

## بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه در تشخیص خرابی برج توربین بادی توسط موجک‌های دو متعامد

محسن مهر مطلق<sup>۱</sup>، آرش بهار<sup>۲\*</sup>، امید بهار<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۳</sup> پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

### کلمات کلیدی:

برج توربین بادی

تشخیص خرابی

اندرکنش خاک - سازه

تجزیه موجک ۲-بعدی چند سطحه

موجک دو متعامد

**خلاصه:** باد از منابع پاک انرژی است. تمایل به استفاده از توربین‌های بادی در دهه‌های اخیر در دنیا روندی رو به رشد داشته است. اندازه و ظرفیت توربین‌های بادی به منظور کسب بیشتر انرژی باد، به سرعت در حال افزایش می‌باشد. آمار نشان می‌دهد توربین‌های بزرگ‌تر، بیشتر خراب شده و نیازمند نگهداری بیشتری هستند. هدف صاحبان مزارع بادی، هماهنگی و نظارت بر کار به منظور کاهش زمان از کار افتادگی و افزایش بهره‌وری توربین‌های مزرعه بادی می‌باشد. برج توربین بادی، کل توربین بادی را حمل کرده و دارای مقام دوم هزینه توربین بادی است. با اینکه خرابی برج می‌تواند کل توربین بادی را به خطر انداخته و سبب خرابی وسیع گردد ولیکن تحقیقات این بخش از توربین نسبت به تأسیسات مکانیکال توربین بادی، ناچیز است. به علاوه تحقیق جامعی نیز در پایش سلامت برج با اندرکنش خاک - سازه انجام نشده است. در این تحقیق از موجک‌های دو متعامد به منظور پردازش شکل مودی برج آسیب‌دیده استفاده گردید. توربین بادی ساحلی ۵ مگاواتی آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر وزارت نیرو آمریکا، در نرم‌افزار المان محدود آباکیوس مدل گردید و صحت‌سنجی شد. پی سطحی به ابعاد  $1 \times 20 \times 20$  مترمکعب و خاک‌ها از نوع رس عادی تحکیم یافته و ماسه متراکم، در نظر گرفته شد. تعداد هجده سناریوی خرابی، تعریف گردید. نتایج تحقیق بیانگر این است که به منظور تشخیص خرابی استفاده از شکل‌های مودی پهلوی - پهلوی برج، دارای برتری محسوسی نسبت به شکل‌های مودی جلو - عقب هستند. نظر به تأثیرگذاری مطلوب تأثیر اندرکنش خاک - سازه بر روی دقت تشخیص خرابی، لزوم در نظر گرفتن این اثر در تحلیل‌ها، تأکید می‌گردد.

ارائه می‌دهد [۱].

### ۱- مقدمه

اندازه و ظرفیت توربین‌های بادی به منظور کسب بیشتر انرژی از باد، به سرعت در حال افزایش است [۲] و تحقیقات نشان می‌دهند که توربین‌های بزرگ‌تر، بیشتر خراب شده و نیازمند نگهداری بیشتری هستند [۳]. برای اینکه منبع انرژی بادی بتواند قابل رقابت باشد، نیازمند پیشرفت فن‌آوری توربین‌های بادی، بازدهی بیشتر، نگهداری کم و هزینه‌های پایین است. به علاوه توربین‌های بادی باید قادر به مقاومت در محیط‌های حدی<sup>۱</sup> بوده و به مدت ۲۰ سال یا بیشتر، کار کنند [۴ و ۵]. زمان از کارافتادگی توربین ناشی از خرابی، معادل کاهش درآمد برای بهره‌بردار مزرعه بادی است. از این‌رو هدف

