

## شناسایی آسیب‌های موجود در سکوی سه پایه توربین بادی دور از ساحل به روش انرژی کرنشی مودال

سید رضا سمائی

دکتری، گروه صنایع دریایی، گرایش سواحل، بنادر و سازه های دریایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه

آزاد اسلامی، تهران، ایران

مجید قدسی حسن آباد\*

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

امین کریم پور زهرایی

کارشناس ارشد، گروه صنایع دریایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

m.ghodsi@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳

### چکیده

سکوهای دریایی در طول عمر مفید خود در معرض آسیب‌های مختلفی قرار می‌گیرند. این امر می‌تواند بهره‌برداری سازه را دچار مشکل کرده و در صورت رشد و افزایش خرابی باعث خسارات بیشتری در آینده گردد. معمولاً محل و شدت آسیب در سازه‌ها نامشخص است، به همین جهت تلاش‌های زیادی برای دستیابی به روشی دقیق، مطمئن و کم هزینه برای شناسایی آسیب در سازه‌های دریایی صورت گرفته است. روشهای شناسایی آسیب بر پایه پاسخ دینامیکی، یکی از روشهای غیر مخرب و کاربردی مطرح هستند. یکی از مهم‌ترین زیرشاخه‌های شناسایی آسیب بر اساس پاسخ دینامیکی سازه، روش انرژی کرنشی مودال است. در این مقاله با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال به شناسایی مکان آسیب در یک سکوی سه پایه توربین بادی دور از ساحل پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش فوق‌الذکر دارای توانایی مناسبی در شناسایی مکان آسیب‌های تکی، هم با شدت کم و هم با شدت زیاد می‌باشد. همچنین، در حالتی که بیش از یک عضو از سازه دچار آسیب شوند، الگوریتم نوشته شده قادر به شناسایی مکان آسیب‌ها بوده، ولی ممکن است علاوه بر اعضای آسیب دیده، برخی دیگر از اعضا نیز شاخص آسیبی بزرگتر از یک را نشان دهند.

**کلید واژگان:** پایش سلامت، ناحیه پاشش، انرژی کرنشی مودال، سکوی فراساحلی، جکت.

## مقدمه

در حالیکه در دهه‌های اخیر، نیاز انسان به انرژی منجر به استفاده روز افزون از منابع سوخت‌های فسیلی شده است، ولی مشکلاتی نظیر آلودگی هوا و بیماری‌های ناشی از آن، گرمایش جهانی، تغییر الگوی بارش باران، ذوب یخ‌های قطبی و در نتیجه بالا آمدن سطح آب دریاها و نیز خطر به اتمام رسیدن سوخت‌های فسیلی سبب شده است که در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی پیرامون منابع جایگزین انرژی فسیلی صورت گیرد. استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر نظیر انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و نظایر آن می‌تواند بخشی از نیاز انسان به انرژی را برآورده نماید. انرژی بادی یکی از مهمترین منابع انرژی تجدید پذیر است که امروزه در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس گزارش انجمن انرژی بادی اروپا، تا پایان سال ۲۰۱۲ میلادی تنها ۵ گیگاوات برق توسط انرژی بادی فراساحلی تولید شده است، در حالیکه پیش‌بینی می‌شود که این ظرفیت تا سال ۲۰۳۰ به ۱۵۰ گیگاوات برسد، یعنی انرژی مورد نیاز ۱۴۵ میلیون خانواده را فراهم نماید [1]. استفاده از انرژی بادی دریایی به دلیل وجود مناطق وسیع در دریا و سرعت بالاتر باد به عنوان یک گزینه مناسب برای تولید برق مطرح است. در سالیان اخیر، توربین‌های بادی فراساحلی با توجه به ویژگی‌های خاص خود و توانایی استخراج انرژی باد موجود در قسمتهای مختلف دریا که به دلیل نبود عوارض طبیعی و مصنوعی در دریا به صورت پیوسته می‌وزد و تبدیل این انرژی به برق مورد نیاز، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است.

افزایش عمر سازه‌ها در کنار طبیعت غیر قابل پیش‌بینی بارها و طراحی ضعیف اعضا سبب ناکارآمد شدن سازه‌ها می‌شود. سازه‌های دریایی و از جمله توربین‌های بادی دور از ساحل در طول عمر مفید خود دائما در معرض نیروهای محیطی قرار دارند. بارهایی که در طی ساخت و بهره برداری به سکوهای دور از ساحل وارد می‌شود سبب ایجاد خرابی‌های جزئی و کلی در سکو می‌شوند. دلیل بسیاری از شکست‌های سازه‌ای، گسیختگی مواد تشکیل دهنده آن است. آغاز این گسیختگی‌ها با ترک توام است که با گسترش خود به عنوان یک تهدید جدی برای رفتار سازه محسوب می‌شود. پایش سلامت سازه روندی برای بدست آوردن اطلاعات دقیق از شرایط و عملکرد سازه می‌باشد. در طول بهره برداری از یک سازه دریایی ممکن است ترک‌های موضعی و نهفته داخلی سازه به طور پیوسته افزایش یافته و در نهایت باعث فرو ریختن کل سازه شود. این امر به دلیل از دست رفتن سکوی دریایی و یا توقف بهره برداری از آن سبب ایجاد خسارات بسیار سنگینی می‌شود. تاثیر ترک در ساختار سازه به صورت تغییرات موضعی سختی است که این تغییرات در ساختار دینامیکی سازه اثر قابل توجهی دارد. این موضوع در تغییر فرکانس طبیعی و شکل مود ارتعاشی قابل مداخله بوده و تحلیل این تغییرات، شناسایی ترک را ممکن می‌سازد.

