

## Damage location and intensity detection in tripod jacket substructure of wind turbine using improved modal strain energy and genetic algorithm

Seyed Reza Samaei<sup>1</sup>, Madjid Ghodsi Hassanabad<sup>2\*</sup>

1- PhD student, Department of Civil Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

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

### ABSTRACT

The foundation of offshore wind turbines has various structures at different depths of the sea. At depths between 30 and 50 meters, jacket substructure is recommended as an economical solution for offshore wind turbines. During their life cycle, the substructures of offshore wind turbines are exposed to a couple of damage sources which can reduce their service life. This problem became more severe in sensitive areas such as deck, joints, or splash zone that are prone to failure. Modal strain energy (MSE) method is one of the non-destructive and practical methods in which the location and the severity of the damage is determined using changes in the dynamic properties of the structure. In recent years, some modifications have been made to the original version of this method, one of which is to consider modal frequencies in determining the location of damage. In this paper, the damage location and its severity are identified for members located in deck and splashing zone in tripod substructure of wind turbine using improved modal strain energy method (IMSE). The results showed that the improved method is more accurate in locating the damage than the original method (Stubbs index). Also, single and multiple damages, both with low and high intensity, were predicted with this method with appropriate accuracy.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 08 July 2021

**Revise Date:** 18 September 2021

**Accept Date:** 01 November 2021

**Keywords:** *Offshore wind turbine, Damage detection, Improved modal strain energy, Stubbs index.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2021.294103.2488

\*Corresponding author: MadjidGhodsi Hassanabad

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

## شناسایی محل و شدت آسیب در زیرسازه شابلونی سه پایه توربین بادی دور از ساحل با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته و الگوریتم ژنتیک

سید رضا سمائی<sup>۱</sup>، مجید قدسی حسن آباد<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، گرایش سواحل، بنادر 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

### چکیده

پایه توربین های بادی فراساحلی در اعماق مختلف دریا سازه های متنوعی دارند. در اعماق بین ۳۰ تا ۵۰ متری، استفاده از زیرسازه جکت به عنوان یک راه حل اقتصادی برای توربین های بادی فراساحلی توصیه شده است. در طی عمر سرویس سازه، زیرسازه توربین های بادی دور از ساحل در معرض آسیب هایی هستند که می تواند عمر سرویس آنها را کاهش دهد. این مشکل در نواحی حساس نظیر عرشه، اتصالات یا ناحیه پاشش که بیشتر در معرض آسیب هستند شدیدتر می شود. روش انرژی کرنشی مودال، یکی از روش های غیر مخرب و کاربردی است که در آن با استفاده از تغییر در خصوصیات دینامیکی سازه به شناسایی مکان و تعیین شدت آسیب در سازه پرداخته می شود. در سالیان اخیر، اصلاحاتی بر نسخه اولیه این روش صورت گرفته که یکی از آنها، در نظر گرفتن فرکانس های طبیعی در تعیین شدت آسیب است. در این مقاله با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته و با در نظر گرفتن فرکانس های طبیعی در تعیین مکان آسیب، به شناسایی مکان و تعیین شدت آسیب در اعضای واقع در عرشه و ناحیه پاشش آب در زیرسازه تریپاد توربین بادی فراساحلی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که روش بهبود یافته دقت بالاتری در مکان یابی آسیب نسبت به روش اولیه (شاخص استابس) دارد. همچنین، آسیب های تکی و چندگانه، با شدت کم و زیاد، توسط این روش با دقت مناسبی پیش بینی گردید. همچنین بکارگیری الگوریتم ژنتیک در تعیین شدت آسیب، باعث شد شدت آسیب ها در اعضاء با دقت بسیار خوبی به دست آیند.

کلمات کلیدی: توربین بادی دور از ساحل، شناسایی آسیب، انرژی کرنشی مودال بهبود یافته، شاخص استابس.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۰/۴/۱۷	۱۴۰۰/۶/۲۷	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۱/۴/۰۱	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2021.294103.2488">https://doi.org/10.22065/jsce.2021.294103.2488</a>
*نویسنده مسئول:		مجید قدسی حسن آباد			
پست الکترونیکی:		<a href="mailto:m.ghodsi@srbiau.ac.ir">m.ghodsi@srbiau.ac.ir</a>			

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر نظیر انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و ... به یک ضرورت تبدیل شده است. انرژی بادی یکی از مهمترین منابع انرژی تجدیدپذیر است که در کشورهای مختلف توسعه فراوانی یافته است. استفاده از انرژی باد دریایی 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، به عنوان یک گزینه مناسب برای تولید انرژی مطرح است. بر اساس گزارش انجمن جهانی انرژی باد (GWEC)، ظرفیت کلی نصب شده در دنیا تا سال ۲۰۱۹ برابر با ۲۹ گیگاوات بوده و با ظهور بازارهای جدید برای انرژی بادی فراساحلی در ایالات متحده، تایوان، ژاپن، ویتنام و کره جنوبی پیش بینی می‌شود که بیش از ۵۰ گیگاوات ظرفیت انرژی بادی فراساحلی جدید در بین سالهای ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ نصب گردد [۱].

افزایش عمر سازه‌ها در کنار طبیعت غیرقابل پیش‌بینی بارها و احتمال طراحی ضعیف اعضا، سبب کاهش کارایی سازه‌ها می‌شود. سازه‌های دریایی و از جمله توربین‌های بادی دور از ساحل در طول عمر بهره‌برداری خود دائماً در معرض نیروهای محیطی قرار دارند. از زمان نصب اولین توربین‌های بادی فراساحلی در دریا نزدیک به سی سال می‌گذرد. توربین‌های بادی به طور معمول برای عمر بین ۲۰ تا ۲۵ سال طراحی شده [۲] و پس از چند سال، امکان وقوع آسیب‌های سازه‌ای در آنها افزایش می‌یابد. بارهایی که در طی ساخت و بهره‌برداری به سازه وارد می‌شوند، سبب ایجاد خرابی‌های جزئی و کلی در آن می‌شوند. دسترسی‌پذیری کمتر 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 شده است. برای نیروگاه‌های واقع در خشکی، تمرکز اصلی بر پایش قسمت ماشین، به ویژه یاتاقان پره و چرخ دنده‌ها و نیز پره‌های روتور قرار دارد. در حالیکه برای توربین‌های بادی دور از ساحل، پایش زیر سازه نیز از اهمیت زیادی برخوردار است [۳]. زیرسازه به عنوان بخش اصلی تکیه‌گاهی توربین بادی فراساحلی به طور مداوم در طی عمر بهره‌برداری 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 توأم است که به طور پیوسته افزایش یافته و می‌تواند به عنوان یک تهدید جدی برای سازه محسوب شود. تأثیر 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. بر طبق تحقیقات پیشین، توربین‌های بادی می‌توانند تا پنج بار در سال تحت تاثیر آسیب‌های پیش بینی نشده قرار گیرند. علی‌الخصوص در شرایط بد آب و هوایی، دسترسی به توربین‌های بادی دریایی به منظور انجام بازرسی چشمی دشوار است. در نتیجه، دوره‌های طولانی از کار افتادن توربین می‌تواند منجر به ضررهای اقتصادی بزرگی شود که سبب کاهش قابلیت استفاده از این فناوری در بلند مدت می‌شود. 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 [۴]. به این منظور، زمینه‌های تحقیقاتی جدیدی در کاربرد پایش سلامت توربین‌های بادی فراساحلی ایجاد شده‌اند.