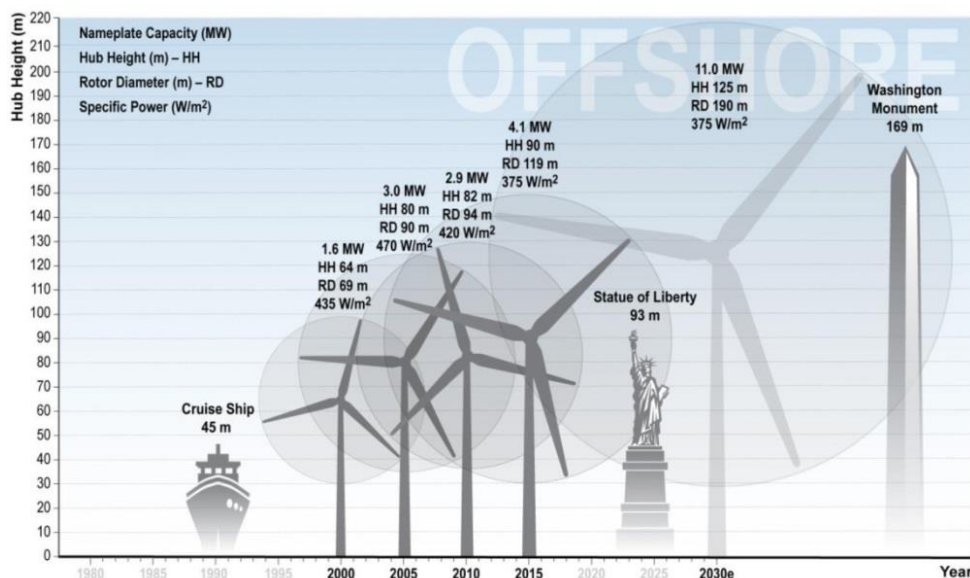
باد از منابع پاک انرژی است. تمایل به استفاده از این انرژی با توربین‌های بادی در دهه‌های اخیر در دنیا روندی افزایشی داشته است. علت این امر را می‌توان در افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، محدودیت و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از استفاده آن‌ها دانست. بر اساس نظر متخصصان باد، توربین بادی بزرگ‌تر، سبب کاهش بیشتر هزینه انرژی باد در خشکی و دریا می‌شود. همچنین آن‌ها پیش‌بینی می‌کنند که رشد تکاملی در اندازه متوسط توربین در زمین و رشد انقلابی آن در فرا ساحل، ادامه خواهد داشت. شکل ۱ روند تاریخی جهانی اندازه توربین دریایی و رشد مورد انتظار آن را در سال ۲۰۳۰

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bahar@guilan.ac.ir

1 Extreme environments

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. رشد مورد انتظار در اندازه و تولید توربین‌های فراساحلی [۱]  
**Fig. 1. Expected growth in offshore turbine size globally [1]**

توربین انجام نگرفته است. در ادامه گوشه‌ای از تحقیقات صورت گرفته پیرامون توربین بادی ارائه شده است. گروس<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۹ و با استفاده از داده‌های پاسخ مودال توربین بادی، خرابی آن را تشخیص دادند. داده‌های شبیه‌سازی توربین بادی، با به کار بردن نتایج آزمایش چکش مودال به دست آمدند. پاسخ‌های سازه توسط شتاب‌نگارهای نصب شده بر روی چرخنده<sup>۲</sup> توربین بادی (محور افقی) جمع‌آوری شدند. گوشال<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۰، سعی بر شناسایی زود هنگام خرابی پره توربین بادی کردند به طوری که از خرابی کامل توربین بادی جلوگیری نمایند. آن‌ها چهار الگوریتم مختلف شامل تابع انتقال<sup>۴</sup>، سنجش تشدید<sup>۵</sup>، شکل تغییر یافته کاربردی<sup>۶</sup> و روش‌های انتشار<sup>۷</sup> را به منظور تعیین خرابی پره توربین بادی به کار گرفتند. در این تحقیق، ابزارهای پیزوسرامیک، پره‌ها را تحریک می‌کردند و پاسخ ارتعاشی پره‌ها توسط روش‌های مورد اشاره، اندازه‌گیری شدند. ساندرسن<sup>۸</sup> و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۲، به پایش سلامت پره توربین بادی توسط آزمایش استاتیکی

بهره‌برداری، هماهنگی و نظارت بر کار به منظور کاهش زمان از کارافتادگی و افزایش بهره‌وری هر یک از توربین‌های مزرعه بادی می‌باشد [۶].