با هدف پیشگیری از رشد آسیب‌ها و بهینه سازی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری، از روش‌های پایش سلامت سازه‌ای استفاده می‌گردد. یک روش مورد استفاده در پایش سلامت سازه‌ها، استفاده از بازرسی چشمی است که منجر به حصول اطلاعات مهمی در مورد سلامت سازه می‌گردد. با این وجود، زمان بر بودن و پرهزینه 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 خرابی‌های داخلی و منشا آنها سبب شده است تا به کارگیری روش‌های شناسایی غیر مخرب آسیب برای افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود سازه گسترش یابد. یکی از این روش‌های شناسایی غیر مخرب، 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 [2, 3]. 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 را تشخیص داد. با استفاده از یک سیستم پایش سلامت سازه، اطلاعات قابل اعتماد از سازه کسب شده و می‌توان نقایص 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 می‌شود:

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 [4]

روش‌های تشخیص و نمایان سازی آسیب و ترک با توجه به اهمیت آن در شکست سازه‌ای، موضوع تحقیقات گسترده‌ای بوده است. به عنوان یکی از اولین تلاشها برای شناسایی آسیب در سازه‌ها، کاولی و آدامز فرکانس‌های طبیعی سازه را به عنوان شاخصی برای شناسایی محل آسیب ارائه نمودند [5]. شهریور و بوکامپ با استفاده از اطلاعات ارتعاشی به شناسایی آسیب در یک سکوی دریایی هشت پایه فولادی پرداختند. آنها تاثیرات مهاربندی‌های 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 را بر پارامترهای انتخاب شده مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که آنها متفاوت از اثرات آسیب هست [6] هانسن و واندرپلاتس به منظور شناسایی آسیب در سازه از فرکانس و شکل مودهای سازه استفاده نمودند. در این روش محل و شدت خرابی با دقت بسیار خوبی با استفاده از داده‌های دقیق و با

داده‌های همراه با نوبز مشخص گردید [7] دوئبلینگ و همکاران روشی بر اساس انرژی کرنشی مودال برای انتخاب یک زیرمجموعه از مودهای ارتعاشی سازه‌های مشخص در ارتباط با مدل اجزای محدود و تشخیص آسیب سازه‌ای را ارائه کردند [8] کیم و استابیس الگوریتمی برای مکان یابی و تعیین میزان آسیب در سکوها جکت ارائه نمودند که در آن فقط خصوصیات مودال پس از آسیب برای چند مود ارتعاشی موجود بود. آنها به فرمول بندی 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 [9] کیم و استابیز استفاده از روش شاخص خرابی مبتنی بر انرژی کرنشی مودال را برای سازه‌های تیر مانند پیشنهاد دادند. آنها کارایی این روش را بر روی یک پل فولادی بررسی نموده و به درستی موفق به شناسایی مکان آسیب شدند [10, 11] سالوو و مطالعه‌ای در مورد استفاده از فرکانس‌های طبیعی برای شناسایی آسیب انجام داد. بر اساس این پژوهش تنها استفاده از فرکانس‌های طبیعی برای شناسایی موضعی آسیب کافی نیست ولی در شناسایی کلی آسیب می‌تواند موثر باشد [12] فرار و جاریگو 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 نمودند. آنها نتیجه گرفتند که روش شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده داشته و دارای عملکرد مناسبی در تشخیص خرابی در پلها می‌باشد. همچنین مشخص شد که این روشها در شناسایی مکان آسیب دارای دقت مناسبی بوده ولی در تعیین شدت آسیب از دقت کمتری برخوردار هستند [13] کیم و استابیز شاخص خرابی بهبود یافته‌ای را توسعه داده و کارایی آن را بر روی یک تیر دو دهانه آزمایش نمودند. بهبود روش شاخص خرابی آنها شامل شناسایی آسیب با حداقل تعداد شکل مود، عدم نیاز به حل معادلات سیستم و توانایی شناسایی آسیب در سازه‌هایی با تعداد زیاد اعضا بود. نتایج آنها نشان داد که شاخص خرابی بهبود یافته منجر به افزایش دقت تشخیص آسیب می‌شد [14] چنگ و همکاران روشی را برای شناسایی مکان آسیب‌های یک المان صفحه‌ای ارائه کردند که در این روش به کمک شکل مودها مکان آسیب شناسایی می‌شود. بدین ترتیب که به کمک اشکال مودی به دست آمده از روش رایلی ریتز و محاسبه شاخص‌های ارائه شده می‌توان مکان آسیب را شناسایی کرد. مدل‌سازی عددی و آزمایش تجربی نیز نشان داد که این روش قابلیت بالایی برای شناسایی آسیب‌های تکی و چندگانه دارد [15] یانگ و همکاران با ارائه روشی نوین و با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال، خسارت را در سازه‌های دریایی بر اساس بارهای محیطی را مورد بررسی قرار دادند. در این روش، ضریب تغییر انرژی کرنشی مودال (CMSECR) و نیز ضریب

