاشی سازه‌های مشخص و تشخیص آسیب سازه‌ای در آنها ارائه کردند [11]. کیم و استابس (۱۹۹۵) الگوریتمی برای مکان‌یابی و تعیین میزان آسیب در سکوهای شابلونی ارائه نمودند و به تعیین مکان و تخمین شدت آسیب با استفاده از تغییرات در شکل مودها پرداختند. 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 سازه‌های تیر مانند

پیشنهاد دادند، کارایی این روش را بر روی یک پل فولادی بررسی نمودند و به درستی موفق به شناسایی مکان آسیب شدند [13]. [14]. سالوو (۱۹۹۷) مطالعه ای در مورد استفاده از فرکانس‌های 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 مؤثر باشد [15]. فرار و جاریگو (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 اصلاح شده را به منظور بهبود دقت شناسایی آسیب در سازه‌های با اعضای زیاد توسعه دادند و کارایی آن را بر روی یک تیر دو دهانه آزمایش نمودند [17]. چنگ و همکاران (۲۰۰۲) روشی را برای شناسایی مکان آسیب‌های یک المان صفحه‌ای 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 آسیب‌های تکی و چندگانه دارد [18]. ژن و همکاران (۲۰۰۳) به مکان‌یابی آسیب در سکوه‌های فراساحلی تحت تحریک‌های محیطی پرداخته و یک روش جدید برای شناسایی آسیب ارائه کردند که از ویژگی عدم تغییر انرژی کرنشی مودال استفاده می‌کرد. روش آن‌ها انرژی کرنشی مودال المانی را به دو بخش، نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال فشاری<sup>۱</sup> (CMSECR) و دیگری نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال خمشی<sup>۲</sup> (FMSECR) تقسیم نموده و دو شاخص آسیب ارائه می‌داد [19]. جی و لوئی (۲۰۰۵) روشی را بر پایه مدل اجزا محدود و با استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه که شامل فرکانس‌ها و اشکال مودی بود، به منظور شناسایی و تعیین شدت آسیب ارائه دادند [20]. وانگ و همکاران (۲۰۰۶) از روش انرژی کرنشی مودال به منظور شناسایی آسیب در سکوه‌های دریایی با استفاده از داده‌های مودال ناقص (تنها دو شکل مود اول) استفاده کردند و چندین سناریو شامل آسیب به مهاربندهای قطری را شبیه سازی نمودند [21]. 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 می‌توان از این روش در شناسایی آسیب در شاه‌تیر و عرشه پلها که رفتاری نظیر تیر و صفحه دارند، استفاده نمود [22]. هو و وو (۲۰۰۹) شاخص آسیب را برای شناسایی آسیب در ورقها بر اساس روش انرژی کرنشی مودال توسعه دادند [23]. سیدپور (۲۰۱۲) یک روش دو

مرحله‌ای را برای شناسایی دقیق موقعیت و شدت آسیب‌های چندگانه در سیستمهای سازه‌ای ارائه نمود که در مرحله اول، یک شاخص انرژی کرنشی مودال برای مکان‌یابی دقیق آسیب در یک سازه مورد استفاده قرار گرفت و در مرحله دوم، شدت آسیب با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات با استفاده از نتایج مرحله اول تعیین گردید [24]. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تفاضل انرژی کرنشی مودال سازه در حالت سالم و آسیب دیده، برای شناسایی مکان آسیب در پایه‌های توربین بادی، شاخصی بر مبنای انرژی کرنشی مودال ارائه نمودند که نسبت به سایر روشهای سنتی انرژی کرنشی حساسیت بالاتری داشت [25]. 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 خرابی سیزده عضوی، یک قاب سه دهانه‌ای و یک خرابی فضایی بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که با اعمال بارگذاری در یک گره از خرابیهای مورد بررسی و محاسبه جابه‌جایی گره‌ها به راحتی شناسایی مکان آسیب امکان پذیر است [26]. ونگ و همکاران (۲۰۱۴) از روش انرژی کرنشی مودال برای مکان‌یابی آسیب بر روی یک سکوی دور از ساحل استفاده کردند و نتیجه گرفتند که از میان تمامی روش‌های تشخیص خرابی تا کنون، روش‌های مبتنی بر انرژی کرنشی مودال برای تشخیص محل آسیب نتیجه بخش‌تر از سایر روش‌ها است [27]. لی و همکاران (۲۰۱۶) از یک روش اصلاح شده انرژی کرنشی مودال به منظور شناسایی آسیب در سکوه‌های دریایی بر مبنای یک روش انرژی کرنشی مودال سنتی (شاخص استابز) استفاده کردند، با این تفاوت که فرکانس‌های مودال را نیز در بررسی خود در نظر گرفتند. نتایج نشان دهنده دقت بیشتر روش پیشنهادی آنها نسبت به روش شاخص استابز در مکان‌یابی آسیب در حضور داده‌های مودال محدود بود [28]. مارتینز-لونگو و همکاران (۲۰۱۶) ضمن مرور مسائل مرتبط با پایش سلامت توربینهای بادی دور از ساحل نتیجه گرفتند که تحلیل فرکانس طبیعی، رایج‌ترین روش شناسایی آسیبهای موجود در پایه‌های توربین بادی است، چرا که سایر روشها بسیار پرهزینه، با بلوغ کم یا دقت ناکافی هستند [29]. انگوین و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مبتنی بر ارتعاش به شناسایی آسیب در برجهای توربین بادی پرداختند [30].