در حال حاضر تعداد خرابی توربین بادی در جهان، به میزان یک مورد در هر روز می‌باشد [۷]. برآورد دقیق تعداد توربین‌های بادی خراب‌شده، مشکل است. به طور کلی یک سوم اکثر آسیب‌های توربین بادی، شامل خرابی پره‌ها و برج آن می‌شود. همچنین بیشترین نوع متداول خرابی توربین‌های بادی به خاطر همین دو عضو می‌باشد [۹] و [۸]. البته خرابی سازه برج، به عنوان خرابی اصلی به حساب می‌آید و به مراتب خسارت بارت‌ر و پره‌زیننه‌تر از خرابی پره است. این آسیب می‌تواند به خاطر دلایل زیادی از قبیل کنترل کیفیت ضعیف، نصب غلط و خرابی اجزاء باشد که ممکن است منجر به واژگونی توربین نیز شود [۱۰ و ۸]؛ بنابراین بسیار حیاتی است که پتانسیل خرابی در توربین بادی به منظور اجتناب یا کم کردن آسیب‌ها، حفظ عملکرد و بهره بیشتر، مورد پایش قرار گیرد [۱۱].

1 Gross  
 2 Rotor  
 3 Ghoshal  
 4 Transmittance function  
 5 Resonant comparison  
 6 Operational deflection shape  
 7 Wave propagation  
 8 Sundaresan

#### ۱-۱- پیشینه پایش سلامت سازه

پیشینه پایش سلامت توربین بادی، معطوف به تأسیسات مکانیکال و پره توربین می‌شود و فعالیت جامعی در مورد سازه برج

توربین بادی با رفتار غیرخطی پرداختند. در این تحقیق، مشخصات مودال پره خراب شده که بر اثر بارهای آیرودینامیکی، دچار تغییر شکل شده بود توسط نرم‌افزار تجاری المان محدود ANSYS به دست آمد. برای مدل سازه، مشخصات پره توربین بادی ۵ مگاواتی آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر وزارت نیرو آمریکا<sup>۱۶</sup>، اختیار گردیده بود. نتایج حاکی از حساسیت انحنای شکل مودی و شاخص انرژی کرنشی مودال پره، نسبت به خرابی موضعی آن بود.

## ۲-۱- پیشینه اندرکنش خاک - سازه

توربین بادی بلند و باریکی با ارتفاع توپی برابر ۹۰ متر از زمین، همانند ساختمانی است که اثرات اندرکنش خاک - سازه را (به خصوص برای سرعت موج برشی مساوی و کمتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه) تجربه می‌کند [۲۰]. زاجر<sup>۱۷</sup> [۲۱] در سال ۲۰۰۲ رفتار دینامیکی پی‌های توربین‌های بادی فراساحلی را مدل‌سازی نموده و حساسیت فرکانس طبیعی تکیه‌گاه سازه را نسبت به انواع پی‌ها مطالعه کرد. این کار توسط کمپ<sup>۱۸</sup> و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۳ گسترش داده شد و عدم قطعیت چندین مشخصه ژئوتکنیکی کلیدی، مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق نشان داد حساسیت پی‌های سطحی نسبت به پارامترهای خاک، بیشتر از پی‌های شمع است. با دنبال کردن این موضوع توسط زاجر<sup>۱۹</sup> [۲۳] در سال ۲۰۰۶ حساسیت فرکانس طبیعی تکیه‌گاه سازه، نسبت به ارتعاشات مدل‌های پی‌های شمع، نشان داده شد. مورتاق<sup>۲۰</sup> و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۰۵ نشان دادند که در نظر گرفتن سیستم خاک - پی منعطف، اثر کاهشی بر فرکانس طبیعی پایه توربین بادی داشته و باعث مقدار قابل توجهی میرایی در سیستم می‌شود. زو<sup>۲۱</sup> و میسر<sup>۲۲</sup> [۲۵] در سال ۲۰۰۶، شبیه‌سازی‌های عددی از اثرات اندرکنش خاک - سازه بر روی ویژگی‌های دینامیکی برج‌های توربین بادی با استفاده از فنرهای خطی که وضعیت انعطاف‌پذیری خاک را نشان می‌دادند، انجام دادند. آن‌ها در نهایت نتیجه گرفتند که اثرات اندرکنش خاک - سازه به طور ویژه در تحلیل سازه توربین بادی بر روی خاک نسبتاً منعطف، مهم می‌باشد.