خمشی انرژی کرنشی مودال (FMSECR) استفاده شدند [16] جی و لویی 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 [17]. شی و همکاران 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 [18] هو و وو شاخص آسیب را برای شناسایی آسیب در ورقها بر اساس روش انرژی کرنشی مودال توسعه دادند [19]. سیدپور 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 گرفت. در مرحله دوم، شدت آسیب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی particle swarm optimization با استفاده از نتایج مرحله اول تعیین گردید [20] لیو و همکاران 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. روش پیشنهادی آنها می‌توانست با استفاده از تنها دو شکل مود مکان آسیب را شناسایی کند [21] سید پور و یزدان پناه در پژوهشی روشی را برای شناسایی مکان آسیب بر مبنای انرژی کرنشی ارائه نمودند، با این تفاوت که انرژی کرنشی که در سازه ذخیره می‌شود ناشی از بارهای استاتیکی وارده بر سازه است. بنابراین آنها با مقایسه انرژی کرنشی استاتیکی ذخیره شده در سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده به شناسایی مکان آسیب پرداختند. سپس کارایی این روش را بر روی یک خرابی سیزده عضوی یک قاب سه دهانه‌ای و یک فضای بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که با اعمال بارگذاری در یک گره از خرابی‌های مورد بررسی و محاسبه جابه‌جایی‌ها به راحتی شناسایی مکان آسیب امکان پذیر است. روش آنها همچنین توانایی شناسایی آسیب در شرایط آلوده به نوبز را نیز داشت. همچنین زمانی که عملکرد دو روش انرژی کرنشی مودال و انرژی کرنشی استاتیکی برای شناسایی آسیب‌های یکسان مورد بررسی قرار گرفت مشخص شد که روش استاتیکی با دقت بیشتری مکان آسیب را شناسایی می‌کند. [22] ونگ و همکاران با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال برای مکان یابی آسیب بر روی یک سکوی دور از ساحل 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. [23] همانطور که پیش از این گفته شد، به دلیل هزینه‌های بالای ساخت این سازه‌ها و نیاز به تجهیزات و تعمیرات گران قیمت، بهترین راه

نسبت حساسیت المان  $\lambda_m$  در مود  $i$  م 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  $K_{ij}^*$  و  $K_i^*$  به ترتیب زیر تعریف می‌شوند:

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

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

در روابط فوق، علامت \* نشانگر حالت آسیب دیده می‌باشد.

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:

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

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

که  $E_j^*$  و  $E_j$  به ترتیب برابر مشخصات سختی مصالح (مدول الاستیسیته)  $\lambda_m$  المان در حالت سالم و آسیب دیده می‌باشد و  $C_{j0}$  تنها مشخصات هندسی را در بر می‌گیرد.

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

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

در صورتی که به طرفین رابطه (۱۰) مقدار واحدی را اضافه کنیم خواهیم داشت:

$$1 = \frac{F_{ij}^* + 1}{F_{ij} + 1} \quad (11)$$

با جایگذاری معادلات (۳) و (۴) در معادله (۱۱) داریم:

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

در صورت جایگذاری معادلات ۱، ۲، ۵ و ۶ در معادله بالا برای تمام مودهای موجود (NM) و تمام المان‌ها (NE) به یک شاخص آسیب برای هر المان می‌رسیم که خواهیم داشت:

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^{*T} C_{j0} \Phi_i^* + \sum_{i=1}^{NE} \Phi_i^{*T} C_{k0} \Phi_i^*)}{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^T C_{j0} \Phi_i + \sum_{i=1}^{NE} \Phi_i^T C_{k0} \Phi_i)} \quad (13)$$

برای جلوگیری از چنین خساراتی، شناسایی آسیب‌های اولیه، شدت و محل آنها ست که به عنوان به صرفه‌ترین و اقل‌صادی‌ترین روش به شمار می‌آید. به منظور شناسایی آسیب‌های وارد بر سکوها در بای، نیاز به انتخاب روشی درست، دقیق و کارآمد می‌باشد که از نظر اقتصادی نیز به صرفه باشد. امروزه، روش‌هایی که بر مبنای پاسخ پویا دینامیکی سازه به شناسایی آسیب در سازه می‌پردازند، امروزه مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های دینامیکی شناسایی آسیب در سازه‌ها روش انرژی کرنشی مودال است که بر اساس مقایسه انرژی کرنشی ذخیره شده در اعضای سازه، قبل و بعد از آسیب، محل خرابی را به خوبی نشان می‌دهد. در این تحقیق به شناسایی آسیب در یک سازه شابلونی پایه توربین بادی به روش انرژی کرنشی مودال که یکی از دقیق‌ترین و کاربردی‌ترین روشها در بحث شناسایی آسیب است پرداخته می‌شود.

### انرژی کرنشی مودال

وقتی یک جسم الاستیک تحت اثر نیرو قرار می‌گیرد، در آن تنش ایجاد می‌شود. همچنین این نیرو سبب می‌شود که جسم تغییر شکل داده و وضعیت نقاط مختلف آن نسبت به حالت اولیه تغییر پیدا کند. 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.