یک روش مورد استفاده در پایش سلامت سازه‌ها، بازرسی چشمی است که منجر به حصول اطلاعات مهمی در مورد سلامت سازه می‌گردد که شرایط دریا این نوع بازرسی را برای پایه توربین بادی ناممکن می‌سازد. همچنین با این روش تشخیص خرابی‌های داخلی و منشأ آن‌ها امکان‌پذیر نیست. بنابراین استفاده از روش‌های غیر مخرب شناسایی آسیب برای افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود پیشنهاد می‌گردد. 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 [۵، ۶]. 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 [۷]

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 [۸]. شهریور 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 ارتعاشی 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 گرفته و مشخص شد که آنها متفاوت از اثرات آسیب هستند [۹]. 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 [۱۰]. 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 [۱۱]. 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 [۱۲]. کیم و استابز (۱۹۹۵ و ۱۹۹۶) استفاده از روش شاخص خرابی مبتنی بر انرژی کرنشی مودال را برای سازه‌های تیر مانند پیشنهاد داده، کارایی این روش را بر روی یک پل فولادی بررسی نموده و به درستی موفق به شناسایی مکان آسیب شدند [۱۳، ۱۴]. سالوو (۱۹۹۷) مطالعه‌ای 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 موثر باشد [۱۵]. 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 [۱۶]. کیم و استابز (۲۰۰۲) شاخص خرابی بهبود یافته‌ای را به منظور بهبود دقت شناسایی آسیب در سازه‌های با اعضای زیاد توسعه داده و کارایی آن را بر روی یک تیر دو دهانه آزمایش نمودند [۱۷]. 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 [۱۸]. 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 سازه‌های دریایی بر اساس بارهای محیطی مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. 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 [۲۰]. 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 [۲۱]. هو و وو (۲۰۰۹) شاخص آسیب را برای شناسایی آسیب در ورقها بر اساس روش انرژی کرنشی مودال توسعه دادند [۲۲]. سیدپور (۲۰۱۲) یک روش دو مرحله‌ای را برای شناسایی دقیق موقعیت و شدت آسیب‌های چند گانه در سیستمهای سازه‌ای 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 ازدحام ذرات با استفاده از نتایج مرحله اول تعیین گردید [۲۳]. 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 [۲۴]. 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 دهانه‌ای 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 گره‌ها به راحتی شناسایی

مکان آسیب امکان پذیر است [۲۵]. 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 [۲۶]. 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 پایه های توربین بادی است، چرا که سایر روشها بسیار پرهزینه، با بلوغ کم یا دقت ناکافی هستند [۲۷]. انگوین و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی مبتنی بر ارتعاش به شناسایی آسیب در برجهای توربین بادی پرداختند [۲۸].

بررسی جامع پیشینه تحقیق فوق، 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 زیر سازه تریپاد توربین بادی فراساحلی به روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته پرداخته خواهد شد. موضوع قابل توجه این که 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. همچنین در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چندهدفه نیز برای محاسبه شدت آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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

تاکنون، بیشتر زیرسازه‌های استفاده شده برای توربینهای بادی دور از ساحل از نوع مونوپایل بوده‌اند که بیش از ۸۰ درصد کل ظرفیت توربینهای بادی تا سال ۲۰۱۶ را شامل می‌شوند. در سال ۲۰۱۶ به‌تنهایی در ۸۸ درصد از توربینهای جدید از فونداسیون مونوپایل و در ۱۲ درصد دیگر از جکتهای چهارپایه و تریپاد استفاده شده است 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 [۲۸]. در این قسمت به مرور انواع متداول زیرسازه‌های استفاده شده در توربینهای بادی دور از ساحل پرداخته می‌شود.

### مونوپایل

این نوع زیر سازه توربین بادی دارای طراحی ساده‌ای بوده و از سازه‌ای لوله ای 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 [۲۹].

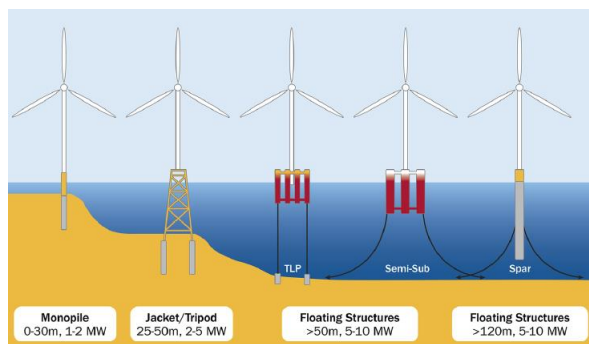
### تریپاد

تریپاد متشکل از یک سازه سه پایه است که از لوله های فولادی استوانه‌ای تشکیل شده است. این سازه بیشتر برای اعماق آب ۲۵ تا ۵۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹].

### جکت

جکت متشکل از سازه حداقل چهارپایه‌ای است که از لوله‌های فولادی استوانه تشکیل شده است و مانند تریپاد برای عمق آب ۲۵ تا ۵۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱) [۲۹].

<sup>1</sup> Splash zone



شکل ۱ انواع فونداسیون موجود برای توربینهای بادی دور از ساحل [۲۹]

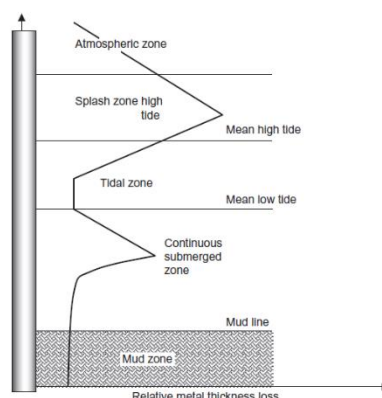
### ۳- آسیب ناشی از خوردگی در زیرسازه توربین بادی

در این قسمت، خوردگی به عنوان مهمترین عامل آسیب در زیر سازه های توربین بادی دریایی مورد بررسی قرار می گیرد. 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 می شود، یک خطر بالقوه برای سازه ها 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 می تواند 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 شده و در نتیجه بر ظرفیت اقدامات مهاری اثر گذار باشد. خوردگی می تواند به کاهش ایمنی سازه، افزایش هزینه های تعمیر و زمان خاموشی برنامه ریزی نشده به دلیل تعمیرات سکو یا سایر عواقب وخیم منجر شود. بر مبنای اطلاعات آماری موجود در مورد سکوهای 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 [۳۱].