پرداختند. هدف تحقیق آن‌ها، شناسایی آسیب پره در خلال آزمایش بار متناوب، توسط امواج تنش منتشر شده در مقاطع بحرانی پره، بود. خرابی پره با مقایسه پارامترهای موج تنش، تعیین شد. این تحقیق، اولین مطالعه با این روش برای تشخیص خرابی پره با مقیاس کامل و در خلال بارگذاری بود. بلانش<sup>۱</sup> و دوتون<sup>۲</sup> [۱۵] در سال ۲۰۰۳، به تشخیص خرابی پره توربین بادی در حال چرخش، توسط انتشار امواج صوتی<sup>۳</sup> در محیط آزمایشگاه، پرداختند. آن‌ها با استفاده از این روش و توسط سیگنال غیرقابل شنیدن، موفق به تشخیص موقعیت و رشد تدریجی خرابی در پره توربین شدند.

اوم<sup>۴</sup> و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۸، به پایش سلامت پره توربین بادی ساخت شرکت وارتم<sup>۵</sup> با استفاده از حسگرهای توری براگ فیبری<sup>۶</sup> (FBG) پرداختند. این حسگرها که با فن‌آوری مرکب<sup>۷</sup> تولید شده بودند، پایش موفقیت‌آمیز خرابی پره توربین بادی را قادر ساختند. دولینسکی<sup>۸</sup> و کراسوک<sup>۹</sup> [۱۷] در سال ۲۰۰۹، به تشریح شبیه‌سازی عددی موقعیت خرابی در پره توربین بادی، با استفاده از پارامترهای مودال و روش تبدیل موجک<sup>۱۰</sup> پرداختند. به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، پره‌ای با مقیاس کوچک مشابه هندسه و ویژگی‌های مکانیکی مدل کامپیوتری، ساخته شد. پارک<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۸] به سال ۲۰۱۴، از نوسان‌سنج داپلر لیزر<sup>۱۲</sup>، به منظور اندازه‌گیری امواج فراصوتی استفاده نمودند. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به حسگرهای تعبیه شده، به کارگیری آسان در محدوده بزرگ و تشخیص خرابی بدون نیاز به داده‌های مبنا، اشاره کرد. این روش به طور موفقیت‌آمیزی، جداسازی در بال هواپیمایی که از فیبر کربن پلیمری تقویت شده<sup>۱۳</sup> (CFRP) ساخته شده بود و تورق در نمونه‌های پره توربین بادی GFRP را تشخیص داد. رضایی<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۶، به ارائه روش تشخیص خرابی پایه مودال<sup>۱۵</sup>، برای پره

- 1 Blanch
- 2 Dutton
- 3 Acoustic Emission (AE)
- 4 Eum
- 5 VaRTM
- 6 Fiber Bragg Grating
- 7 Multiplex
- 8 Doliński
- 9 Krawczuk
- 10 Wavelet transform
- 11 Park
- 12 Laser Doppler vibrometer
- 13 Carbon fiber reinforced plastic
- 14 Rezaei
- 15 Modal-based

- 16 NREL
- 17 Zaaijer
- 18 Camp
- 19 Zaaijer
- 20 Murtagh
- 21 Zhao
- 22 Maissner