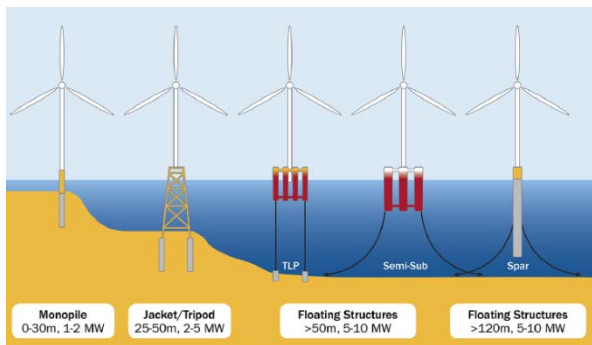
بررسی جامع پیشینه تحقیق فوق، نشان‌دهنده دقت و توانایی بالای روش انرژی کرنشی مودال در شناسایی آسیب در سازه‌های دریایی است. با توجه به این موضوع و نیز ادبیات فنی گسترده ارائه شده در زمینه این روش، روش انرژی کرنشی مودال به عنوان روش پلایه به منظور تعیین آسیب در زیر سازه توربین بادی انتخاب

### تریپاد

تریپاد متشکل از یک سازه سه پایه است که از لوله‌های فولادی استوانه‌ای تشکیل شده است. این سازه بیشتر برای اعماق آب حدود ۲۵ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد [31].

### سازه شابلونی

سازه شابلونی متشکل از سازه حداقل چهارپایه‌ای است که از لوله‌های فولادی استوانه‌ای تشکیل شده است و برای عمق آب ۲۵ تا ۵۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد [31].



شکل ۱ انواع فونداسیون موجود برای توربینهای بادی دور از ساحل [32].

### ۳- آسیب ناشی از خوردگی در زیرسازه توربین بادی

در این قسمت، خوردگی به عنوان مهمترین عامل آسیب در زیرسازه‌های توربین بادی دریایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. خوردگی، فرآیند تدریجی تخریب یک ماده در اثر واکنشهای شیمیایی یا الکتروشیمیایی با محیط اطراف آن است. عمل مخرب خوردگی که به دلیل عواملی نظیر باران، هوای آلوده، آب دریا یا مواد شیمیایی فعال ایجاد می‌شود، یک خطر بالقوه برای سازه‌ها است، چرا که ممکن است سبب از دست رفتن مواد شده و بنابراین ظرفیت بار نهایی سازه و به طور بالقوه، ایمنی آن را تحت تاثیر قرار دهد. خوردگی می‌تواند با تغییر ویژگیهای الاستیک و دینامیک سازه، بر کارایی و احتمالاً مقاومت در برابر خستگی سازه تاثیر گذاشته و از طریق حفره یا ایجاد شکافهایی سبب ایجاد سوراخ شود و در نتیجه بر ظرفیت اقدامات مهاری اثر گذار باشد. خوردگی می‌تواند به کاهش ایمنی سازه، افزایش هزینه‌های تعمیر و زمان خاموشی برنامه‌ریزی نشده به دلیل تعمیرات سکو یا سایر عواقب وخیم منجر شود. بر مبنای اطلاعات آماری موجود در مورد سکوها نفت و گاز، ۴۶۵۶ مورد نشت و انتشار هیدروکربن بین سالهای ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۵ گزارش شده است. رایج‌ترین دلایل این حوادث ناشی از شکست مکانیکی ناشی از خوردگی و سایر عوامل تخریب مرتبط است [33].

به منظور تخمین زوال فولاد و در نتیجه کاهش سختی سازه در آب دریا، توصیف خوردگی و متغیرهای آن در محیط دریایی خورنده ضروری است. تخریب ناشی از خوردگی می‌تواند به نحو

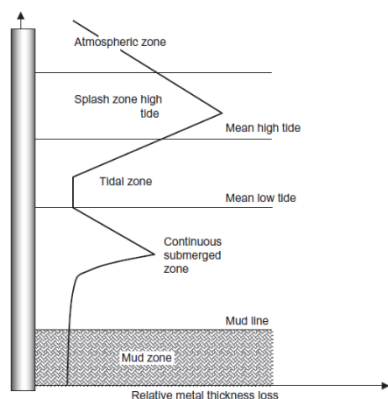
گردید. همچنین این روش تشخیص غیرمخرب است و در میان روش‌های غیرمخرب دیگر مانند تستهای UT و PT هزینه بسیار کمتر و زمان‌بری کمتری دارد. در این تحقیق به شناسایی مکان و تعیین میزان آسیب زیر سازه شابلونی توربین بادی فراساحلی به روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده پرداخته خواهد شد. موضوع قابل توجه این‌که عرشه سکو محل اتصال زیر سازه و سازه اصلی توربین بادی بوده و همچنین ناحیه پاشش آب به دلیل تر و خشک شدن پیایی بیشتر از سایر اعضای زیرسازه در معرض آسیبهای ناشی از خوردگی قرار دارند و بیشتر از بقیه اعضا باید مورد پایش سلامت قرار گیرند. این موضوع در تحقیقات گذشته بررسی نشده است. بنابراین تمرکز این تحقیق بر روی اعضای واقع در عرشه و ناحیه پاشش آب است.