به منظور تخمین زوال فولاد و در نتیجه کاهش سختی سازه در آب دریا، توصیف خوردگی در محیط دریایی خورنده و متغیرهای آن ضروری است. تخریب ناشی از خوردگی می تواند به نحو 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 می شود، ولی این انواع حفاظت به برخی دلایل، دارای تاثیر کامل نبوده و خوردگی سبب زیانهای اقتصادی فراوانی می شود [۳۲]. بر طبق آمار موجود در منابع علمی، سالانه تقریباً تا ۱۱٪ ذخیره آهن به دلیل خوردگی از بین می رود که برابر با ۳۰٪ تولید سالانه است. سازمان جهانی خوردگی (WCO) گزارش داده است که هزینه تخمینی خوردگی در حدود ۲٫۴ تریلیون دلار آمریکا در سال است [۳۳]. هزینه اقتصادی تمام انواع خوردگی تقریباً ۴٪ از تولید ناخالص ملی ایالات متحده است [۳۴]. خوردگی فولاد در آب دریا از یک توزیع عمودی مشخصه تبعیت می کند 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 می دهد. در ناحیه به اصطلاح پاشش که در آن سازه به طور مرتب در معرض تر و خشک شدن قرار داشته و فیلم محافظ خوردگی به صورت مداوم شسته می شود، نرخ خوردگی بیشترین مقدار خود را که شاید سه تا پنج برابر حالتی است که سازه فقط در معرض اتمسفر قرار دارد، دارا می باشد. دقیقاً در زیر علامت بزرگترین جزر و مد، خوردگی به نزدیک مینیمم کاهش می یابد، چرا که این ناحیه تا حدی توسط یک اثر سلول تجمع اکسیژن محافظت می شود. با این وجود، در برخی از سازه ها، به غیر از شمعهای عمودی، حمله خوردگی ممکن است در این ناحیه شدید باشد. این نرخ دوباره در بخش مغروق پیوسته شمع، علی الخصوص در لایه های بالایی که حاوی مقدار زیادی اکسیژن حل نشده است یا وقتی جریانهای شدید برای تسریع اثر گالوانیک وجود دارد، افزایش می یابد. در زیر خطِ گل، خوردگی به حداقل می رسد، چرا که هیچ اکسیژنی در آن وجود نداشته و فیلمهای محافظتی، سالم باقی می ماند. پروفیل خوردگی یک شمع فولادی در آب دریا در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می دهد، بیشترین میزان خوردگی در ناحیه پاشش رخ می دهد.

## 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 تأثیری نمی‌گذارد.



شکل ۲ پروفیل خوردگی یک شمع فولادی پس از ۵ سال قرار گرفتن در محیط دریایی [۳۵]

در یک سازه خطی بدون آسیب، با NE المان و N گره،  $i$  امین سختی مودال سازه از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۷].

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

که در این رابطه،  $\phi_i$  امین بردار شکل مود سازه و  $C$  ماتریس سختی سازه است. مشارکت  $i$  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:

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

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:

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

مقادیر  $C_j$  و  $C_j^*$  از رابطه زیر بدست می آیند:

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

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

که  $E_j^*$  و  $E_j$  به ترتیب برابر مشخصات سختی مصالح (مدول الاستیسیته) ژامین المان در حالت سالم و آسیب دیده می باشد و  $C_{j0}$  تنها مشخصات هندسی را در برمی گیرد.  
اگر میزان آسیب در سازه کوچک باشد معادله ۷ برابر واحد خواهد شد در نتیجه:

(۱۰)

$$F_{j0} = F_{j0}^*$$

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، شاخص شناسایی آسیب برای ژامین عضو و  $i$  ژامین مود است. چنانچه  $K_i^* \approx \phi_i^{*T} C_{j0} \phi_i^*$  تنظیم شود، تمام کمیتها در سمت راست (از جمله  $\phi_i^*$  و  $\phi_i$ ) 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 ژامین عضو و  $i$  ژامین شکل مود در صورتی تعیین می شود که  $\beta_{ij} > 1$  باشد. هر چند، چنانچه ژامین عضو در یا در نزدیکی گره  $i$  ژامین 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، ۶ در معادله بالا برای تمام مودهای موجود (NM) و تمام المانها (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 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 [۱۷].

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

### ۵- روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته

در تعیین شاخص خرابی استاباس 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 استاباس، از اطلاعات فرکانس در تعیین شاخص آسیب استفاده نمودند [۳۷]. تحلیل ویژه برای سازه‌های سالم و آسیب دیده را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$K\phi = \omega^2 M\phi \quad (16)$$

$$(17)$$

$$K^* \phi_i^* = \omega_i^2 M^* \phi_i^{*2}$$

در این رابطه،  $M$  و  $M^*$  ماتریسهای جرم سیستم در حالت‌های سالم و آسیب دیده بوده و  $\omega_i$  و  $\omega_i^*$ ، آملین فرکانس مودال در حالات سالم و آسیب دیده هستند.

به طور کلی، آسیبهای موضعی سبب کاهش سختی سازه می‌شوند 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  $\phi_i^T$  و معادله ۱۷ در  $\phi_i^{*T}$  خواهیم داشت:

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

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

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

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

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:

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

در این روابط  $m$  تعداد مودهای ارتعاشی به کار رفته در محاسبات است. در تحقیق حاضر  $m=3$  است. یعنی برای تحلیل آسیب از ۳ مود ارتعاشی متناظر با ۳ فرکانس طبیعی اول سازه استفاده می‌شود. مجدداً می‌توان با استفاده از رابطه ۱۷، شاخص فوق را نرمالیزه نمود، با توجه به فرمول استابیس و روابط اصلاح شده در آن، استفاده از اطلاعات فرکانس در تعیین شاخص آسیب در روابط بهبود یافته، روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته در سازه های مختلف و در تمامی شرایط، نتایج و تحلیل دقیق تری نسبت به فرمول اولیه ارائه می‌دهد [38].