سازه نگه‌دارنده کل توربین بادی بوده و خرابی آن باعث واژگونی کل توربین شده و بسیار فاجعه‌بار است، لزوم تحقیق در این مقوله احساس گردید. با توجه به مشخصات فنی گوناگون توربین‌های بادی، توربین بادی ساحلی مبنای ۵ مگاواتی آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر وزارت نیرو آمریکا<sup>۹</sup> (توربین بادی ۵ مگاواتی مینا) که توربین بزرگی نیز به حساب می‌آید، مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور تعداد هجده سناریوی خرابی شامل دو موقعیت رو به باد و عمود بر جهت باد و تعداد نه شدت آسیب‌دیدگی، تعریف شد. تشخیص خرابی برج، با استفاده از تجزیه موجک ۲-بعدی چند سطحه<sup>۱۰</sup> و موجک‌های دو متعامد<sup>۱۱</sup> و تجزیه سطح‌های<sup>۱۲</sup> ۱، ۲ و ۳، صورت گرفت. به منظور ارزیابی اثر اندرکنش خاک - سازه، دو نوع خاک رس عادی تحکیم یافته و ماسه متراکم، در نظر گرفته شد.

## ۲- تجزیه موجک ۲-بعدی چند سطحه با موجک‌های دو متعامد

آنالیز موجک یکی از دستاوردهای ریاضیات محض است که امروزه کاربردهای مهمی در بسیاری از رشته‌های علوم و مهندسی دارد. موجک‌های دو متعامد به دلیل تقارن کامل خود، به طور وسیعی در پردازش تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرند. چشم انسان نسبت به نواقص متقارن، تحمل بیشتری دارد. همچنین گسترش تصویر به صورت متقارن برای جلوگیری از جلوه‌های لبه، منجر به پردازش بهتر آن می‌گردد [۳۰]. تحلیل موجک به عنوان یکی از ابزار پردازش پنجره‌ای با اندازه نواحی متغیر، معرفی شده است. تجزیه موجک، مقیاس را به عنوان جایگزین فرکانس در نظر گرفته و سیگنال را به بازه زمان و مقیاس تبدیل می‌کند. تبدیل موجک به دو دسته مجزا و پیوسته تقسیم می‌شود. به طور کلی موجک‌های پیوسته برای تحلیل زمان - فرکانس مناسب‌تر بوده و موجک‌های مجزا برای تجزیه و فشرده‌سازی مناسب‌تر هستند [۳۱].

تبدیل موجک، حاصل همبستگی بین محتوای فرکانسی سیگنال و موجک مادر در مقیاس‌های مختلف است و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۳۲]:

بوش<sup>۱</sup> و مانوئل<sup>۲</sup> [۲۶] در سال ۲۰۰۹ مدل‌های پی با تکیه‌گاه گیردار و انعطاف‌پذیر را با یکدیگر مقایسه کرده و نشان دادند که در نظر گرفتن سیستم خاک - پی می‌تواند در پاسخ دینامیکی توربین تأثیرگذار باشد. ادھیکاری<sup>۳</sup> و هاتاچرا<sup>۴</sup> [۲۷] در سال ۲۰۱۲ رفتار دینامیک توربین‌های بادی روی پی‌های انعطاف‌پذیر که در معرض بارهای موج و باد قرار دارند را بررسی کردند. مدل ایشان بر اساس تیر - ستون اولر - برنولی با تکیه‌گاه‌های الاستیک بوده و تکیه‌گاه‌های انتهایی الاستیک به منظور مدل کردن طبیعت انعطاف‌پذیر اندرکنش این سیستم‌ها با پی، در نظر گرفته شد. هارتی<sup>۵</sup> و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۲ اندرکنش دینامیک بین سازه توربین بادی و سیستم پی را مطالعه نموده و توابع مقاومت الکتریکی به منظور اتصال پی به سازه را مورد استفاده قرار دادند. اگرچه اندرکنش خاک - سازه به طور کلی تأثیر مثبتی بر ارتعاش سازه (با اضافه نمودن میرایی به سیستم) دارد، این تحقیق معلوم کرد که پاسخ تغییر مکان نسبی گهواره<sup>۶</sup> توربین بادی، فقط کاهش اندکی داشته است. در حقیقت، اندرکنش خاک - سازه تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر تغییر مکان کلی گهواره توربین بادی به ویژه در خاک‌های نرم‌تر داشت. فیتزجرالد<sup>۷</sup> و باسو<sup>۸</sup> [۲۹] در سال ۲۰۱۶ به اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه در کنترل سازه‌های توربین‌های بادی پرداخته و نشان دادند هنگامی که در مورد سختی خاک شبه‌اتمی وجود دارد، طرح کنترل غیرفعال ارتعاش، ممکن است بی‌تأثیر باشد، به علاوه کنترل ارتعاش توربین‌های بادی با استفاده از طرح کنترل فعال پیشنهادی ایشان، در شرایطی که مشخصات خاک نامشخص است، امیدوار کننده بود.

