

بررسی محل و شدت آسیب در زیر سازه شابلونی توربین بادی فراساحلی چهارپایه به روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته

سید رضا سمائی

دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، گرایش سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، واحد قشم، دانشگاه

آزاد اسلامی، قشم، ایران

مجید قدسی حسن‌آباد

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

محمد اسدیان قهفرخی

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

محمد جواد کتابداری

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

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۰۹/۲۳

m.ghodsi@srbiau.ac.ir

چکیده

پایه‌های خرپایی سازه‌های فراساحلی از متداولترین سازه‌های دریایی 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 اعضا به‌ویژه در ناحیه عرشه و پاشش آب هستند. در عمق‌های کم استفاده از این سازه توربینهای بادی فراساحلی رایج است. با گذشت مدت زمان قابل توجه از عمر بهره‌برداری این توربین‌ها در دنیا پایش سلامت آنها ضرورت یافته است. در این تحقیق با توجه به تفاوت سازه‌های در معرض بارهای تناوبی امواج و خوردگی بالای آب دریا، با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال، با در نظر گرفتن فرکانسهای طبیعی برای تشخیص عیوب احتمالی اعضا و شدت آسیب، به بررسی اعضای واقع در عرشه و ناحیه پاشش آب که بیشتر در معرض خرابی قرار دارند پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند، روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته 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 شده‌اند.

کلید واژگان: پایش سلامت، روش پاسخ دینامیکی، انرژی کرنشی مودال، سازه‌های فراساحلی، سکوی جکت.

مقدمه

در طول عمر بهره‌برداری در محیط‌های دریا، زیر 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 اعضاء منجر شوند که با تغییر در فرکانس طبیعی و شکل مود ارتعاشی سازه قابل بررسی بوده و می‌تواند 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 بوده 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 چرخ‌دنده‌ها و نیز پره‌های روتور قرار است، در حالیکه 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 فرکانس‌های طبیعی سازه را به عنوان شاخصی برای شناسایی محل آسیب ارائه نمودند [8]. شهریور و بوکامپ 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 [9]. هانسن و واندرپلاتس به منظور شناسایی آسیب در سازه از فرکانس و شکل مودهای سازه استفاده نموده و محل و شدت خرابی را با دقت بسیار خوبی تعیین نمودند [10]. دوئیلینگ و همکاران 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 استابیس الگوریتمی برای مکان‌یابی و تعیین میزان آسیب در سکوه‌های جکت ارائه نموده، به تعیین مکان و تخمین شدت آسیب با استفاده از تغییرات در شکل مودها پرداخته و سپس روشی برای تعیین پارامترهای مودال سازه فرمول بندی نمودند [12]. کیم و استابیز استفاده از روش شاخص خرابی مبتنی بر انرژی کرنشی مودال را برای سازه‌های تیر مانند

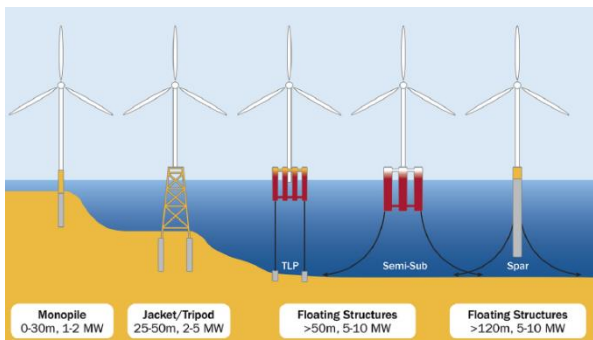
[23]. سیدپور یک روش دو مرحله ای را برای شناسایی دقیق موقعیت و شدت آسیب های چند گانه در سیستمهای سازه ای ارائه نمود که در مرحله اول، یک شاخص انرژی کرنشی مودال برای مکانیابی دقیق آسیب در یک سازه مورد استفاده قرار گرفته و در مرحله دوم، شدت آسیب با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات با استفاده از نتایج مرحله اول تعیین گردید [24]. لیو و همکاران با استفاده از تفاضل انرژی کرنشی مودال سازه در حالت سالم و آسیب دیده، برای شناسایی مکان آسیب در پایه های توربین بادی، شاخصی بر مبنای انرژی کرنشی مودال ارائه نمودند که نسبت به سایر روشهای سنتی انرژی کرنشی حساسیت بالاتری داشت [25]. سید پور و یزدان پناه 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 سبزه عضوی، یک قاب سه دهانه ای و یک خرپای فضایی بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که با اعمال بارگذاری در یک گره از خرپاهای مورد بررسی و محاسبه جابه جایی گره ها به راحتی شناسایی مکان آسیب امکان پذیر است [26]. ونگ و همکاران 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 [27]. لی و همکاران از یک روش اصلاحی انرژی کرنشی مودال به منظور شناسایی آسیب در سکوهای دریایی بر مبنای یک روش انرژی کرنشی مودال سنتی (شاخص استابس) 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 استابس در مکان یابی آسیب در حضور داده های مودال محدود بود [28]. مارتینز لونگو و همکاران 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 [29]. انگوین و همکاران با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی مبتنی بر ارتعاش به شناسایی آسیب در برجهای توربین بادی پرداختند [30].