#### ۶- تخمین شدت آسیب

شدت آسیب را می‌توان مستقیماً از معادله ۱۱ تعیین نمود. چنانچه نسبت تغییرات در سختی عضو  $\alpha_j$  را با  $\alpha_j$  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

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

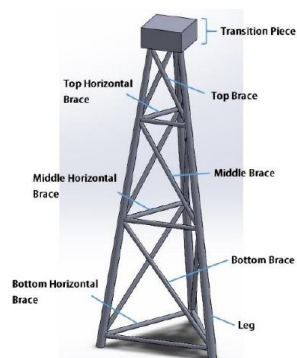
#### ۷- تخمین شدت آسیب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک بر مبنای تعریف ژن‌ها که اولین بار توسط گریگور مندل معرفی شد و به نوعی کدهای اطلاعاتی موجودات زنده هستند، بنا نهاده شده است. مبنای این روش از شاخه‌ای از علوم کامپیوتر به نام «سیستم‌های تطبیقی پیچیده» که توسط جان هلند ابداع شده، استخراج شده است. در این روش ابتدا یک تابع هدف تعریف می‌شود که برازندگی هر فرد یا کروموزوم از جمعیت مورد مطالعه توسط آن سنجیده می‌شود. والدین به طور تصادفی از نسل اول انتخاب می‌شوند و با سه اپراتور بازتولید (Reproduction)، فصل (Crossover) و جهش (Mutation) فرزندان با برازندگی بهتر ایجاد می‌گردند و بدین ترتیب نسل دوم به وجود می‌آید. به همین ترتیب نسل‌های بعدی از نسل قبلی خود به وجود می‌آیند تا بهترین برازندگی با تابع یا توابع هدف حاصل شود. مشخصات هر فرد در جمعیت مورد مطالعه توسط یک کد باینری تعیین می‌شود و میزان برازندگی هر فرد نیز به صورت کمی بیان می‌شود.

در این تحقیق تابع هدف رابطه ۲۴ (تعیین شدت آسیب) در یک یا چند عضو و جمعیت مورد نظر فرکانسهای طبیعی سازه (۷۵ فرکانس) به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شوند. برای آسیبهای تکی از الگوریتم ژنتیک پایه تک هدفه (SGA) و برای آسیب در دو عضو یا بیشتر از الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر الگوی پارتو (PESA-II) برای تعیین شدت آسیب استفاده می‌شود. با توجه به کاهش مشخصات مصالح سازه در صورت آسیب دیدگی، آسیب فرضی با کاهش مدول الاستیسیته المان اعمال می‌گردد.

### ۸- تشخیص مکان و شدت آسیب در سکوی سه پایه توربین بادی

در این قسمت به شناسایی آسیب در زیر سازه تریپاد PJZ (چن و همکاران، ۲۰۱۶) با مهارهای افقی و خمشی پرداخته می‌شود. این سکو که یکی از متداولترین سکوهایی پایه توربین بادی است، دارای ارتفاع ۶۶ متری و مقطع مثلث متساوی الاضلاع است. اطلاعات سکو در جدول ۱ آورده شده است [۳۶]. نمای سکو در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی از سکوی سه پایه ای تحت مطالعه [۳۶]

جدول ۱ مشخصات سکوی سه پایه تریپاد

PJZ	نوع جکت
۶۶ متر	ارتفاع کلی
۶۶٫۸۶ متر	طول پایه
۱۸٫۳۲ متر	طول مهاربند بالایی
۲۶٫۲۳ متر	طول مهاربند میانی
۳۲٫۹۹ متر	طول مهاربند پایینی
۱۱٫۰۷ متر	طول مهاربند افقی بالایی
۱۷٫۲۵ متر	طول مهاربند افقی میانی
۲۴٫۴۱ متر	طول مهاربند افقی پایینی
۰٫۰۳ متر	ضخامت مهاربند
۰٫۰۴ متر	ضخامت پایه
۰٫۹۰ متر	قطر مهاربند
۱٫۸۰ متر	قطر پایه

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

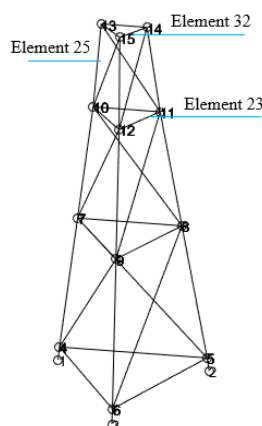
با توجه به کاهش مشخصات مصالح سازه در صورت آسیب دیدگی، آسیب فرضی با کاهش مدول الاستیسیته المان اعمال می گردد. سپس با تعریف سناریوهای مختلف آسیب های تکی و چندتابی، به بررسی روش انرژی کرنشی مودال پرداخته می شود. جدول زیر سناریوهای مختلف آسیب را به صورت مختصر شده نشان می دهد.

جدول ۲- سناریوهای مختلف آسیب به سکوی تریپاد

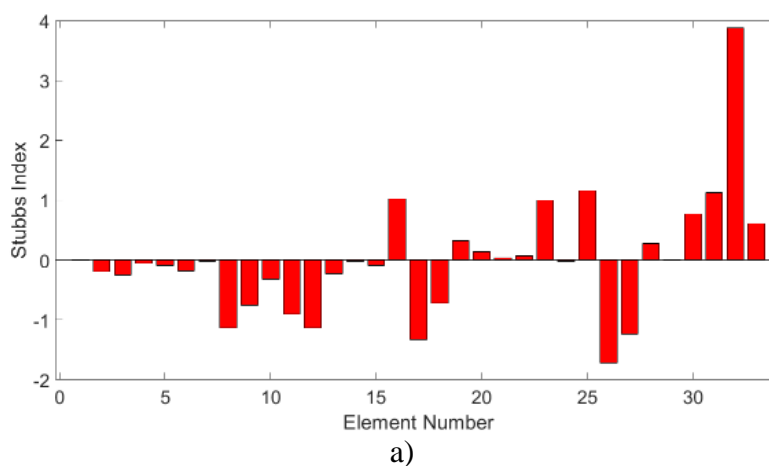
شماره سناریو	شماره المان	میزان آسیب
۱	۳۲	۱۰٪
۲	۳۲	۱٪
۳	۲۳	۱۰٪
۴	۳۲ و ۲۵	۱۰٪ و ۲۰٪

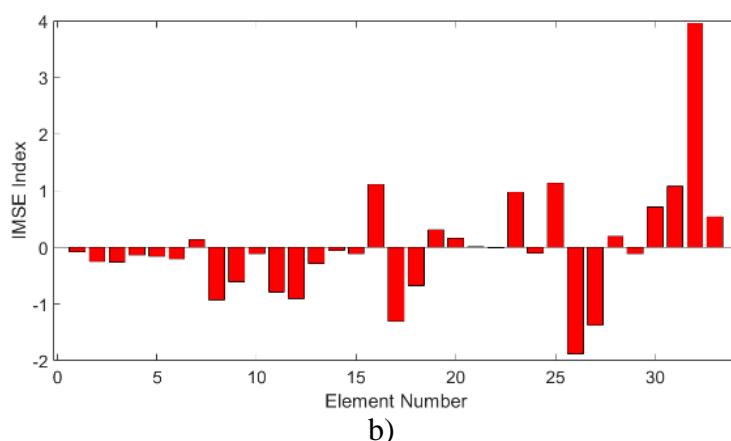
سناریوی اول:

در این سناریو، المان شماره ۳۲ سکوی تریپاد به میزان ۱۰ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در این سناریو در شکل ۵ نشان می دهد که روش بهبود یافته با دقت بیشتری قادر به تعیین محل آسیب است.