در یک سازه خطی بدون آسیب با NE المان و N گره،  $i$  امین سختی مودال سازه از رابطه زیر بدست می‌آید [14]

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

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

ماتریس های وابسته از نوشتن جزئیات خودداری شده است. ماتریس سختی المان قاب سه بعدی به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{pmatrix}
 \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3A}{4c}
 \end{pmatrix} = \mathbf{K} \quad (۱۶)$$

در رابطه (۱۶) که ماتریس سختی المان قاب سه بعدی است  $I_y$  و  $I_z$  به ترتیب ممان دوم سطح مقطع عرضی نسبت به محورهای  $Y$  و  $Z$  و چهارمین درجه آزادی مربوط به تغییر شکل چرخشی می باشد. در این رابطه،  $G$  مدول برشی  $J$  ممان اینرسی قطبی المان،  $L$  طول المان و رابطه  $a=L/2$  برقرار می باشد. ماتریس جرم سازه نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{pmatrix}
 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 78 & 0 & 0 & 0 & 22a & 0 & 27 & 0 & 0 & 0 & 0 & -13a & 0 & 0 & 0 \\
 78 & 0 & -22a & 0 & 0 & 0 & 27 & 0 & 0 & 0 & 13a & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 70r_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -35r_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 8a^2 & 0 & 0 & 0 & -13a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 8a^2 & 0 & 13a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 78 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -22a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 78 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 70r_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 8a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 70r_y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 8a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 8a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix} = \frac{\rho A a}{105} \mathbf{M} \quad (۱۷)$$

در این رابطه،  $r_x^2$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$r_x^2 = \frac{I_x}{A} \quad (۱۸)$$

در این رابطه،  $I_x$  ممان دوم سطح تیر نسبت به محور  $X$  است. روابط (۱۶) و (۱۷) ماتریس های سختی و جرم سازه در مختصات محلی می باشند. برای دست یابی به ماتریس های سازه در مختصات کلی باید آن ها را در یک ماتریس انتقال ضرب کنیم. فرض می کنیم گره های ۱ و ۲ المان در مختصات محلی به ترتیب برابر گره های  $\bar{1}$  و  $\bar{2}$  در مختصات کلی باشد. جابجایی گره در مختصات محلی باید سه مولفه انتقالی در جهت های  $Y$  و  $Z$  و سه مولفه دورانی نسبت به این سه محور داشته باشد که آن ها از  $d_{11}$  تا  $d_{12}$  مطابق با تغییر شکل فیزیکی شماره گذاری شده اند. جابجایی در یک گره در مختصات کلی نیز باید سه مولفه انتقالی در جهت های  $Y$  و  $Z$  و سه مولفه دورانی نسبت به این سه محور داشته باشد که برای  $\bar{1}$  امین گره مطابق شکل (۱) به ترتیب زیر شماره گذاری می شوند:

$$D_{6i-5}, D_{6i-4}, \dots, D_{6i}$$

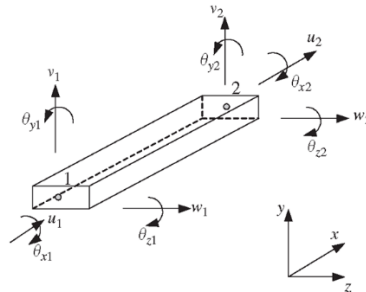
لازم به ذکر است که بدلیل مشخص نبودن ماتریس سختی سازه و المان ها در حالت آسیب دیده، از ماتریس سختی سازه سالم برای هر دو حالت استفاده می شود. بنابر این در رابطه بالا نیز از ماتریس سختی سازه سالم استفاده شده است.

بعد از بدست آوردن  $\beta_j$  برای هر المان با استفاده از رابطه زیر شاخص آسیب نرمالیزه می گردد [14].

$$Z_j = \frac{\beta_j - \bar{\beta}}{\sigma_\beta} \quad (۱۴)$$

**ماتریسهای جرم و سختی سازه**

با توجه به این که سازه های شابلونی فراساحلی در گروه قاب های سه بعدی قرار می گیرند بنابراین برای استخراج ماتریس های جرم و سختی باید از معادلات قاب سه بعدی استفاده کرد. یک المان در یک قاب سه بعدی مانند شکل ۱ در نظر گرفته می شود. تفاوت قاب های دو بعدی و سه بعدی تنها در تعداد درجات آزادی در هر گره می باشد. در یک قاب سه بعدی، ۶ درجه آزادی در هر گره وجود دارد، سه جابجایی در جهت  $Y$  و  $Z$  و سه دوران نسبت به محور های  $X$  و  $Y$  و  $Z$ . بنابراین برای یک المان با دو گره در مجموع ۱۲ درجه آزادی برقرار است.



شکل ۱- المانی از یک قاب سه بعدی با ۱۲ درجه آزادی بردار جابجایی المان در یک قاب سه بعدی به صورت زیر است:

$$\mathbf{d}_e = \left\{ \begin{matrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \\ d_8 \\ d_9 \\ d_{10} \\ d_{11} \\ d_{12} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{matrix} \right\} \quad (۱۵)$$

**جابجایی در گره یک**  
**جابجایی در گره دو**

جابجایی در گره یک و دو در فرمول ۱۵ نمایش داده شده است که ماتریس های المان قاب سه بعدی با جمع ماتریس های المان خرابی فضایی و المان تیر به دست می آید. به دلیل بزرگ بودن

در نهایت ماتریس انتقال  $T$  را به صورت زیر برای دست یابی به مختصات کلی اعمال می کنیم:

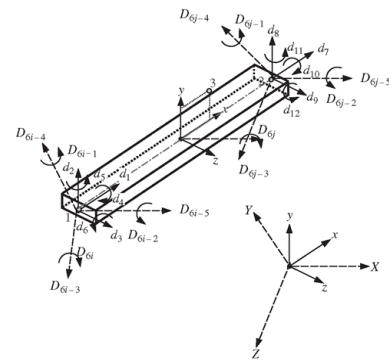
$$\begin{aligned} \mathbf{K}_e &= \mathbf{T}^T \mathbf{k}_e \mathbf{T} \\ \mathbf{M}_e &= \mathbf{T}^T \mathbf{m}_e \mathbf{T} \\ \mathbf{F}_e &= \mathbf{T}^T \mathbf{f}_e \end{aligned} \quad (24)$$

### سازه مورد بررسی

سکوی شابلونی پایه توربین بادی انتخاب شده برای این پژوهش سکوی سه پایه PJ با مهارهای افقی و خمشی می باشد. این سکو که یکی از متداول ترین سکوهای پایه توربین بادی است، دارای ارتفاع ۶۶ متری و مقطع مثلثی متساوی الاضلاع که طول هر ضلع این مثلث ۲۵ متر است، می باشد. اطلاعات سکو در جدول ۱ آورده شده است [24].