بررسی جامع پدیده 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 جکت توربین بادی فراساحلی به روش انرژی کرنشی مودال اصلاحی

پیشنهاد داده، کارایی این روش را بر روی یک پل فولادی بررسی نموده و به درستی موفق به شناسایی مکان آسیب شدند [13, 14]. سالاوو مطالعه ای در مورد استفاده از فرکانس های طبیعی برای شناسایی آسیب انجام داده و نتیجه گرفت که تنها استفاده از فرکانسهای طبیعی برای شناسایی موضعی آسیب کافی نیست، هر چند در شناسایی کلی آسیب می تواند موثر باشد [15]. 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 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 شاخص خرابی اصلاحی را به منظور بهبود دقت شناسایی آسیب در سازه های با اعضای زیاد توسعه داده و کارایی آن را بر روی یک تیر دو دهانه آزمایش نمودند [17]. چنگ و همکاران روشی را برای شناسایی مکان آسیب های یک المان صفحه ای با استفاده از شکل مودهای بدست آمده از روش رایلی ریتز ارائه کرده و با مدلسازی عددی و آزمایش تجربی نشان دادند که این روش قابلیت بالایی برای شناسایی آسیب های تکی و چندگانه دارد [18]. ژن و همکاران به مکان یابی آسیب در سکوهای فراساحلی تحت تحریک های محیطی پرداخته و یک روش جدید برای شناسایی آسیب ارائه کردند که از ویژگی عدم تغییر انرژی کرنشی مودال استفاده می کرد. روش آن ها انرژی کرنشی مودال المانی را به دو بخش، نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال فشاری (CMSECR) و دیگری نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال خمشی (FMSECR) تقسیم نموده و دو شاخص آسیب ارائه می داد [19]. جی و لوئی روشی را بر پایه مدل اجزا محدود و با استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه که شامل فرکانس ها و اشکال مودی بود، به منظور شناسایی و تعیین شدت آسیب ارائه دادند [20]. وانگ و همکاران از روش انرژی کرنشی مودال به منظور شناسایی آسیب در سکوهای دریایی با استفاده از داده های مودال ناقص (تنها دو شکل مود اول) استفاده کرده و چندین سناریو شامل آسیب به مهارندهای قطری را شبیه سازی نمودند [21]. 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 می توان از این روش در شناسایی آسیب در شاهتیر و عرشه پلها که رفتاری نظیر تیر و صفحه دارند استفاده نمود [22]. هو و وو شاخص آسیب را برای شناسایی آسیب در ورقها بر اساس روش انرژی کرنشی مودال توسعه دادند

جکت

جکت متشکل از سازه حداقل چهارپایه‌ای است که از لوله های فولادی استوانه تشکیل شده است و برای عمق آب ۲۵ تا ۵۰ متر مورد استفاده قرار می گیرد [31].



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

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 [33].

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

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.