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

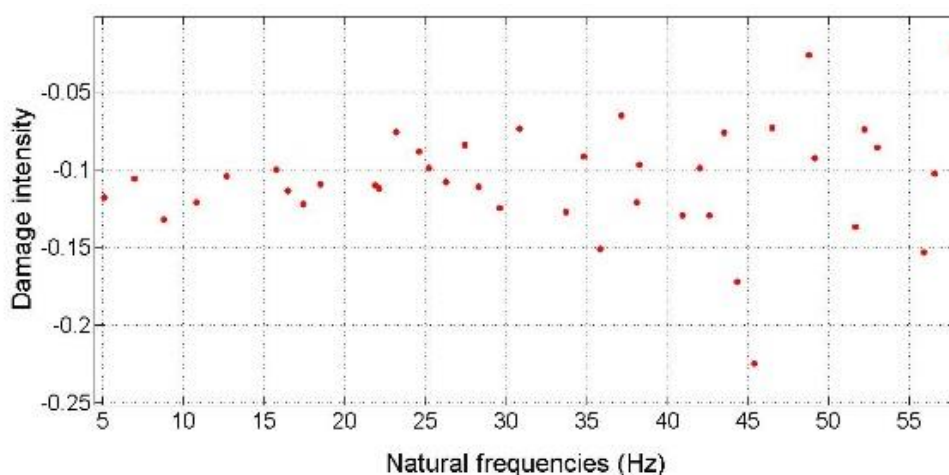




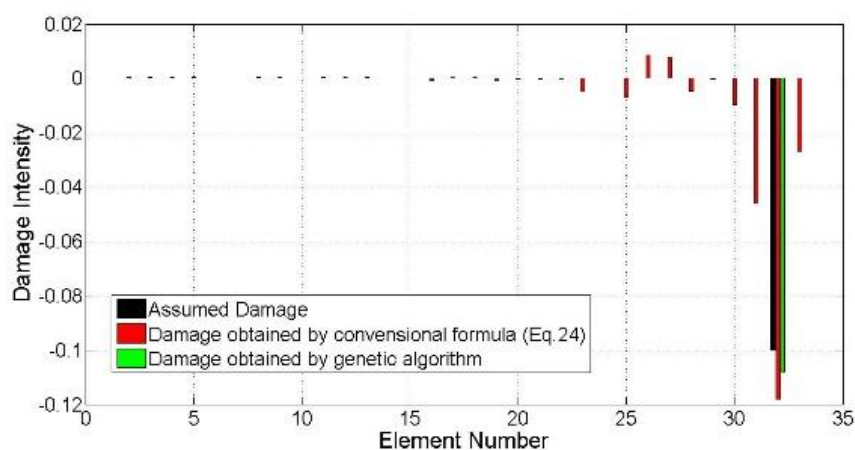
شکل ۵ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص های (a) Stubbs و (b) IMSE در سناریوی اول.

شکل ۶ پارامتر  $\alpha$  (مطابق رابطه ۲۴) یا به عبارتی شدت آسیب را برحسب فرکانسهای طبیعی سازه در سناریوی اول نشان می‌دهد. با بهینه‌یابی شدت آسیب توسط روش الگوریتم ژنتیک، مقدار آسیب ۰/۱۰۷۹ به دست می‌آید. این درحالیست که شدت آسیب در روش انرژی کرنشی مودال ۰/۱۱۸۱ به دست آمده است (شکل ۷). به عبارت دیگر خطای شدت آسیب در روش الگوریتم ژنتیک ۷/۹ درصد و در روش انرژی کرنشی مودال ۱۸/۱ درصد است.

نمودار شدت آسیب در این سناریو در شکل ۷ نشان می‌دهد که روش انرژی کرنشی مودال در کنار الگوریتم ژنتیک، شدت آسیب را برای عضو افقی واقع در عرشه سکوی سه پایه با دقت مناسبی پیش بینی نموده است. برای عضو افقی واقع در عرشه سکوی سه پایه را با دقت مناسبی پیش بینی نموده است.



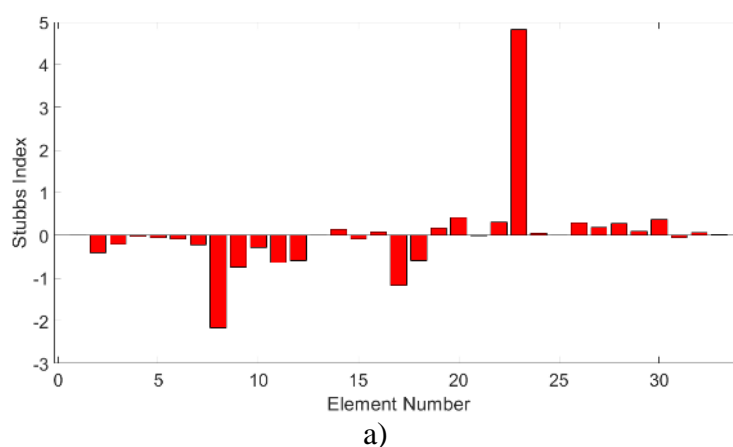
شکل ۶ مقادیر شدت آسیب در فرکانسهای طبیعی سازه در سناریوی اول



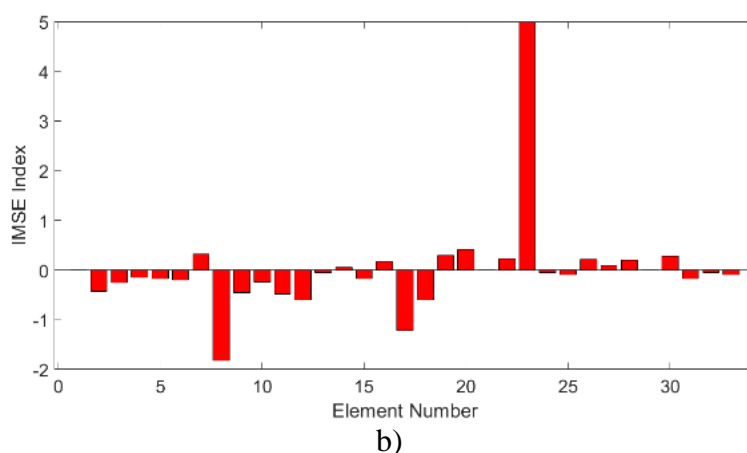
شکل ۷ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی اول

سناریوی دوم:

در این سناریو، المان شماره ۳۲ واقع در عرشه سکوی سه پایه به میزان ۱ درصد دچار آسیب شده است. همانطور که شکل ۸ نشان می‌دهد، محل آسیب کم (۰.۱٪) در روش بهبود یافته با دقت بیشتری مشخص شده است.



a)