### ۲- انواع پایه های موجود برای توربینهای بادی فراساحلی

تاکنون، بیشتر زیرسازه‌های استفاده شده برای توربینهای بادی دور از ساحل از نوع مونوپایل بوده است که بیش از ۸۰ درصد کل ظرفیت توربینهای بادی تا سال ۲۰۱۶ را شامل می‌شود. در سال ۲۰۱۶ به تنهایی ۸۸ درصد از توربینهای جدید از فونداسیون مونوپایل و در ۱۲ درصد دیگر از سکوها شابلونی چهارپایه و تریپاد استفاده شد که برای اعماق آب بیشتر از ۲۵ متر و در سایت‌های با امواج قوی‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیشتر زیرسازه‌های توربینهای بادی فراساحلی به صورت بدون نیاز به بازرسی طراحی می‌شوند تا در یک دوره عمر مشخص، بین بیست تا سی سال، بدون نیاز به هرگونه بازرسی یا تعمیرات، مقاومت کنند. دینامیک زیر سازه نقش مهمی در دستیابی به طول عمر طراحی شده دارد. برای مثال، فرکانس طبیعی اولین شکل مود سازه‌ای در اندرکنش بین موج و فونداسیون نقش دارد. مثلاً، یک طراحی با فرکانس رزونانس پایین‌تر، در برابر ارتعاش ناشی از امواج و بنابراین در برابر بار خستگی افزایش یافته، حساس‌تر است [30]. در این قسمت به مرور انواع متداول زیرسازه‌های استفاده شده در توربینهای بادی دور از ساحل پرداخته می‌شود. همانطور که شکل ۱ نشان می‌دهد، برای اعماق بین ۲۵ تا ۵۰ متر از زیر سازه شابلونی و برای اعماق بیشتر از آن از سازه‌های شناور استفاده می‌شود.

### مونوپایل

این نوع زیر سازه توربین بادی دارای طراحی ساده‌ای بوده و از یک سازه ای لوله‌ای شکل تشکیل شده است. از این سازه بیشتر برای عمق آب کمتر از ۲۵ متر استفاده می‌گردد. قطر شمعها در حدود ۳ تا ۵ متر بوده و نفوذ شمع به بستر دریا از ۱۸ تا ۲۵ متر متغیر است. این سازه به هیچگونه آماده سازی بستری نیاز نداشته، ولی به محافظت در برابر جلبکهای دریایی یا موجودات مزاحم و در واقع عوامل فولینگ روی سطح خود نیاز دارد [31].



شکل ۲ پروفیل خوردگی یک شمع فولادی پس از ۵ سال قرار گرفتن در محیط دریایی [37].

#### ۴- انرژی کرنشی مودال

وقتی یک جسم الاستیک تحت اثر نیرو قرار می‌گیرد، 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 می‌شود که در هنگام اعمال آنها مقداری کار انجام شود. کار مزبور که همراه با تغییر شکل جسم در وضعیت تنش می‌باشد، باعث ذخیره مقداری انرژی به صورت انرژی ارتجاعی در جسم می‌شود که به آن انرژی کرنشی گفته می‌شود. انرژی کرنشی مودال وضعیتی است که نیرویی به سازه وارد نمی‌شود و سازه در حالت ارتعاش آزاد قرار دارد که با تحلیل دینامیکی و حل روابط ارائه شده می‌توان انرژی کرنشی مودال هر عضو را بدست آورد. خرابی در یک سازه معمولاً سبب کاهش سختی سازه می‌شود و بر ماتریس جرم سازه تاثیری نمی‌گذارد.

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

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

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

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

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:

قابل توجهی عمر سرویس المانهای سازه ای را در آب دریا کاهش دهد. برای حفاظت در برابر خوردگی، معمولاً از پوششهای محافظ و حفاظت خوردگی استفاده می‌شود، ولی این انواع حفاظت به برخی دلایل، دارای تاثیر کامل نبوده و خوردگی سبب زیانهای اقتصادی فراوانی می‌شود [34]. بر طبق آمار موجود در منابع علمی، سالانه تقریباً تا ۱۱٪ ذخیره آهن به دلیل خوردگی از بین می‌رود که برابر با ۳۰٪ تولید سالانه است. سازمان جهانی خوردگی (WCO) گزارش داده است که هزینه تخمینی خوردگی در حدود ۲۰۴ تریلیون دلار آمریکا در سال است [35]. هزینه اقتصادی تمام انواع خوردگی تقریباً ۴٪ از تولید ناخالص ملی ایالات متحده است [36].

خوردگی فولاد در آب دریا از یک توزیع عمودی مشخصه تبعیت می‌کند که البته ممکن است با توجه به موقعیت جغرافیایی تا حدی تغییر کند. برای مثال، نرخ خوردگی در یک شمع عمودی فولادی معمولاً در بخش بالایی که فقط در معرض اتمسفر قرار دارد، کم تا متوسط است، چرا که تنها خوردگی اکسیداسیون با رطوبت اتمسفری رخ می‌دهد. در ناحیه به اصطلاح پاشش که در آن سازه به طور مرتب در معرض تر و خشک شدن قرار دارد و فیلم محافظ خوردگی به صورت مداوم شسته می‌شود، نرخ خوردگی بیشترین مقدار خود را که شاید سه تا پنج برابر حالتی است که سازه فقط در معرض اتمسفر قرار دارد، دارا می‌باشد. دقیقاً در زیر علامت بزرگترین جزر و مد، خوردگی به نزدیک مینیمم کاهش می‌یابد، چرا که این ناحیه تا حدی توسط یک اثر سلول تجمع اکسیژن محافظت می‌شود. با این وجود، در برخی از سازه‌ها، به غیر از شمعهای عمودی، حمله خوردگی ممکن است در این ناحیه شدید باشد. این نرخ دوباره در بخش مغروق پیوسته شمع، علی‌الخصوص در لایه های بالایی که حاوی مقدار زیادی اکسیژن حل نشده است یا وقتی جریانات شدید برای تسریع اثر گالوانیک وجود دارد، افزایش می‌یابد. در زیر خطِ گل، خوردگی به حداقل می‌رسد، چرا که هیچ اکسیژنی در آن وجود ندارد و فیلمهای محافظتی، سالم باقی می‌مانند. پروفیل خوردگی یک شمع فولادی در آب دریا در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، بیشترین میزان خوردگی در ناحیه پاشش رخ می‌دهد.

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

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 موده‌های موجود (NM) و تمام المان‌ها (NE) به یک شاخص آسیب برای هر المان می‌رسیم 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 المان‌ها در حالت آسیب دیده، از ماتریس سختی سازه سالم برای هر دو حالت استفاده می‌شود. بنابراین در رابطه بالا نیز از ماتریس سختی سازه سالم استفاده شده است.