انواع پایه های موجود برای توربینهای بادی فراساحلی

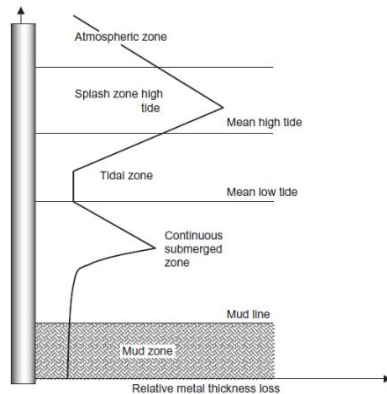
تاکنون، بیشتر زیرسازه های استفاده شده برای توربینهای بادی دور از ساحل از نوع مونوپایل بوده است که بیش از ۸۰ درصد کل ظرفیت توربینهای بادی تا سال ۲۰۱۶ را شامل می شود. در سال ۲۰۱۶ به تنهایی ۸۸ درصد از توربینهای جدید از فونداسیون مونوپایل و در ۱۲ درصد دیگر از جکتهای چهارپایه و تریپاد استفاده شد که برای اعماق آب بیشتر از ۲۵ متر و در سایتها با امواج قوی تر مورد استفاده قرار می گیرند. بیشتر زیرسازه های توربینهای بادی فراساحلی به صورت بدون نیاز به بازرسی طراحی می شوند تا در یک دوره عمر مشخص، بین بیست تا سی سال، بدون نیاز به هرگونه بازرسی یا تعمیرات، مقاومت کنند. دینامیک زیرسازه نقش مهمی در دستیابی به طول عمر طراحی شده دارد. برای مثال، فرکانس طبیعی اولین شکل مود سازه ای در اندرکنش بین موج و فونداسیون نقش دارد. مثلاً، یک طراحی با فرکانس رزونانس پایین تر، در برابر ارتعاش ناشی از امواج و بنابراین در برابر بار خستگی افزایش یافته، حساستر است [30]. در این قسمت به مرور انواع متداول زیرسازه های استفاده شده در توربینهای بادی دور از ساحل پرداخته می شود.

مونوپایل

این نوع زیرسازه توربین بادی دارای طراحی ساده ای بوده و از یک سازه ای لوله ای شکل تشکیل شده است. از این سازه بیشتر برای عمق آب کمتر از ۲۵ متر استفاده می گردد. 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].

تریپاد

تریپاد متشکل از یک سازه سه پایه است که از لوله های فولادی استوانه ای تشکیل شده است. این سازه بیشتر برای اعماق آب حدود ۲۵ متر مورد استفاده قرار می گیرد [31].



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

انرژی کرنشی مودال

وقتی یک جسم الاستیک تحت اثر نیرو قرار می گیرد، در آن تنش ایجاد شده، جسم تغییر شکل داده و وضعیت نقاط مختلف آن نسبت به حالت اولیه تغییر پیدا می کند. تغییر نقطه اثر نیروهای اعمالی به جسم سبب می شود که در هنگام اعمال آنها مقداری کار انجام شود. کار مزبور که همراه با تغییر شکل جسم در وضعیت تنش می باشد، باعث ذخیره مقداری انرژی به صورت انرژی ارتجاعی در جسم می شود که به آن انرژی کرنشی گفته می شود. انرژی کرنشی مودال و وضعیتی است که نیرویی به سازه وارد نمی شود و سازه در حالت ارتعاش آزاد قرار دارد که با تحلیل دینامیکی و حل روابط ارائه شده می توان انرژی کرنشی مودال هر عضو را بدست آورد. خرابی در یک سازه معمولاً سبب کاهش سختی سازه می شود و بر ماتریس جرم سازه تأثیری نمی گذارد. در یک سازه خطی بدون آسیب، با NE المان و N گره، \mathbf{N} امین سختی مودال سازه از رابطه زیر بدست می آید [17]

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

که در این رابطه، Φ_i ، \mathbf{i} امین بردار شکل مود سازه و C ماتریس سختی سازه است. مشارکت \mathbf{z} امین عضو در \mathbf{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} ، \mathbf{i} امین سختی مودال المان \mathbf{z} ام و C_j مشارکت المان \mathbf{z} ام در ماتریس سختی سازه است.

نسبت حساسیت المان \mathbf{z} ام در مود \mathbf{i} ام سازه سالم از رابطه ۳ محاسبه خواهد شد:

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

برابر خوردگی، معمولاً از پوششهای محافظ و حفاظت خوردگی استفاده می شود، ولی این انواع حفاظت به برخی دلایل، دارای تأثیر کامل نبوده و خوردگی سبب زیانهای اقتصادی فراوانی می شود [34]. 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 [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 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 خط گل، خوردگی به حداقل می رسد، چرا که هیچ اکسیژنی در آن وجود نداشته و فیلمهای محافظتی، سالم باقی می مانند. 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.