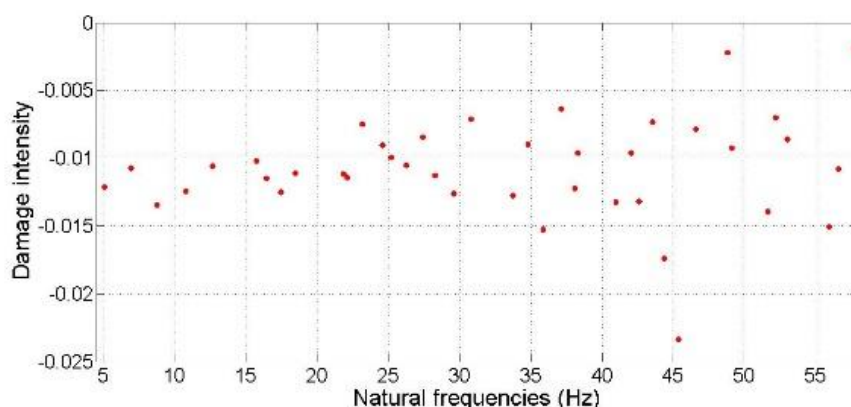


b)

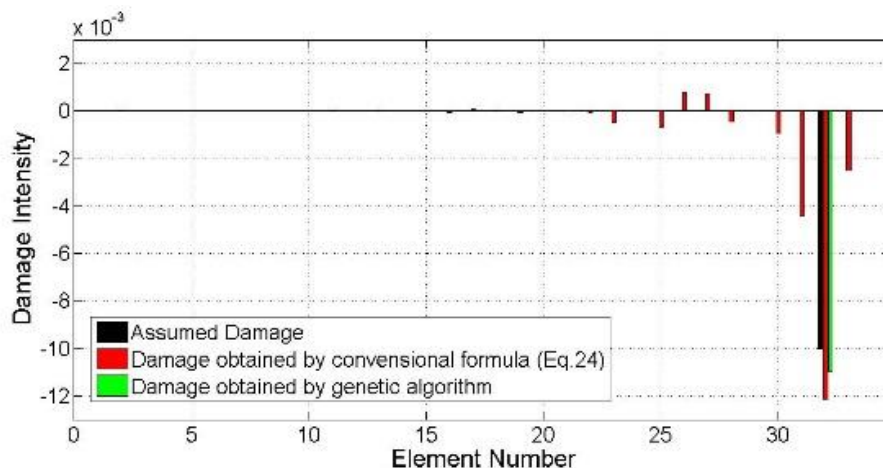
شکل ۸ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص های (a) Stubbs و (b) IMSE در سناریوی دوم

شکل ۹ پارامتر  $\alpha$  (مطابق رابطه ۲۴) یا به عبارتی شدت آسیب را برحسب فرکانسهای طبیعی سازه در سناریوی دوم نشان می‌دهد. با بهینه‌یابی شدت آسیب توسط روش الگوریتم ژنتیک، مقدار آسیب  $0/010966$  به دست می‌آید. این درحالیست که شدت آسیب در روش انرژی کرنشی مودال  $0/0121$  به دست آمده است (شکل ۱۰). به عبارت دیگر خطای شدت آسیب در روش الگوریتم ژنتیک  $9/66$  درصد و در روش انرژی کرنشی مودال  $21$  درصد است.

شکل ۱۰ نیز نشان می‌دهد که شدت آسیب با دقت بسیار مناسبی توسط روش انرژی کرنشی مودال تعیین شده است. بنابراین، روش انرژی کرنشی مودال قادر به شناسایی هر دو نوع آسیب‌های کم و آسیب‌های زیاد است.



شکل ۹ مقادیر شدت آسیب در فرکانس‌های طبیعی سازه در سناریوی دوم

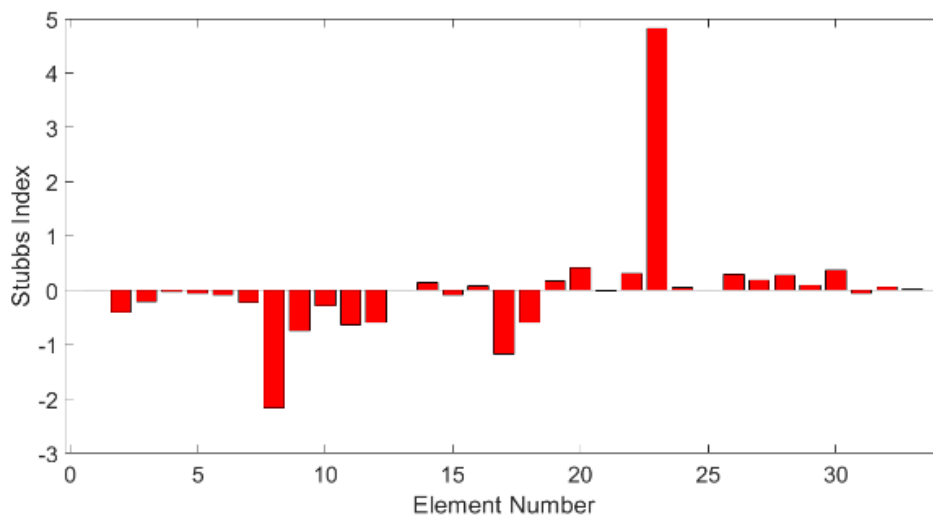


شکل ۱۰ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی دوم

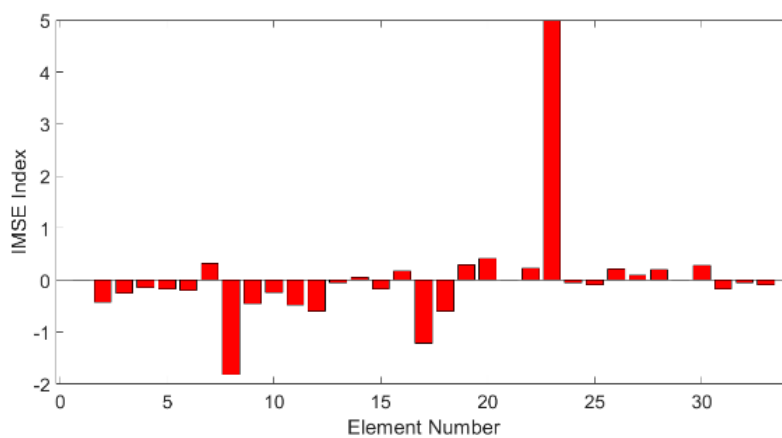
سناریوی سوم:

در این سناریو، المان شماره ۲۳ به عنوان یک عضو افقی واقع در ناحیه پاشش آب به میزان  $10$  درصد دچار آسیب شده است. شکل ۱۱ بهبود دقت شناسایی محل آسیب در این سناریو با استفاده از روش بهبود یافته است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که روش انرژی کرنشی مودال به همراه الگوریتم ژنتیک با دقت خوبی قادر به تعیین محل و شدت آسیب در اعضای افقی واقع در ناحیه پاشش آب است.