بعد از بدست آوردن  $\beta_j$  برای هر المان با استفاده از رابطه زیر شاخص آسیب نرمالیزه می‌گردد که در این رابطه،  $\beta_j$  شاخص آسیب هر المان،  $\bar{\beta}$  متوسط شاخص آسیب در تمام المانها و  $\sigma_\beta$  انحراف معیار شاخص آسیب بوده و  $Z_j$  شاخص آسیب نرمال شده می‌باشد [12]:

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

#### روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده (IMSE)

در تعیین شاخص خرابی استابس تنها از شکل مودها استفاده می‌شود و فرکانس‌های طبیعی در تعیین محل آسیب در نظر گرفته نمی‌شوند. با این وجود، تحقیقات قبلی نشان داده است که فرکانس‌های مودال را می‌توان با دقت بسیار بیشتری نسبت به شکل مودها تعیین نمود. لی و همکاران (۲۰۱۶) به منظور بهبود روش استابس، از اطلاعات فرکانس در تعیین شاخص آسیب استفاده نمودند [28]. تحلیل ویژه برای سازه‌های سالم و آسیب دیده را می‌توان 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 حالت‌های سالم و آسیب دیده بوده و  $\omega_i$  و  $\omega_i^*$ ، آمین فرکانس مودال در حالات سالم و آسیب دیده هستند.

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

که  $K_i^*$  و  $K_{ij}^*$  به ترتیب زیر تعریف می‌شوند:

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

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

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 می‌آید:

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

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

که  $E_j$  و  $E_j^*$  به ترتیب برابر مشخصات سختی مصالح (مدول الاستیسیته) آمین المان در حالت سالم و آسیب دیده می‌باشد و  $C_{jo}$  تنها مشخصات هندسی را در بر می‌گیرد. اگر میزان آسیب در سازه کوچک باشد معادله ۷ برابر واحد خواهد شد در نتیجه:

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

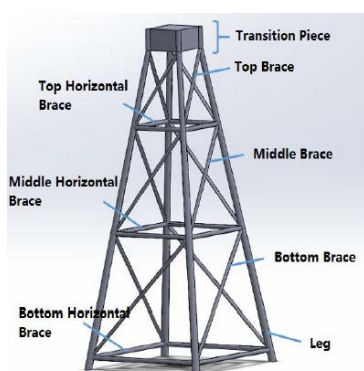
با جایگزین کردن معادلات ۱، ۲، ۵، ۶ و ۸ در معادله ۷ و بازنویسی معادله خواهیم داشت

$$\beta_{ji} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{[\phi_i^{*T} C_{jo} \phi_i^*] K_i}{[\phi_i^T C_{jo} \phi_i] K_i^*} \quad (11)$$

در این رابطه،  $\beta_{ji}$  شاخص شناسایی آسیب برای آمین عضو  $i$  آمین مود است. چنانچه  $K_i^* \approx \phi_i^{*T} C \phi_i^*$  تنظیم شود، تمام کمیتها در سمت راست (از جمله  $\phi_i^*$  و  $\phi_i$ ) را می‌توان تعیین نموده و یا از پارامترهای مودال به دست آمده از اندازه‌گیریهای تجربی و هندسه سازه ( $C_{jo}$ ) تقریب زد. برطبق معادله فوق، آسیب در آمین عضو و آمین شکل مود در صورتی تعیین می‌شود که  $\beta_{ii} > 1$  باشد. هر چند، چنانچه آمین عضو در گره  $i$  یا در نزدیکی آن باشد، مخرج معادله فوق به سمت صفر می‌رود ( $F_{ij} \ll 1$ ) و یک پیش بینی غلط از نتایج آسیب رخ می‌دهد. این محدودیت را به شیوه زیر می‌توان برطرف کرد. در صورتیکه به طرفین رابطه (۱۰) مقدار واحدی را اضافه کنیم خواهیم داشت:

## ۵- تشخیص مکان و شدت آسیب در سکوی شابلونی توربین بادی

در این قسمت به شناسایی آسیب در زیر توربین بادی سکوی چهارپایه شابلونی JX که در شکل ۳ نشان داده شده، پرداخته می‌شود. این سکو که یکی از متداولترین سکوهای پایه توربین بادی است، دارای ارتفاع ۶۶ متری و مقطع متوازی‌الاضلاع است. بر مبنای تحقیق انجام شده توسط چن و همکاران [38]، این نوع زیر سازه توربین بادی، دارای هزینه تمام شده کمتری است و در مقایسه با سایر انواع زیر سازه، بارهای کمتری از موج و جریان به آن وارد می‌شود. همچنین با توجه به عمق آب در خلیج فارس، مناسب‌ترین پایه توربین بادی برای این منطقه نیز سازه شابلونی مذکور می‌باشد. اطلاعات سکو در جدول ۱ آورده شده است [38].



شکل ۳- نمایی از سکوی چهار پایه‌ی تحت مطالعه [38].

جدول ۱ مشخصات سکوی شابلونی JX [38].