جدول ۱- مشخصات سکوی مورد مطالعه [24]

ارتفاع	۶۶ متر
طول پایه ها	۶۶/۸۶ متر
مدول الاستیسیته (E)	۲۱۰ GPa
مدول برشی (G)	۷۹ GPa
وزن مخصوص	۷۸۵۰ Kg/m <sup>3</sup>
شعاع لوله	۱۷۸/۰m
ضخامت	۰۰۸۸۹/۰m
ممان دوم سطح نسبت به محور X	۲,۹e-4



شکل ۲- تبدیل مختصات برای یک المان قاب در فضا برای گره J نیز همین شرایط برقرار است.

رابطه بین بردار جابجایی در مختصات محلی  $d_e$  و بردار جابجایی در مختصات کلی سیستم  $D_e$  به صورت زیر است:

$$d_e = T D_e \quad (19)$$

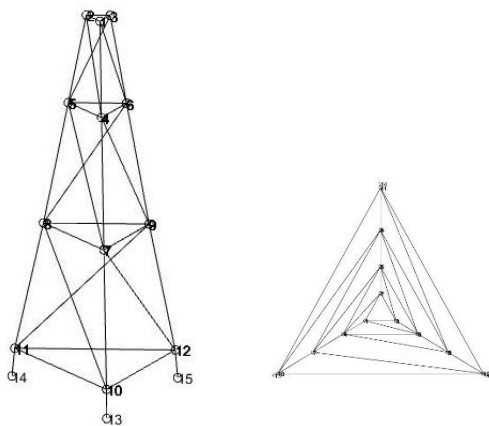
در این رابطه،

$$D_e = \begin{Bmatrix} D_{6i-5} \\ D_{6i-4} \\ D_{6i-3} \\ D_{6i-2} \\ D_{6i-1} \\ D_{6i} \\ D_{6j-5} \\ D_{6j-4} \\ D_{6j-3} \\ D_{6j-2} \\ D_{6j-1} \\ D_{6j} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

و ماتریس انتقال  $T$  برابر است با:

$$T = \begin{bmatrix} T_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} \quad (22)$$



شکل ۳- نما از بالای سکوی PJ  
شکل ۴- نمای رو به روی سکوی PJ

$$l_x = \cos(x, X), \quad m_x = \cos(x, Y), \quad n_x = \cos(x, Z)$$

$$l_y = \cos(y, X), \quad m_y = \cos(y, Y), \quad n_y = \cos(y, Z) \quad (23)$$

$$l_z = \cos(z, X), \quad m_z = \cos(z, Y), \quad n_z = \cos(z, Z) \quad ($$

جدول ۲- فرکانسهای طبیعی سازه مربوط به ده مود اول.

شماره مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
فرکانس طبیعی	۱۴۱/۱	۱۴۱/۱	۲۸۰۵/۴	۲۸/۴	۳۴/۷	۳۴/۷	۸۱/۷	۸۱/۷	۰۲/۱۰	۰۲/۱۰

### نتایج حاصل از تحلیل مودال سازه

همانطور که پیش از این بیان شد، برای شناسایی آسیب به روش انرژی کرنشی مودال به اطلاعات مودال سازه در حالت قبل و بعد از آسیب نیاز داریم. بدین منظور بعد از مدل کردن سکو و تعریف ماتریسهای سختی و جرم المانها و بر هم چینی آنها جهت دست یابی به ماتریس سختی و جرم کل سازه، بردارهای ویژه و مقادیر ویژه که به ترتیب همان شکل مودها و فرکانسهای طبیعی سازه هستند، استخراج میگردند. سپس فرکانسهای طبیعی از کوچک به بزرگ مرتب می شوند که کوچکترین 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 زیر ده فرکانس طبیعی اول سازه آورده شده است.

### 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 آسیبهای تکی و چندتایی، به بررسی روش انرژی کرنشی مودال پرداخته می شود. جدول زیر سناریوهای مختلف آسیب را به صورت مختصر شده نشان می دهد. سعی شده المانهای انتخابی اعضای پایه، مهار افقی و خمشی را شامل شود.

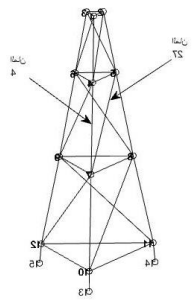
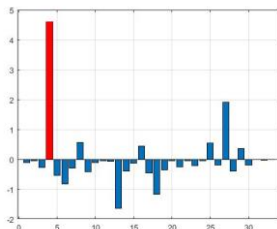
جدول ۳- سناریوهای مختلف آسیب.