شکل ۱۲ پارامتر  $\alpha$  (مطابق رابطه ۲۴) یا به عبارتی شدت آسیب را برحسب فرکانسهای طبیعی سازه در سناریوی سوم نشان می‌دهد. با بهینه‌یابی شدت آسیب توسط روش الگوریتم ژنتیک، مقدار آسیب  $0/01074$  به دست می‌آید. این درحالیست که شدت آسیب در روش انرژی کرنشی مودال  $0/0120$  به دست آمده است (شکل ۱۰). به عبارت دیگر خطای شدت آسیب در روش الگوریتم ژنتیک  $7/4$  درصد و در روش انرژی کرنشی مودال  $20$  درصد است.

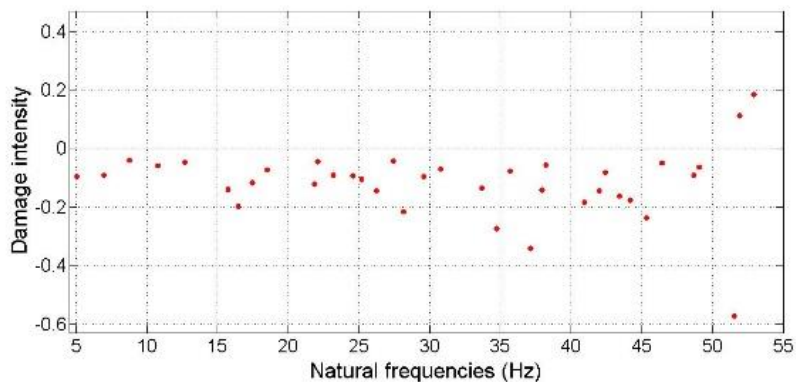


a)



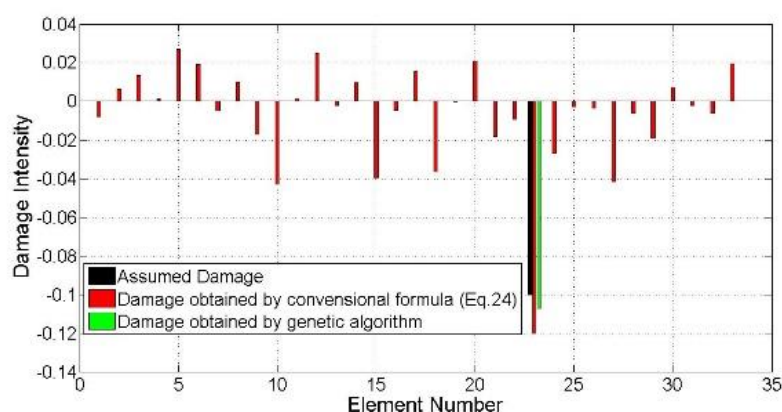
b)

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



شکل ۱۲ مقادیر شدت آسیب در فرکانس های طبیعی سازه در سناریوی سوم

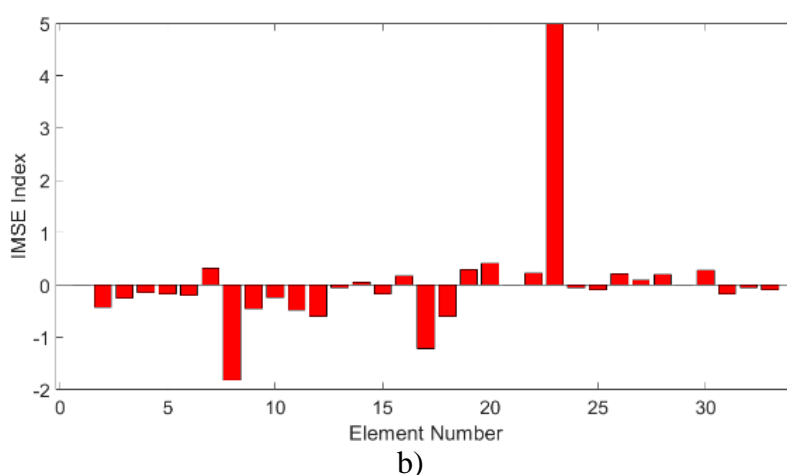
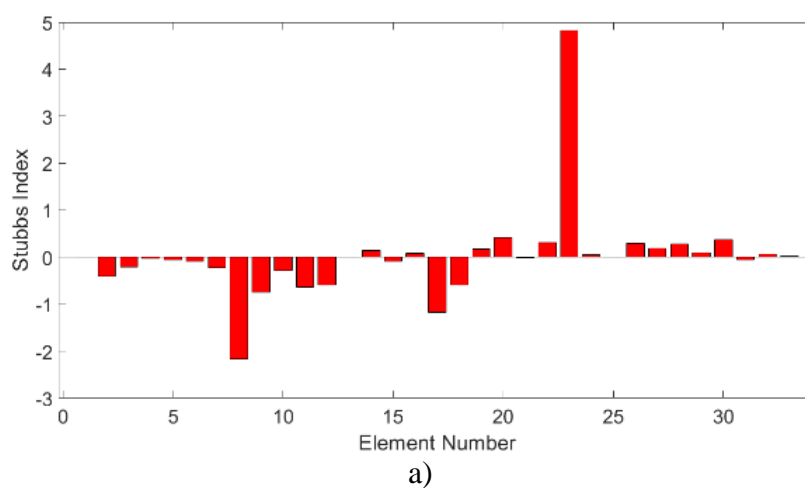




شکل ۱۳ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی سوم

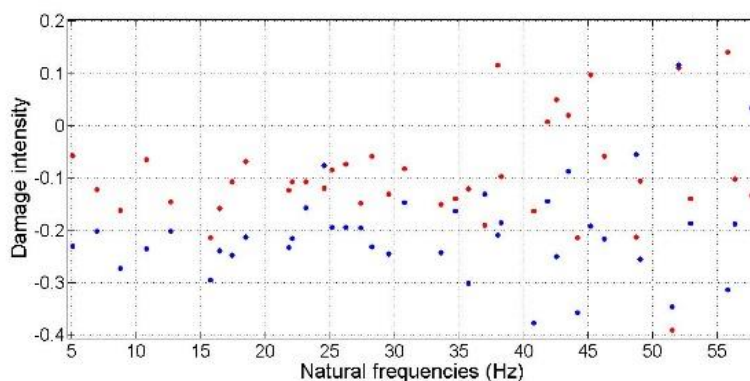
سناریوی چهارم:

در این سناریو، المان شماره ۲۵ (عضو پایه واقع در ناحیه پاشش) به میزان ۱۰ درصد و المان شماره ۳۲ (عضو افقی واقع در عرشه) به میزان ۲۰ درصد دچار آسیب شده است. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که روش بهبودیافته با دقت بیشتری قادر به شناسایی مکان آسیب است.