نوع سکوی شابلونی	چهارپایه JX
ارتفاع کلی	۶۶/۰ متر
طول پایه	۶۷/۹۷ متر
طول مهاربند بالایی	۲۰/۰۷ متر
طول مهاربند میانی	۲۸/۹۴ متر
طول مهاربند پایینی	۳۷/۱۸ متر
طول مهاربند افقی بالایی	۱۴/۵۸ متر
طول مهاربند افقی میانی	۲۲/۲۴ متر
طول مهاربند افقی پایینی	۳۱/۱۳ متر
ضخامت مهاربند	۰/۰۳ متر
ضخامت پایه	۰/۰۴ متر
قطر مهاربند	۰/۹۰ متر
قطر پایه	۱/۸۰ متر

## ۶- اعمال آسیب فرضی بر روی سازه و تعریف سناریوهای مختلف آسیب

به منظور شناسایی آسیب در سازه، برنامه‌ای به روش المان محدود در محیط MATLAB پیاده‌سازی گردید. با توجه به کاهش مشخصات مصالح سازه در صورت آسیب‌دیدگی، آسیب

به طور کلی، آسیبهای موضعی سبب کاهش سختی سازه شده و بر جرم سازه تاثیر چندانی نمی‌گذارند. بنابراین، جرم سازه پیش و پس از آسیب باید یکسان باشد، به طوری که  $M = M^*$  است. با ضرب رابطه ۱۶ در  $\phi_i^T$  و معادله ۱۷ در  $\phi_i^{*T}$  خواهیم داشت:

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

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

در صورت یکسان بودن مصالح تشکیل دهنده، تمام اعضاء سازه سالم دارای مدول الاستیسیته یکسانی هستند، به طوری که  $E_j = E \quad \text{for } j=1,2,\dots,ne$ . با ضرب رابطه ۱۴ در  $E$  خواهیم داشت:

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

وقتی خرابی به صورت موضعی رخ می‌دهد، رابطه تقریبی  $S_i^* = \phi_i^{*T} K^* \phi_i^* \approx \phi_i^{*T} K \phi_i^*$  برقرار است. بنابراین شاخص خرابی  $Stubbs$  را می‌توان 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:

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

مجدداً می‌توان با استفاده از رابطه ۱۷، شاخص فوق را نرمالیزه نمود.

### تخمین شدت آسیب

شدت آسیب را می‌توان مستقیماً از معادله ۱۱ تعیین نمود. چنانچه نسبت تغییرات در سختی عضو  $j$  را با  $\alpha_j$  نشان دهیم به‌طوریکه  $\alpha_j \geq -1$  باشد، طبق تعریف داریم:

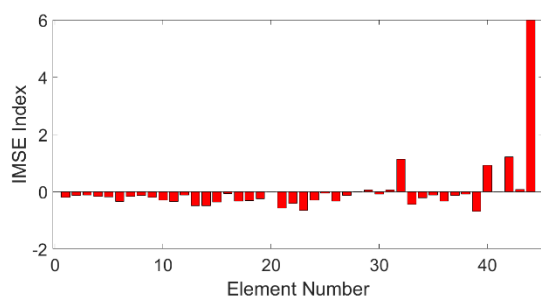
$$E_j^* = E_j (1 + \alpha_j) \quad (23)$$

با ترکیب معادلات ۱۱ و ۱۶ خواهیم داشت:

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

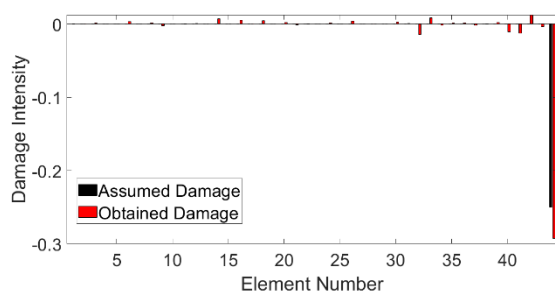


## الف



## ب

شکل ۵ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص‌های الف) استابنس و ب) بهبودیافته در سناریوی اول.



شکل ۶ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی اول

## سناریوی دوم:

در این سناریو، المان شماره ۳۴ به میزان ۱ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در شکل ۷ و نمودار شدت آسیب در این سناریو در شکل ۸ ترسیم شده است. همانطور که شکل ۷ نشان می‌دهد مجدداً روش اصلاح شده نتایج مناسبتری را نسبت به شاخص استابنس ارائه نموده است، به طوری که میزان خطا در روش شاخص استابنس برابر با ۶/۴۲٪ و در روش شاخص بهبود یافته برابر با ۴/۲۹٪ می‌باشد. شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که روش انرژی کرنشی مودال با دقت مناسبی شدت آسیب کم (۱٪) را در عضو پایه واقع در ناحیه پاشش آب تعیین نموده است، به نحوی که میزان اختلاف نتایج برابر ۰/۰۳٪ بوده 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.

## سناریوی سوم:

در این حالت، فرض می‌شود که عضو شماره ۴۰ به عنوان یکی از اعضای مورب واقع در منطقه پاشش به میزان ۱۰ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در این سناریو در شکل ۹ و نمودار شدت آسیب در شکل ۱۰ ترسیم گردیده است. شکل ۹ نشان دهنده بهبود دقت مکان‌یابی آسیب با استفاده از روش اصلاح شده نسبت به شاخص استابنس است، به نحوی که میزان خطا در روش شاخص استابنس برابر با ۵/۸۵٪ و در روش شاخص بهبود

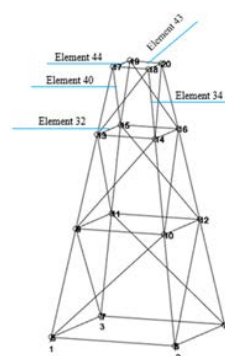
فرضی با کاهش مودول الاستیسیته المان اعمال می‌گردد. سپس با تعریف سناریوهای مختلف آسیب های تکی و چندتایی، به بررسی روش انرژی کرنشی مودال پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است، در تعریف سناریوها سعی شده است که اعضای واقع در ناحیه پاشش و عرشه سکو مورد آسیب قرار گیرند. جدول ۲ سناریوهای مختلف آسیب را نشان می‌دهد.