همین نسبت برای سازه در حالت آسیب برابر است با:

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

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

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

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

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

با تقسیم معادله ۴ بر معادله ۳ داریم:

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

مقادیر C_j و C_j^* از روابط زیر بدست می آیند:

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

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

که در آن E_j و E_j^* به ترتیب مشخصات سختی مصالح (مدول الاستیسیته) زمین المان در حالت سالم و آسیب دیده می باشد و C_{j0} تنها مشخصات هندسی عضو j ام را در بر می گیرد.

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

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

با جایگزین کردن معادلات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ در معادله ۷ و بازنویسی معادله بالا خواهیم داشت:

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

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

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

با جایگذاری معادلات ۳ و ۴ در معادله ۱۲ داریم:

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

در صورت جایگذاری معادلات ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در معادله بالا برای تمام مود های موجود (NM) و تمام المان ها (NE) به یک شاخص آسیب برای هر المان می رسیم که خواهیم داشت:

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^{*T} C_{j0} \Phi_i^* + \sum_{k=1}^{NE} \Phi_i^{*T} C_{k0} \Phi_i^*) K_i}{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^T C_{j0} \Phi_i + \sum_{k=1}^{NE} \Phi_i^T C_{k0} \Phi_i) K_i} \quad (14)$$

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

بعد از بدست آوردن β_j برای هر المان با استفاده از رابطه زیر شاخص آسیب نرمالیزه می گرد [12]:

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

روش انرژی کرنشی مودال اصلاحی

در تعیین شاخص خرابی استابس تنها از شکل مودها استفاده می شود و فرکانسهای طبیعی در تعیین محل آسیب در نظر گرفته نمی شوند. با این وجود، تحقیقات قبلی نشان داده است که فرکانسهای مودال را می توان با دقت بسیار بیشتری نسبت به شکل مودها تعیین نمود. لی و همکاران به منظور بهبود روش استابس، از اطلاعات فرکانس در تعیین شاخص آسیب استفاده نمودند [28]. تحلیل ویژه برای سازه های سالم و آسیب دیده را می توان به صورت زیر نوشت:

$$C \Phi_i = \omega_i^2 M \Phi_i \quad (16)$$

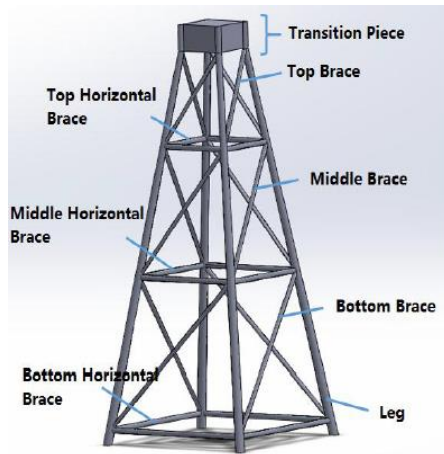
$$C^* \Phi_i^* = \omega_i^{*2} M^* \Phi_i^* \quad (17)$$

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

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

$$K_i = \Phi_i^T C \Phi_i = \omega_i^2 \Phi_i^T M \Phi_i \quad (18)$$

$$K_i^* = \Phi_i^{*T} C^* \Phi_i^* = \omega_i^{*2} \Phi_i^{*T} M \Phi_i^* \quad (19)$$



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

جدول ۱ - مشخصات سکوی جکت JX [38].

نوع جکت	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

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 می‌گردد. سپس با تعریف سناریوهای مختلف آسیب‌های تکی و چندتایی، به بررسی روش انرژی کرنشی مودال پرداخته می‌شود. جدول زیر سناریوهای مختلف آسیب را به صورت مختصر شده نشان می‌دهد.

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

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (\phi_i^{*T} C_j \phi_i^* + \phi_i^{*T} C \phi_i^*) K_i}{\sum_{i=1}^{NM} (\phi_i^T C_j \phi_i + \phi_i^T C \phi_i) K_i^*} \quad (20)$$

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

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (\phi_i^{*T} C_j \phi_i^* + K_i^*) K_i}{\sum_{i=1}^{NM} (\phi_i^T C_j \phi_i + K_i) K_i^*} \quad (21)$$

با جایگزینی معادلات ۱۸ و ۱۹ در رابطه ۲۱ داریم:

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

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 ام را با α_j نشان دهیم به طوری که $\alpha_j \geq -1$ باشد، طبق تعریف داریم:

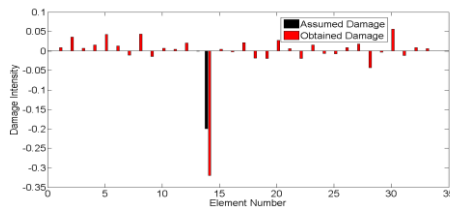
$$E_j^* = E_j (1 + \alpha_j) \quad (23)$$

با ترکیب معادلات ۱۱ و ۱۶ خواهیم داشت:

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

تشخیص مکان و شدت آسیب در سکوی جکت توربین بادی

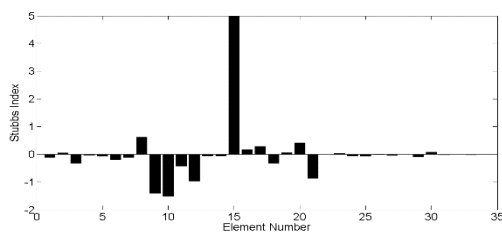
در این قسمت به شناسایی آسیب در زیر توربین بادی سکوی چهار پایه شابلونی JX پرداخته می‌شود. این سکو که یکی از متداولترین سکوهایی پایه توربین بادی است، دارای ارتفاع ۶۶ متری و مقطع متوازی الاضلاع است. اطلاعات سکو در جدول ۱ آورده شده است [38]. نمای سکو در شکل ۳ نشان داده شده است.



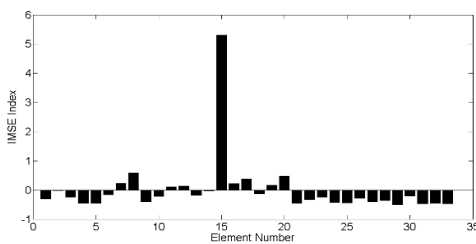
شکل ۵- تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنش مدال در سناریوی اول.

سناریوی دوم: 1/ آسیب به عضو شماره 15

در این سناریو، عضو شماره 15 به میزان 1 در صد دچار آسیب شده است. محل و شدت آسیب در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، دقت روش بهبود یافته در شناسایی محل آسیب بیشتر از روش استابس است، به طوری که شاخص آسیب در عضو آسیب دیده با دقت بالا نمایش داده شده است، همچنین این شکل نشان می دهد این روش در شناسایی عضو آسیب دیده با شدت آسیب کم، دقت بالایی دارد. شکل ۷ نشان می دهد که این روش شدت آسیب را با دقت بالا تخمین می زند.



(الف)



(ب)

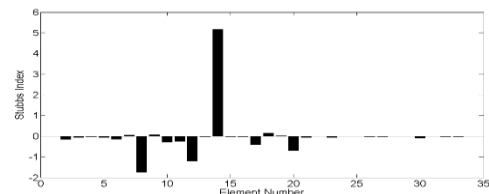
شکل ۶- شناسایی محل آسیب با استفاده از (الف) Stubbs و (ب) IMSE در سناریوی دوم.

جدول ۲- سناریوهای مختلف آسیب به سکوی شابلونی چهارپایه

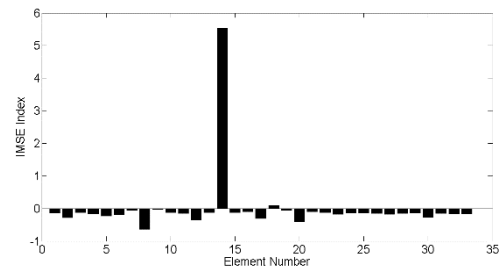
شماره سناریو	شماره المان	میزان آسیب
۱	۱۴	۲۰٪
۲	15	۱٪
۳	۱۵	۴۰٪
۴	۱۵&۱۴	۲۰٪

سناریوی اول: ۲۰٪ آسیب به عضو شماره ۱۴

در این سناریو، عضو شماره ۱۴ به میزان ۲۰ در صد دچار آسیب شده است. محل و شدت آسیب در شکل ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، دقت روش بهبود یافته در شناسایی محل آسیب بیشتر از روش اولیه استابس است، به طوری که شاخص آسیب در عضو آسیب دیده با دقت بالاتری نمایش داده شده است. شکل ۵ نشان می دهد که این روش شدت آسیب را با دقت بالا تخمین می زند.