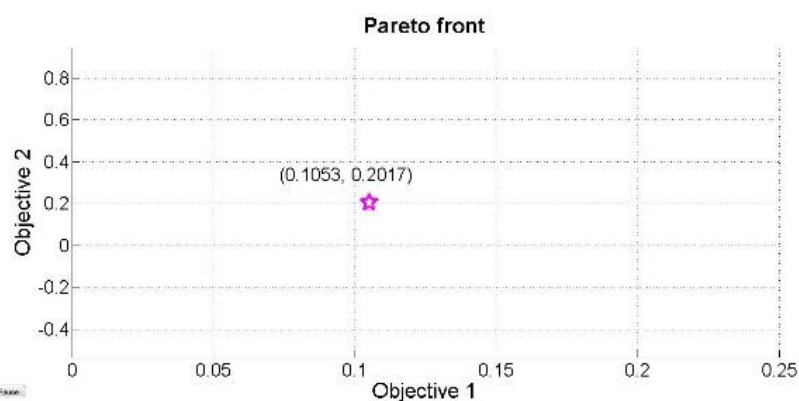


شکل ۱۴ تعیین محل آسیب با استفاده از روش شاخص های (a) Stubbs و (b) IMSE در سناریوی چهارم

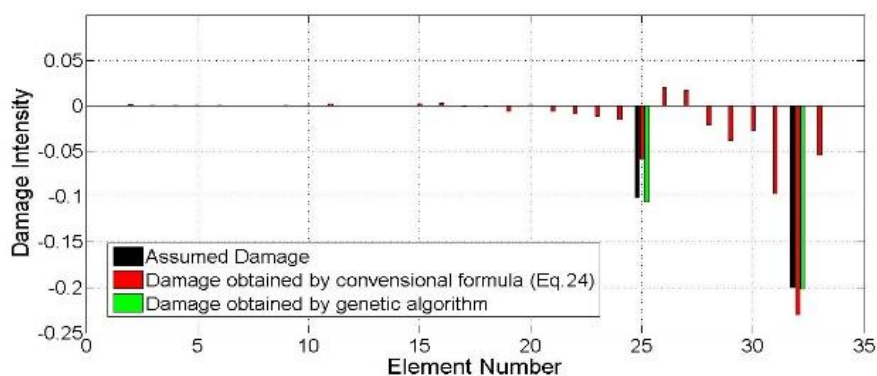
شکل ۱۵ پارامتر  $\alpha$  (مطابق رابطه ۲۴) یا به عبارتی شدت آسیب را برحسب فرکانسهای طبیعی سازه در سناریوی چهارم نشان می‌دهد. با بهینه‌یابی شدت آسیب توسط روش الگوریتم ژنتیک، مقادیر آسیب در المان ۲۵،  $0.1053$  و در المان ۳۲،  $0.2017$  به دست می‌آیند. این درحالیست که در روش انرژی کرنشی مودال، شدتهای آسیب المان ۲۵،  $0.0576$  و المان ۳۲،  $0.23$  به دست آمده اند (شکل ۱۶ و ۱۷). به عبارت دیگر خطای شدت آسیب در روش الگوریتم ژنتیک برای المانهای ۲۵ و ۳۲ به ترتیب  $5/3$  و  $0/85$  درصد و در روش انرژی کرنشی مودال برای المانهای ۲۵ و ۳۲ به ترتیب  $4/4$  و  $15$  درصد است. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که این روش به همراه الگوریتم ژنتیک دقت مناسبی در تعیین شدت آسیب‌های چند تایی در سکوهایی سه پایه تریپاد دارد.



شکل ۱۵ مقادیر شدت آسیب در فرکانس‌های طبیعی سازه در سناریوی چهارم



شکل ۱۶ مجموعه بهینه پارتو برای دو تابع هدف آسیب عضو ۲۵ و ۳۲ در سناریوی چهارم



شکل ۱۷ شدت خرابی فرض شده و به دست آمده با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در سناریوی چهارم

با سپری شدن عمر سرویس توربینهای بادی فراساحلی اولیه، نیاز به پایش سلامت آنها به منظور شناسایی مکان و شدت آسیب در زیر سازه‌ها احساس می‌شود. 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 پیاپی، 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، تریپاد که به صورت سه بعدی شبیه سازی شده، پرداخته شده و نتایج دو روش شاخص استابس و روش انرژی کرنشی مودال بهبودیافته بایکدیگر مقایسه گردید. نتایج زیر از این تحقیق بدست آمد:

- ۱- روش انرژی کرنشی مودال می‌تواند به نحو مناسبی شدت و مکان آسیب را در زیر سازه‌های توربین بادی 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 سکو برخوردار بوده و از اهداف اصلی این تحقیق هستند، دارای عملکرد مناسبی بود.
- ۴- روش انرژی کرنشی مودال بهبودیافته با دقت بالاتری، مکان آسیب را در سازه شناسایی نموده و استفاده از این روش به جای روش شاخص استابس توصیه می‌گردد.
- ۶- در حالتی که آسیب چندگانه 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 داده و شاخص آسیب آن‌ها مقداری بیشتر از واحد را نشان دهد.
- ۷- به کارگیری روش الگوریتم ژنتیک تک هدفه برای تعیین شدت آسیبهای تک عضوی و چند هدفه برای آسیبهای چند عضوی به طور قابل ملاحظه‌ای دقت مقادیر شدت آسیب را افزایش می‌دهد. به ویژه در الگوریتم دوهدفه خطای تعیین شدت آسیب به روش انرژی کرنشی مودال از ۴۲/۴ درصد به ۵/۳ درصد در روش الگوریتم ژنتیک در عضو شماره ۲۵ تقلیل پیدا کرد و در عضو شماره ۳۲ این میزان از ۱۵ درصد به ۰/۸۵ درصد تقلیل یافت.
- ۸- با توجه به اهمیت توربین‌های فراساحل در عمر بهره برداری خود، و با عنایت به اهمیت اعضای سازه که در معرض امواج و خوردگی (خشک و تر شدن دائمی) هستند، با بررسی‌های انجام شده، نتایج نشان می‌دهند، روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته در کنار الگوریتم ژنتیک با تقریب بسیار خوبی محل و شدت آسیب را در این اعضاء به درستی نشان می‌دهند.

## ۱۱- مراجع

- [1] [Online]. Available: <https://gwec.net/record-6-1-gw-of-new-offshore-wind-capacity-installed-globally-in-2019/>.
- [2] C. P. Fritzen, "Vibration-Based Techniques for SHM," in *Structural Health Monitoring*, 2006, pp. 45-224.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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*, 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] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] HSE, Offshore hydrocarbon release statistics and analysis 1992-2015, Bootle, UK: Health and Safety Executive, 2016.
- [33] R. E. Melchers, "Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, pp. 1484-1493, 2003.
- [34] 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.
- [35] J. K. Paik and R. E. Melchers, Corrosion wastage in aged structures, 1st ed., Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2008.
- [36] M. El-Reedy, "Chapter Six: Corrosion Protection," in *Offshore Structures: Design, Construction and Maintenance*, Gulf Professional Publishing, 2012.
- [37] 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.
- [38] R. Samaei, M. Ghodsi hasanabad and M. Asadian ghahfarokhi, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 321, no. 2, p. 137-152, 2021.