جدول ۲- سناریوهای مختلف آسیب به سکوی شابلونی چهارپایه

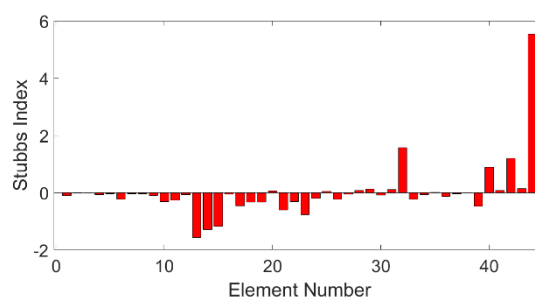
شماره سناریو	شماره المان	میزان آسیب
۱	۴۴	٪۲۵
۲	۳۴	٪۱
۳	۴۰	٪۱۰
۴	۳۲	٪۱۰
۵	۳۴ و ۴۳	٪۱۰ و ٪۲۰

## سناریوی اول:

در این حالت، فرض می‌شود که عضو شماره ۴۴ به میزان ۲۵ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در شکل ۵ و شدت آسیب در شکل ۶ ترسیم گردیده است. همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد، روش انرژی کرنشی مودال با دقت بالایی قادر به تعیین مکان آسیب در سازه سکو بوده است. میزان خطای تشخیص مکان آسیب با استفاده از روش شاخص استابنس برابر با ۵/۷۸٪ و برای شاخص بهبود یافته برابر با ۴/۸۹٪ می‌باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد روش انرژی کرنشی مودال با دقت بسیار بالایی شدت آسیب در عرشه را برای شدت آسیب بالا (۲۵٪) پیش‌بینی نموده است، به طوری که میزان اختلاف نتایج در این سناریو برابر با ۰/۶٪ بوده است.

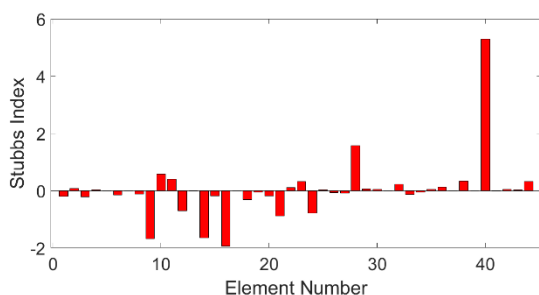


شکل ۴ مدل ساخته شده سکوی JX در متلب و المانهای فرضی آسیب دیده.

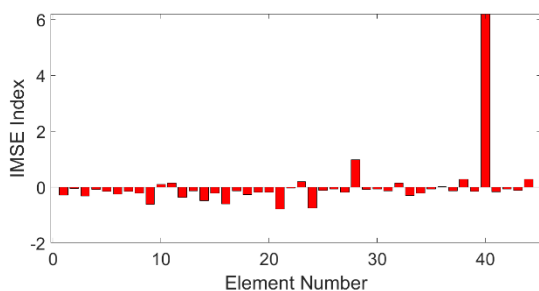




شکل ۸ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی دوم

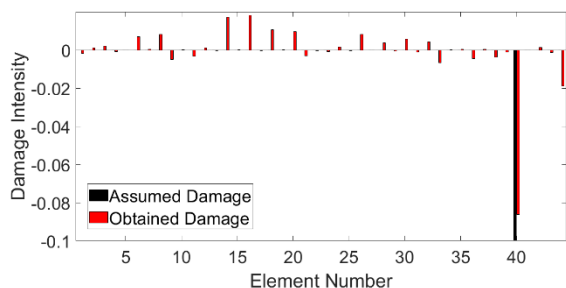


الف

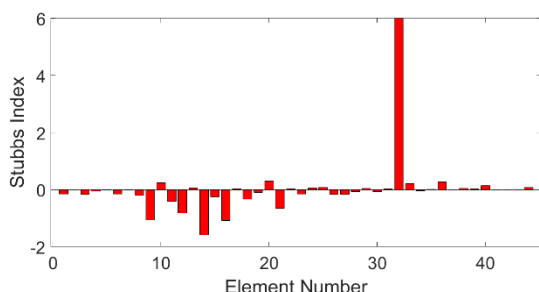


ب

شکل ۹ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص‌های الف) استنباس و ب) بهبود یافته در سناریوی سوم



شکل ۱۰ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی سوم

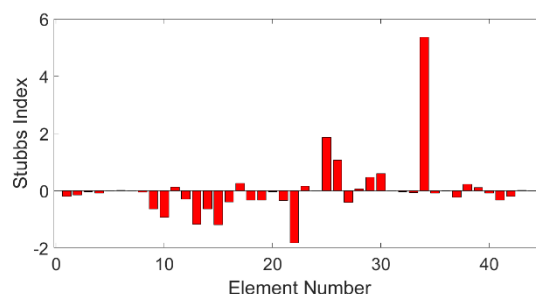


الف

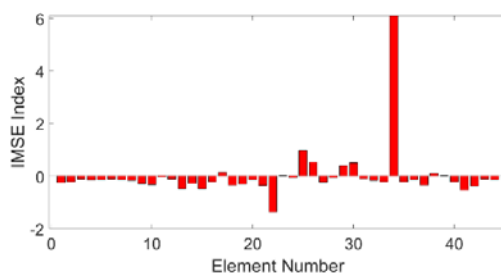
یافته برابر با ۳/۸۳٪ می‌باشد. شکل ۱۰ نیز نشان می‌دهد که روش انرژی کرنشی مودال برای اعضای مهاربند واقع در ناحیه پاشش نیز محل و شدت آسیب را با دقت مناسبی پیش بینی نموده است، به‌طوریکه میزان اختلاف نتایج در این حالت برابر با ۰/۰۸۹۴٪ است.