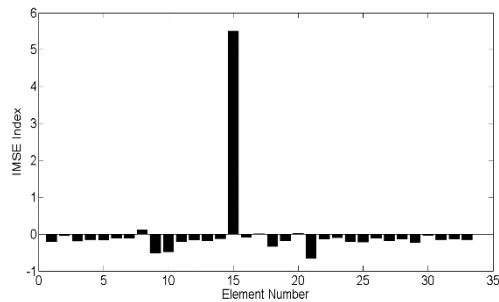


(الف)



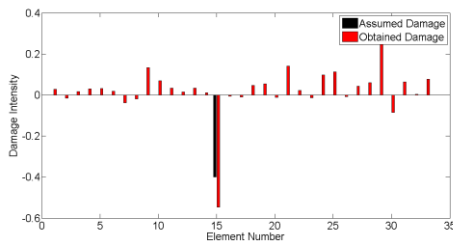
(ب)

شکل ۴- شناسایی محل آسیب با استفاده از (الف) Stubbs و (ب) IMSE و در سناریوی اول.



(ب)

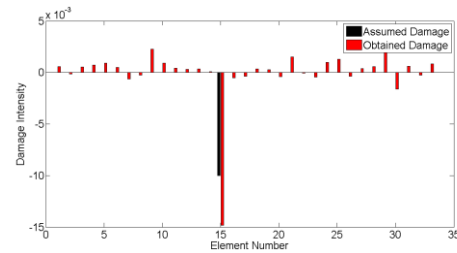
شکل ۸- شناسایی محل آسیب با استفاده از (الف) Stubbs و (ب) IMSE در سناریوی سوم.



شکل ۹- تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنش مدال در سناریوی سوم.

سناریوی چهارم: ۲۰٪ آسیب به عضو شماره ۱۴ و ۱۵

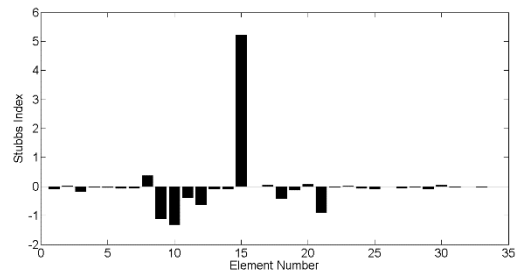
در این سناریو، عضو شماره ۱۴ و ۱۵ به میزان ۲۰ درصد دچار آسیب شده است. محل و شدت آسیب در شکل ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، دقت روش بهبودیافته در شناسایی محل آسیب بیشتر از روش استابس است، به طوری که شاخص آسیب در عضو آسیب دیده با دقت بالا نمایش داده شده است، همچنین این شکل نشان می‌دهد این روش در شناسایی اعضای آسیب دیده به طور همزمان، دقت بالایی دارد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که این روش شدت آسیب را با دقت بالا تخمین می‌زند.



شکل ۷- تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنش مدال در سناریوی دوم.

سناریوی سوم: ۴۰٪ آسیب به عضو شماره ۱۵

در این سناریو، عضو شماره ۱۵ به میزان ۴۰ درصد دچار آسیب شده است. محل و شدت آسیب در شکل ۸ و ۹ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده، دقت بهبود یافته در شناسایی محل آسیب بیشتر از روش استابس است، به طوری که شاخص آسیب در عضو آسیب دیده با دقت بالا نمایش داده شده است، همچنین این شکل نشان می‌دهد این روش در شناسایی عضو آسیب دیده با شدت آسیب زیاد، دقت بالایی دارد. شکل ۹ نشان می‌دهد که این روش شدت آسیب را با دقت بالا تخمین می‌زند.



(الف)

روشهای شناسایی غیر مخرب آسیب در سازه ها است، به شناسایی آسیبهای تکی و چندگانه با شدتهای کم و زیاد در یکی از متداول توربینهای بادی دور از ساحل، جکت که به صورت سه بعدی شبیه سازی شده، پرداخته شده و نتایج روش معرفی شده با دو روش شاخص استابس و روش انرژی کرنشی مودال اصلاحی مقایسه گردیدند. نتایج زیر از این تحقیق بدست آمد:

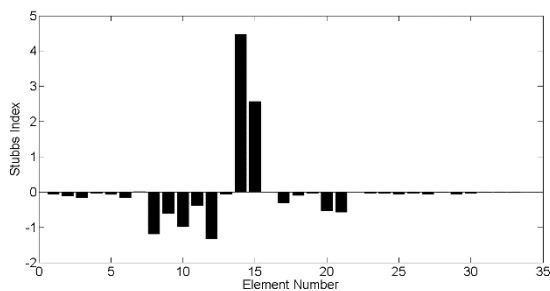
۱- روش انرژی کرنشی مودال می تواند به نحو مناسبی شدت و مکان آسیب را در توربینهای بادی دور از ساحل قبل از شروع تخریب شناسایی نماید.