شماره سناریو	شماره المان	میزان آسیب
۱	۴	۲۵٪
۲	۱۲	۲۵٪
۳	۱۸	۱٪
۴	۵ و ۲۱	۲۰٪ و ۲۵٪
۵	۱۱ و ۱۲	۲۵٪ و ۲۰٪

### نتایج

#### سناریو اول

در این حالت، فرض می شود که عضو شماره ۴ به میزان ۲۵ درصد دچار آسیب شده است. شکل مودهای سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده استخراج شد و با استفاده از شاخص آسیب به روش انرژی کرنشی مودال، نمودار شاخص آسیب در شکل ۶ ترسیم گردیده است.



شکل ۶- نمودار شاخص آسیب در حالت سناریوی شماره ۱. محورهای عمودی و افقی نمودار به ترتیب نشان دهنده شاخص

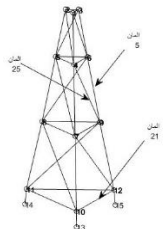
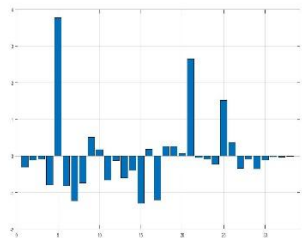
شکل ۵- مکان المان شماره ۴ آسیب و شماره المان می باشند

با توجه به شکل ۶ میزان بالای شاخص آسیب المان ۴ می توان نتیجه گرفت روش ذکر شده محل آسیب را به درستی مشخص کرده است. اما المان ۲۷ نیز مقداری بیشتر از واحد را نشان می دهد که می تواند بدلیل مجاورت با المان آسیب دیده (المان ۴) باشد.

#### سناریو ۲

در این حالت فرض می شود که المان شماره ۱۲ به میزان ۲۵ درصد دچار آسیب شده است. شاخص آسیب در این سناریو در شکل ۸ ترسیم شده است.

می باشد. نتایج شاخص خرابی در این حالت در شکل شماره ۱۲ نشان داده شده است.

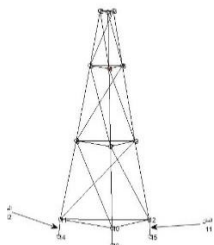
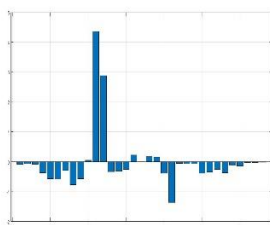


شکل ۱۱- مکان  
المان های ۵  
و ۲۱ و ۲۵  
شماره ۱۲- شاخص آسیب در سناریوی  
شماره ۴. محورهای عمودی و افقی نمودار  
به ترتیب نشان دهنده شاخص آسیب و  
شماره المان می باشند

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، المان های ۵ و ۲۱ با درصد آسیب متفاوت به خوبی تشخیص داده شده اند، اما المان ۲۵ نیز مقداری بیش از واحد را نشان می دهد که ممکن است بدلیل مجاورت با المان آسیب دیده و حساسیت بیشتر مهار های خمشی سازه مورد مطالعه باشد.

سناریو ۵

در این سناریو، مدول الاستیسیته اعضای ۱۱ و ۱۲ به ترتیب ۲۵٪ و ۲۰٪ کاسته شد.

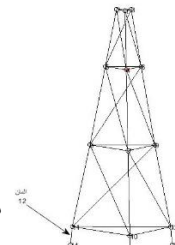
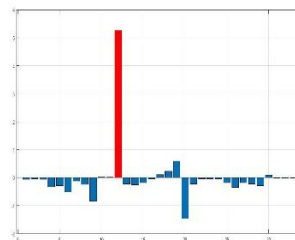


شکل ۱۳- مکان  
المانهای ۱۱ و ۱۲  
شماره ۵. محورهای عمودی و افقی  
نمودار به ترتیب نشان دهنده شاخص  
آسیب و شماره المان می باشند

همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در این سناریو نیز مکان آسیب در دو پایه سکو به درستی مشخص شده است.

### نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش شناسایی آسیب تکی و چندگانه در سکوهای دریایی، سکوهای سه پایه مورد استفاده در پایه های توربین بادی دور از ساحل بود. مشخصات سکو اعم از مختصات گره ها، موقعیت المان ها، مشخصات مصالح در نرم افزار MATLAB پیاده سازی شد و بعد از تعریف ماتریس های جرم سختی و معادلات حاکم و

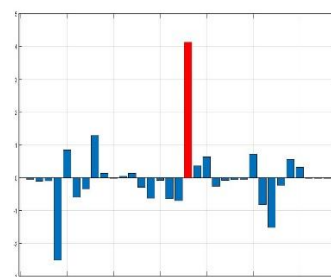


شکل ۷- مکان  
المان ۱۲  
شکل ۸- شاخص آسیب در سناریوی  
شماره ۲. محورهای عمودی و افقی  
نمودار به ترتیب نشان دهنده شاخص  
آسیب و شماره المان می باشند

با توجه به نمودار ۸ و میزان بالای شاخص آسیب المان ۱۲ در این المان نیز روش انرژی کرنشی مودال محل آسیب را به درستی مشخص کرده است.

سناریو ۳:

در این سناریو، المان شماره ۱۸ به میزان ۱ در صد دچار آسیب شده است. شاخص آسیب در این سناریو در شکل ۱۰ ترسیم شده است.