#### سناریوی چهارم:

در این حالت، فرض می‌شود که عضو شماره ۳۲، به عنوان یکی از اعضای افقی واقع در منطقه پاشش به میزان ۱۰ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در شکل ۱۱ و نمودار شدت آسیب در شکل ۱۲ ترسیم گردیده است. مجدداً شکل ۱۱ نشان دهنده بهبود قابل توجه پیش‌بینی مکان آسیب با استفاده از روش اصلاح شده بوده، میزان خطا در روش شاخص استنباس برابر با ۳/۵۳٪ و در روش شاخص بهبود یافته برابر با ۲/۶۶٪ می‌باشد. شکل ۱۲ روش انرژی کرنشی مودال با دقت مناسبی قادر به پیش بینی محل و شدت آسیب وارده بر اعضای افقی واقع در ناحیه پاشش آب بوده است، میزان اختلاف نتایج در این حالت برابر با ۰/۰۹۳٪ می‌باشد.

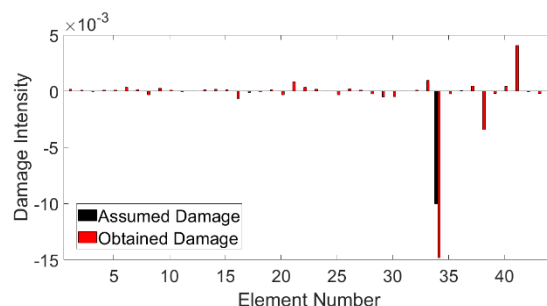


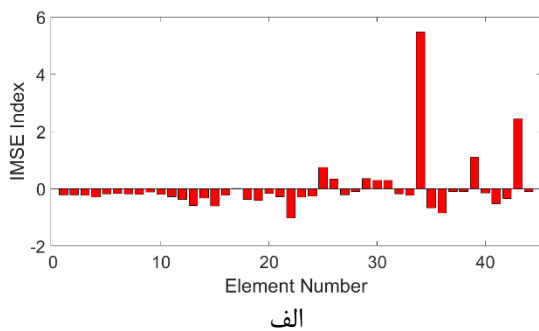
الف



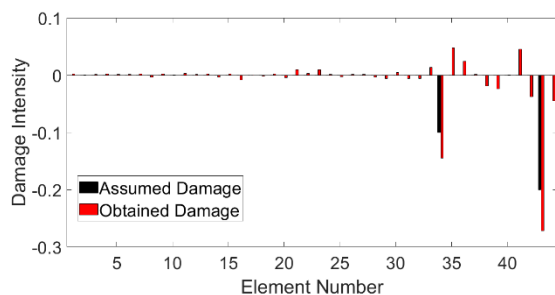
ب

شکل ۷ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص‌های الف) استنباس و ب) بهبود یافته در سناریوی دوم





شکل ۱۳ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص‌های الف)  
استابس و ب) بهبود یافته در سناریوی پنجم.



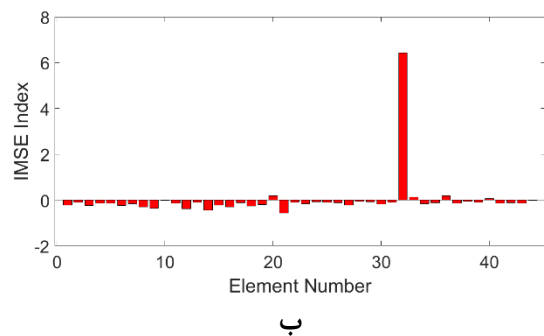
شکل ۱۴ تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در  
سناریوی پنجم

#### ۷- نتیجه گیری

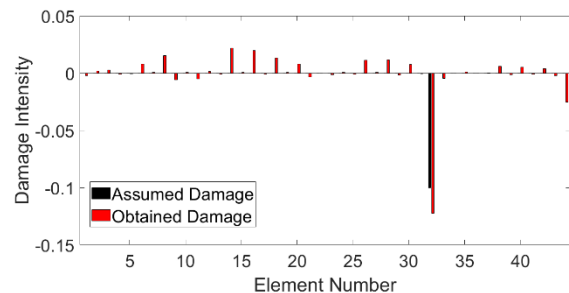
با نزدیک شدن به عمر مفید بهره‌برداری در توربین‌های بادی دور از ساحل، نیاز به پایش سلامت آنها برای شناسایی مکان و شدت آسیب‌های احتمالی وارده در زیر سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از میان تمامی قسمت‌های زیر سازه، پایش سلامت عرشه سکو با توجه به اینکه محل اتصال زیر سازه و سازه اصلی توربین بادی بوده و همچنین ناحیه پاشش آب که به دلیل تر و خشک شدن پی‌ایی، بیش از سایر اعضا در معرض آسیب‌های ناشی از خوردگی قرار دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این تحقیق، با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال که یکی از مناسبترین روش‌های شناسایی غیر مخرب آسیب در سازه‌ها است، به شناسایی آسیب‌های تکی و چندگانه با شدت‌های کم و زیاد در یکی از متداول توربین‌های بادی دور از ساحل، سکوی شابلونی که به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده، پرداخته شد و نتایج دو روش شاخص استابس و روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج زیر از این تحقیق بدست آمد:

۱- روش انرژی کرنشی مودال می‌تواند با دقت قابل قبولی شدت و مکان آسیب را مستقل از بزرگ یا کوچک بودن آن در زیر سازه‌های توربین بادی فراساحلی شناسایی نماید.