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

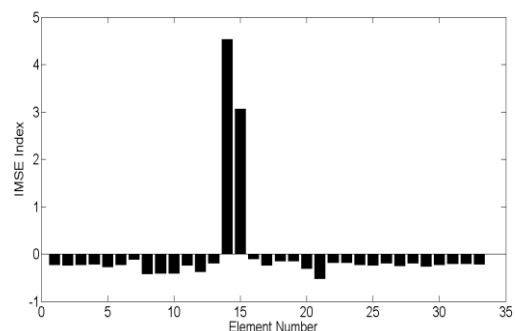
۳- این روش در شناسایی آسیب در عرشه و ناحیه پاشش که از اهمیت بیشتری نسبت به سایر اعضای توربینهای بادی دور از ساحل برخوردار بوده و از اهداف اصلی این تحقیق هستند، دارای عملکرد مناسبی بود.

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

به دلیل متداولتر بودن زیرسازه جکت 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 جکت چهارپایه متفاوت است و در تحلیلها تفاوت قابل ملاحظه ای ایجاد می کند، بررسی آن در تحقیق جداگانه ای توصیه می گردد. همچنین پیشنهاد می گردد در مطالعات بعدی نقش رویدنی های دریایی در شناسایی محل و شدت آسیب در سازه های دریایی بررسی گردند.

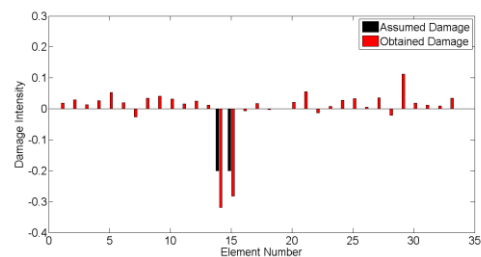


(الف)



(ب)

شکل ۱۰- شناسایی محل آسیب با استفاده از (الف) Stubbs و (ب) IMSE در سناریوی چهارم.



شکل ۱۱- تعیین شدت آسیب با استفاده از روش انرژی کرنش مودال در سناریوی چهارم.

نتیجه گیری

با نزدیک شدن به عمر مفید بهره برداری در توربین های بادی دور از ساحل، نیاز به پایش سلامت آنها برای شناسایی مکان و شدت آسیب های احتمالی وارده در زیر سازه ها ضروری به نظر می رسد. در این تحقیق، با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال که یکی از مناسبترین