### ۱-۳- هدف این تحقیق

همان طوری که در مرور ادبیات فنی نیز مشاهده گردید پایش سلامت سازه بزرگی مانند برج توربین بادی، دارای قدمت کم مطالعاتی نسبت به تأسیسات مکانیکال و پره توربین است. از طرفی، مطالعه‌ای نیز در مورد پایش سلامت توربین بادی همراه با اندرکنش خاک - سازه صورت نگرفته است. نظر به اینکه برج توربین بادی به عنوان

- 1 Bush
- 2 Manuel
- 3 Adhikari
- 4 Bhattacharya
- 5 Harte
- 6 Nacelle
- 7 Fitzgerald
- 8 Basu

9 NREL  
 10 Multilevel 2D wavelet decomposition  
 11 Biorthogonal wavelets  
 12 Decomposition level

زیاد - زیاد<sup>۱۰</sup> تجزیه نماید. این فرآیند تجزیه را می‌توان دوباره بر روی زیر تصویر<sup>۱۱</sup> کم-کم اعمال کرد تا چهار تصویر زیرباند جدید تشکیل شود و این روند را می‌توان دوباره تکرار کرد تا به یک انرژی فشرده در باندهای فرکانس پایین، دست یافت [۳۳].

### ۳- سناریوهای خرابی و روش تشخیص خرابی پیشنهادی

به منظور شناسایی خرابی برج توربین بادی با استفاده از موجک‌های دو تعامدی، تعداد هجده سناریوی خرابی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. موقعیت همه خرابی‌ها، در ارتفاع ۱۰ متری نسبت به کف برج بوده و زاویه‌های ۰ و ۹۰ درجه نسبت به محور رو به باد و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت را پوشش می‌دهند. سناریوهای خرابی، بر اساس تغییر مدول الاستیسیته از مقدار ۱۰ درصد تا ۹۰ درصد مدول الاستیسیته فولاد طراحی برج، با گام ۱۰ درصد، تعیین شده‌اند.

برای تعیین کیفیت تشخیص خرابی در مقادیر ارتفاع ( $\Delta H$ ) و زاویه ( $\Delta \theta$ )، از روابط (۵) و (۶) بهره گرفته شده است. به عنوان یک معیار کلی، کیفیت تشخیص خرابی از جذر میانگین مربعات دو مقدار به دست آمده از روابط مذکور، مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود. فرضیات مورد استفاده در تعیین این روابط و روش پیشنهادی، در شکل ۲ به نمایش درآمده است.

نرم‌افزار MATLAB دارای توابع موجک مختلف بوده که تنوع آن‌ها در نسخه‌های مختلف این نرم‌افزار، متفاوت می‌باشد. نسخه نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق، MATLAB R۲۰۱۶b است و فهرست خانواده‌ها و موجک‌های دو تعامدی این نسخه در جدول ۲ گردآوری شده است. پردازش سیگنال بر روی پاسخ‌های به دست آمده از سازه آسیب‌دیده انجام گردید. در واقع، شکل مودی برج توربین بادی به عنوان سیگنال ورودی و با استفاده از نرم‌افزار Abaqus/CAE استخراج شده و توسط تجزیه موجک ۲-بعدی چند سطحه، پردازش سیگنال به صورت تحلیل‌های متعدد صورت گرفت. در کل سه شکل مودی اول جلو - عقب<sup>۱۲</sup> و سه شکل مودی اول پهلو - پهلو<sup>۱۳</sup> سازه آسیب دیده، استفاده شدند. مقادیر حداکثر ضریب تجزیه قطری