۲- این روش در شناسایی آسیب در عرشه و ناحیه پاشش که از اهمیت بیشتری نسبت به سایر اعضای سکو برخوردار بوده و از



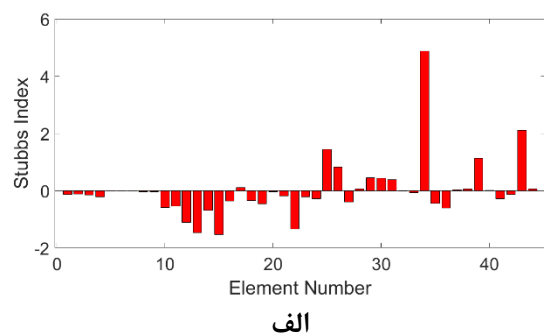
شکل ۱۱ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص‌های الف)  
استابس و ب) بهبود یافته در سناریوی چهارم



شکل ۱۲ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش  
انرژی کرنشی مودال در سناریوی چهارم

#### سناریوی پنجم

در این سناریو، المانهای شماره ۳۴ و ۴۳ (عضو پایه واقع در ناحیه پاشش و عضو افقی واقع در عرشه) به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد دچار آسیب شده‌اند. نتایج شاخص آسیب در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مجدداً استفاده از روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده منجر به بهبود نتایج مکان‌یابی آسیب شده است. میزان خطای روش شاخص استابس در این حالت برابر با ۸/۸۶٪ و میزان خطای روش بهبود یافته برابر با ۶/۸۸٪ می‌باشد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که روش انرژی کرنشی مودال دقت بالایی در تعیین شدت آسیب‌های چندتایی دارد، به نحوی که میزان اختلاف نتایج برابر با ۰/۹۲٪ است.



الف)

- [5] S. W. Doebling, C. F. Farrar, M. B. Prime and D. W. Shevits, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review," Los Alamos National Laboratory, USA, 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 nondestructive damage localization and severity estimation algorithm," in *Proceedings-SPIE the international society for optical engineering*, 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] A. 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.

اهداف اصلی این تحقیق هستند، دارای عملکرد مناسبی است ولی در اعضای نزدیک به بستر دقت آن کاهش می‌یابد.

۳- روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده با دقت بالاتری، مکان آسیب را در سازه شناسایی می‌نماید و در تمامی اعضا (اعم از اعضای نزدیک به عرشه و نزدیک به بستر) با خطای کمی محل و شدت آسیب را تشخیص می‌دهد. لذا استفاده از این روش به جای روش شاخص استابس توصیه می‌شود.

۴- در حالتی که آسیب در چند عضو داشته باشیم، ممکن است علاوه بر المان‌های آسیب دیده، المان‌های سالمی که در مجاورت المان‌های آسیب دیده قرار دارند نیز رفتار مشکوکی از خود نشان دهند و شاخص آسیب آن‌ها مقداری بیشتر از واحد باشد. در اینجا نیز روش اصلاح شده نتایج بهتری را نسبت به روش معمول نشان می‌دهد.

به دلیل متداول تر بودن زیرسازه شابلونی چهارپایه توربین بادی فراساحلی، در تحقیق حاضر این سازه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. اما زیرسازه سه پایه (تریپاد) نیز کاربردهای خاص خود را دارد. از آنجاییکه هندسه و عمق کاربری این نوع سازه با سکوی شابلونی چهارپایه متفاوت است و در تحلیل‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند، بررسی آن در تحقیق جداگانه‌ای توصیه می‌گردد. همچنین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی نقش روییدنی‌های دریایی در شناسایی محل و شدت آسیب در سازه های دریایی بررسی گردند.

#### ۸- کلید واژگان

- 1- Compression Modal Strain Energy Change Ratio
- 2- Flexural Modal Strain Energy Change Ratio

#### ۹- مراجع

- [1] [Online]. Available: <https://gwec.net/record-6-1-gw-of-new-offshore-wind-capacity-installed-globally-in-2019/>.
- [2] R. Rolfes, S. Zerbst, G. Haake, J. Reetz and J. P. Lynch, "Integral SHM-system for offshore wind turbines using smart wireless sensors," in *6th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, 2007.
- [3] C. P. Fritzen, "Vibration-Based Techniques for SHM," in *Structural Health Monitoring*, 2006, pp. 45-224.
- [4] C. Bouty, S. Schafhirt, L. Ziegler and M. Muskulus, "Lifetime extension for large offshore wind farms: Is it enough to reassess fatigue for selected design positions?," *Energy Procedia*, vol. 137, pp. 523-530, 2017.

- [28] 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.
- [29] M. Martinez-Luengo, A. Kolios and L. Wang, "Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the statistical pattern recognition paradigm," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 91-105, 2016.
- [30] C. U. Nguyen, T. C. Huynh and J. T. Kim, "Vibration-based damage detection in wind turbine towers using artificial neural networks," *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 5, pp. 507-519, 2018.
- [31] W. Weijtjens, T. Verbelen, E. Capello and C. Devriendt, "Vibration based structural health monitoring of the substructures of five offshore wind turbines," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 2294-2299, 2017.
- [32] E. Lozano-Minguez, A. J. Kolios and F. P. Brennan, "Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2831-2837, 2011.
- [33] H. Bailey, K. L. Brookes and P. M. Thompson, "Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future," *Aquatic Biosystems*, vol. 10, pp. 1-13, 2014.
- [34] HSE, Offshore hydrocarbon release statistics and analysis 1992-2015, Bootle, UK: Health and Safety Executive, 2016.
- [35] R. E. Melchers, "Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, pp. 1484-1493, 2003.
- [36] J. C. Velaquez, J. M. Van Der Weide, E. Hernandez and H. H. Hernandez, "Statistical Modeling of Pitting Corrosion: Extrapolation of the maximum pit depth-growth," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 9, pp. 4129-4143, 2014.
- [37] J. K. Paik and R. E. Melchers, Corrosion wastage in aged structures, 1st ed., Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2008.
- [38] I. W. Chen, B. L. Wong, Y. H. Lin, S. W. Chau and H. H. Huang, "Design and analysis of jacket substructures for offshore wind turbines," *Energies*, vol. 9, pp. 1-24, 2016.
- [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] H. Z. Yang, H. J. Li and S. Q. Wang, "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] S. Wang and H. Li, "Modal strain energy for damage detection of offshore jacket structures from partial modal information: Experimental validation," in *Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, California, USA, 2006.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.