مراجع

- modal data sets for damage detection via model update," in *34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 1993.
- [12] Kim J T and Stubbs N, "Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information," *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 5, pp. 58-66, 1995.
- [13] Stubbs N, Kim J T and Farrar C R, "Field verification of a non-destructive damage localization and severity estimation algorithm," in *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1995.
- [14] Stubbs N and Kim J T, "Damage localization in structures without baseline modal parameters," *AIAA Journal*, vol. 34, pp. 1644-1649, 1996.
- [15] Salawu O S, "Detection of structural damage through changes in frequency: a review," *Engineering Structures*, vol. 19, pp. 718-723, 1997.
- [16] Farrar C R and Jauregui D A, "Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study," *Smart Materials and Structures*, vol. 7, pp. 720-731, 1998.
- [17] Kim J T and Stubbs N, "Improved damage identification method based on modal information," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 252, pp. 223-238, 2002.
- [18] Li Y Y, Cheng L, Yam L H and Wong W O, "Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach," *Computers & Structures*, vol. 80, pp. 1881-1894, 2002.
- [19] He-Zhen Y, Hua-jun L and Shu-qing W, "Damage localization of offshore platforms under ambient excitation," *China Ocean Engineering*, vol. 17, pp. 495-504, 2003.
- [20] Ge M and Lui E M, "Structural damage identification using system dynamic properties," *Computers & Structures*, vol. 83, pp. 2185-2196, 2005.
- [21] Shih H W, Thambiratnam D P and Chan T H, "Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria
- [1] [Online]. Available: <https://gwec.net/record-6-1-gw-of-new-offshore-wind-capacity-installed-globally-in-2019/>.
- [2] Rolfes R, Zerbst S, Haake G, 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] Fritzen C P, "Vibration-Based Techniques for SHM," in *Structural Health Monitoring*, 2006, pp. 45-224.
- [4] Bouty C, Schafhirt S, Ziegler L and Muskulus M, "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.
- [5] Doebling S, Farrar C T, Prime M B and Shevitz D W, "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] Balageas D, "Introduction to Structural Health Monitoring," in *Structural Health Monitoring*, Wiley, 2006, pp. 13-43.
- [7] Doebling S W, Farrar C R, M. Prime M B and Shevitz D W, "A summary review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties," *Journal of Shock Vibration*, vol. 30, pp. 91-105, 1995.
- [8] Cawley P and Adams R D, "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] Shahrivar F and Bouwkamp G, "Damage detection in offshore platforms using vibration information," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 108, pp. 97-106, 1986.
- [10] Hansen S R and Vanderplaats G N, "Approximation method for configuration optimization of trusses," *AIAAJ*, vol. 28, pp. 161-168, 1990.
- [11] Doebling S, Hemez F, Barlow M, L. Peterson and C. Farhat, "Selection of experimental

- wind turbine support structures," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2831-2837, 2011.
- [31] Bailey H, Brookes K L and Thompson P M, "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] Melchers R E, "Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, pp. 1484-1493, 2003.
- [34] Velaquez J C, Van J M Der Weide, Hernandez E and Hernandez H H, "Statistical Modeling of Pitting Corrosion: Extrapolation of the maximum pit depth-growth," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 9, pp. 4129-4143, 2014.
- [35] Paik J K and Melchers R E, Corrosion wastage in aged structures, 1st ed., Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2008.
- [36] El-Reedy M, "Chapter Six: Corrosion Protection," in *Offshore Structures: Design, Construction and Maintenance*, Gulf Professional Publishing, 2012.
- [37] Chen I W, Wong B L, Lin Y H, Chau S W and Huang H H, "Design and analysis of jacket substructures for offshore wind turbines," *Energies*, vol. 9, pp. 1-24, 2016.
- approach," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 323, pp. 645-661, 2009.
- [22] Hu H and Wu C, "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] Seyedpoor S M, "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] Liu F, Li H, Li W and Wang B, "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] Seyedpoor S M and Yazdanpanah O, "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] Wang S, Liu F and Zhang M, "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] Martinez-Luengo M, Kolios A and Wang L, "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] Nguyen C U, Huynh T C and Kim J T, "Vibration-based damage detection in wind turbine towers using artificial neural networks," *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 5, pp. 507-519, 2018.
- [29] Weijtjens W, Verbelen T, Capello E and Devriendt C, "Vibration based structural health monitoring of the substructures of five offshore wind turbines," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 2294-2299, 2017.
- [30] Lozano-Minguez E, Kolios A J and Brennan F P, "Multi-criteria assessment of offshore

Investigation of location and severity of damage in four-legged offshore wind turbine stencil infrastructure by improved modal strain energy method

Seyed Reza Samaei

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

Majid Ghodsi Hassanabad

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

Mohammad Asadian Ghahfarrokhi

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

Mohammad Javad Ketabdari

Associate Professor, Department of Marine Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Truss structures are among the most common offshore structures that are exposed to various damages during their service life. Unlike onshore structures, these structures are constantly exposed to waves, corrosion and damage to members, especially in their deck and splash zone. At shallow water depths, these structures are commonly used as the main structures for offshore wind turbines. After a significant period of life time of these turbines in the world, monitoring their structural health has become necessary. In this study, considering the difference between onshore and offshore structures that are exposed to periodic loads of waves and high seawater corrosion, improved modal strain energy method was used. In this method, the natural frequencies for detecting and quantifying the possible damages in deck and splash zone elements, which are more prone to damage, were considered. The results presented that the improved modal strain energy method had a higher accuracy in locating the damage than the original method (Stubbs index). Also, single and multiple damages, with low and high intensity, were determined with appropriate accuracy by this method.

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