شکل ۹- مکان  
المان ۱۸  
شکل ۱۰- شاخص آسیب در سناریوی شماره  
۳. محورهای عمودی و افقی نمودار به  
ترتیب نشان دهنده شاخص آسیب و شماره  
المان می باشند

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، المان ۱۸ حتی با یک در صد آسیب وارده بخوبی شناسایی شده است. این مطلب نشان دهنده این است که روش ارائه شده قادر به شناسایی هر دو نوع آسیب های کم و آسیب های زیاد می باشد.

سناریو ۴:

در این سناریو، المانهای شماره ۵ و ۲۱، به ترتیب دچار ۲۰ و ۲۵ درصد آسیب شده اند. هدف از این سناریو، نشان دادن توانایی روش در ارائه مکانیابی آسیبهای چند تایی در سازه شابلونی مورد مطالعه



- 5- Cawley P, Adams RD, "The location of defects in structures from measurement of natural frequencies," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1979; 14: 49-57.
- 6- Shahrivar F, Bouwkamp G. "Damage detection in offshore platforms using vibration information." *Journal of Energy Resources Technology*. 1986; 108: 97-106.
- 7- Hansen SR, Vanderplaats GN. "Approximation method for configuration optimization of trusses." 1990; 28: 161-168.
- 8- Doebling S, Hemez F, Barlow M, Peterson L, Farhat C. "Selection of experimental modal data sets for damage detection via model update," in *34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*; 1993: 12-35.
- 9- Kim JT, Stubbs N. "Damage detection in from limited modal information." *International and Polar Engineering*. 1995; 5: 58-66.
- 10- Stubbs N, Kim JT, Farrar CR. "Field destructive damage localization and severity in *Proceedings of the 13th International Conference*. 1995; 34: 56-67.
- 11- Stubbs N, Kim JT. "Damage localization baseline modal parameters," *AIAA Journal*. 1996; 34: 1644-1649.
- 12- Salawu OS. "Detection of structural damage through changes in frequency: a review," *Engineering Structures*. 1997; 19: 718-723.
- 13- Farrar CR, Jauregui DA. "Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study" *Smart Materials and Structures*. 1998; 7: 720-731.
- 14- Kim JT, Stubbs N. "Improved damage identification method based on modal information." *Journal of Sound and Vibration*. 2002; 252: 223-238.
- 15- Li YY, Cheng L, Yam LH, Wong W O. "Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach." *Computers & Structures*. 2002; 80: 1881-1894.

اعمال آسیب فر ضی به سازه شناسایی آسیب برپایه روش انرژی کرنشی مودال انجام شد. نتایج زیر از این مقاله بدست آمد:

۱. روش انرژی کرنشی مودال که نخستین بار توسط سائز ۱۹۹۵ ارائه شد به خوبی محل خرابی را برای حالت تک آسیب مشخص می کند.

۲. روش انرژی کرنشی مودال دارای قابلیت شناسایی آسیب، هم در شناسایی آسیبهای کوچک و هم در شناسایی آسیبهای بزرگ است.

۳. 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 آن ها مقداری بیشتر از واحد را نشان دهد.

۴. با توجه به اینکه نتایج حاصله در تحلیل صورت گرفته به صورت شاخص آسیب می باشد، آسیب مورد نظر در سازه بدین منظور در نظر گرفته شده که آسیب با شدت کم و زیاد و همچنین در اعضای تکی و چند عضوی نمایش داده شود.

#### مراجع

- 1- Arapogianni A, Genachte AB, Ochagavia RM, Vergara JPD, Castell Trsouroukdissian ARJ, Korbijn, Bolleman NFF, J. Huera-Huarte, F, Schuon A, Ugarte J, Sandberg V, de Laleu J, Maciel A, Tunbjer R, Roth P, de la Gueriviere P, Coulombeau S, Jedrec C, Philippe S, Voustsinas A, Weinstein L, Vita E, Byklum W L, Herley, Grubel H. "Deep water: The next step for offshore wind energy." The European Wind Energy Association. 2013: 8-10
- 2- Doebling S C, Farrar R, Prime MB, Shevitz DW. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review," Los Alamos National Laboratory. 1996; 131-145.
- 3- Balageas D. "Introduction to Structural Health Monitoring," in *Structural Health Monitoring*, Wiley. 2006: 13-43.
- 4- Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, Shevitz DW. "A summary review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties," *Journal of Shock Vibration*. 1995; 30: 91-10.

Available: <https://gwec.net/record-6-1-gw-of-new-offshore-wind-capacity-installed-globally-in>; 2019.

26- Fritzen CP. "Vibration-Based Techniques for SHM," in *Structural Health Monitoring*. 2006: 45-224.

27- Bouty C, Schafhirt S, Ziegler LR, Muskulus M. "Lifetime extension for large offshore wind farms: Is it enough to reassess fatigue for selected design positions?." *Energy Procedia*. 2017; 137: 523-530.

28- Rolfes R, Zerbst S, Haake G, Reetz J, Lynch JP. "Integral SHM-system for offshore wind turbines using smart wireless sensors," in *6th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA. 2007; 76: 67-90.

29- Martinez-Luengo M, Kolios A, Wang L. "Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the statistical pattern recognition paradigm." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 64: 91-105.

30- guyen CUN, Huynh TC, Kim JT. "Vibration-based damage detection in wind turbine towers using artificial neural networks." *Structural Monitoring and Maintenance*. 2018; 5: 507-519.

31- Weijtjens W, Verbelen T, Capello E, Devriendt C. "Vibration based structural health monitoring of the substructures of five offshore wind turbines." *Procedia Engineering*. 2017; 199: 2294-2299.

32- Lozano-Minguez E, Kolios AJ, Brennan FP. "Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures." *Renewable Energy*. 2011; 36: 2831-2837.

33- Bailey H, Brookes KL, Thompson P M. "Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future." *Aquatic Biosystems*. 2014; 10: 1-13

34- HSE, Offshore hydrocarbon release statistics and analysis 1992-2015, Bootle, UK: Health and Safety Executive; 2016.

16- He-Zhen Y, Hua-jun L, Shu-qing W. "Damage localization of offshore platforms under ambient excitation." *China Ocean Engineering*. 2003; 17: 495-504 .

17- Ge M, Lui EM. "Structural damage identification using system dynamic properties." *Computers & Structures*. 2005; 83: 2185-2196.

18- Shih HW, Thambiratnam DP, Chan T H. "Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach. 2009; 323: 645-661.

19- Hu H, Wu C. "Development of scanning damage index for the damage detection of plate structures using modal strain energy method." *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009; 23: 274-287.

20- Seyedpoor SM. "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*. 2012; 47: 1-8.

21- Li F, Liu H, Li W, Wang B. "Experimental study of improved modal strain energy method for damage localisation in jacket-type offshore wind turbines." *Renewable Energy*. 2014; 72: 174-181.

22- Seyedpoor SM, Yazdanpanah O. "An efficient indicator for structural damage localization using the change of strain energy based on static noisy data." *Applied Mathematical Modeling*. 2014; 38: 2661-2672.

23- Wang S, Liu F, Zhang M. "Modal strain energy based structural damage localization for offshore platform using simulated and measured data." *Journal of Ocean University of China*. 2014; 13: 397-406.

24- Chen IW, Wong BL, Lin YH, Chau YH, Huang HH. "Design and analysis of jacket substructures for offshore wind turbines." *Energies*. 2016; 9: 1-24

25-[Online].

- 44- Salawu A. "Detection of structural damage through changes in frequency: a review." *Engineering Structures*. 1997; 19: 718-723.
- 45- Yang H Z, Li HJ, Wang SQ. "Damage localization of offshore platforms under ambient excitation." *China Ocean Engineering* .2003; 17: 495-504.
- 46- Wang S, Li H. "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; 147: 89-101.
- 47- Wang S, Liu F, Zhang M. "Modal strain energy based structural damage localization for offshore platform using simulated and measured data." *Journal of Ocean University of China*. 2014; 13: 397-406.
- 48- Li Y, Zhang S, Wang M, Zheng C. "An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures," *Journal of Marine Science and Application*. 2016; 15: 182-192.
- 35- Melchers RE. "Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment." *Journal of Structural Engineering*. 2003; 129: 1484-1493.
- 36- Velaquez JC, Van Der Weide JM, Hernandez E, Hernandez HH. "Statistical Modeling of Pitting Corrosion: Extrapolation of the maximum pit depth-growth." *International Journal of Electrochemical Science*. 2014; 9: 4129-4143.
- 37- Paik JK, Melchers RE. Corrosion wastage in aged structures, 1st ed., Cambridge, UK: Woodhead Publishing. 2008; 89: 673-691.
- 38- El-Reedy M. "Chapter Six: Corrosion Protection," in *Offshore Structures: Design, Construction and Maintenance*, Gulf Professional Publishing; 2012.
- 39- Li, Y, Wang S, Zhang M and Zheng C. "An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures." *Journal of Marine Science and Application*. 2016; 15: 182-192.
- 40-[Online]. Available: <https://gwec.net/record-6-1-gw-of-new-offshore-wind-capacity-installed-globally-in-; 2019>.
- 41- Doebling SW, Farrar CF, Prime MB Shevits DW. "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; 99: 1145-1167.
- 42- Kim JT, Stubbs N. "Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information," *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 1995; 5: 58-66.
- 43- Stubbs N, Kim JT, Farrar CR. "Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm," in *Proceedings-SPIE the international society for optical engineering*. 1995; 10: 56-87.

# Identification of Location and Severity of Damages in the Offshore wind Turbine Tripod Platform by Improved Modal Strain Energy Method

Seyed Reza Samaei

Ph.D, Department of Marine industries, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Majid Ghodsi Hassanabad

Assistant professor, Department of Marine industries, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Amin karimpor zahrae

M.Sc., Department of Marine Industries, Coastal Orientation, Ports and Marine Structures, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

## Abstract

Truss structures are one of the most common offshore structures that are exposed to various damages during their service life. Offshore platforms are exposed to various damages during their useful life. This can hamper the operation of the structure and cause more damage in the future if it grows and the damage increases. The location and severity of damage to structures is usually unknown, therefore, many efforts have been made to achieve an accurate, safe and low-cost way to identify damage to marine structures. Damage detection methods based on dynamic response are one of the non-destructive and practical methods. One of the most important subfields of damage identification based on the dynamic response of the structure is the modal strain energy method. In this paper, applying the modal strain energy method, the location of the damage in an offshore wind turbine tripod platform has been identified. The results presented that the Improved modal strain energy method has a suitable ability to identify the location of single damages with appropriate accuracy, both low intensity and high intensity. Also, in the event that more than one member of the structure is damaged, the written algorithm is able to distinguish the location of the damages, but in addition to the damaged members, some other members may also exhibit a damage index greater than one.

**Keywords:** Health monitoring, Splash zone, Modal strain energy (MSE), Offshore platform, Jacket.