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

که به آن تبدیل موجک پیوسته می‌گویند. تابع  $\Phi$  همان موجک مادر<sup>۱</sup> است که نقش تابع پنجره را بر عهده دارد که در آن پارامتر مقیاس<sup>۲</sup> و پارامتر انتقال<sup>۳</sup> است. اغلب تابع موجک نرمالایز شده به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

که در آن، نرمالایز کردن به معنی انرژی موجک است. از این‌رو، انتگرال تبدیل به فرار زیر نوشته می‌شود:

$$T(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3)$$

موجک‌های دو تعامدی، شرایط دو تعامدی را برآورده می‌کنند:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{a,b}(t) \tilde{\Psi}_{a',b'}(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{if } a = a' \text{ and } b = b' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

استفاده از موجک‌های دو تعامدی، امکان بهره‌گیری از موجک‌های کاملاً متقارن و ضد متقارن را می‌دهد. علاوه بر این، آن‌ها این امکان را می‌دهند که برخی از خواص مطلوب به طور جداگانه در موجک تجزیه<sup>۴</sup> و موجک بازسازی<sup>۵</sup>، گنجانیده شوند.

در فرآیند تجزیه موجک ۲-بعدی چند سطحه، فیلتر پایین گذر H و فیلتر بالاگذر G، به ترتیب توابع مقیاس و موجک‌های مربوط را نشان می‌دهند. عملیات نمونه‌برداری<sup>۶</sup> بر روی نتایج فیلتر، اعمال می‌شود. یک جفت فیلتر به سیگنال اعمال می‌گردند تا تصویر را به باندهای فرکانسی موجک شامل کم - کم<sup>۷</sup>، کم - زیاد<sup>۸</sup>، زیاد - کم<sup>۹</sup> و

- 1 Mother Wavelet
- 2 Scaling
- 3 Translation
- 4 Decomposition
- 5 Reconstruction
- 6 Downsampling
- 7 Low-low (LL)
- 8 Low-high (LH)
- 9 High-low (HL)

- 10 High-high (HH)
- 11 Sub-image
- 12 Fore-aft mode shape
- 13 Side-to-side mode shape

جدول ۱. فهرست سناریوهای خرابی‌های این تحقیق  
Table 1. Damage scenarios of this research

درصد تغییر مدول الاستیسیته (% E)	هندسه خرابی			$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	H(m)	سناریو
	A(m <sup>2</sup> )	b(m)	h(m)				
۱۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۱
۲۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۲
۳۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۳
۴۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۴
۵۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۵
۶۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۶
۷۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۷
۸۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۸
۹۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۰	۱۰	۹
۱۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۰
۲۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۱
۳۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۲
۴۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۳
۵۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۴
۶۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۵
۷۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۶
۸۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۷
۹۰	۱	۱	۱	۱۹/۴	۹۰	۱۰	۱۸

موجک<sup>۱</sup> در سطح‌های ۱، ۲ و ۳ (به جز در پایین برج)، به عنوان موقعیت خرابی، مبنای این تحقیق قرار گرفته‌اند.

$$\Delta = \sqrt{(\Delta H)^2 + \left( \Delta \theta \frac{\pi}{180} \left( \frac{R + R'}{2} \right) \right)^2}, \quad (7)$$

که در آن  $\alpha$  زاویه مرکزی خرابی،  $\beta$  زاویه خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی،  $\theta$  زاویه خرابی واقعی،  $b$  عرض خرابی،  $h$  بعد ارتفاعی خرابی،  $A$  سطح مقطع خرابی،  $R$  شعاع برج در محل خرابی واقعی،  $R'$  شعاع برج در محل خرابی به دست آمده،  $H$  موقعیت ارتفاعی خرابی واقعی،  $Z$  ارتفاع خرابی تشخیص داده شده با روش پیشنهادی و  $\Delta$  تفاوت قطری موقعیت خرابی واقعی و خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی، است.

۴- مدل المان محدود توربین بادی

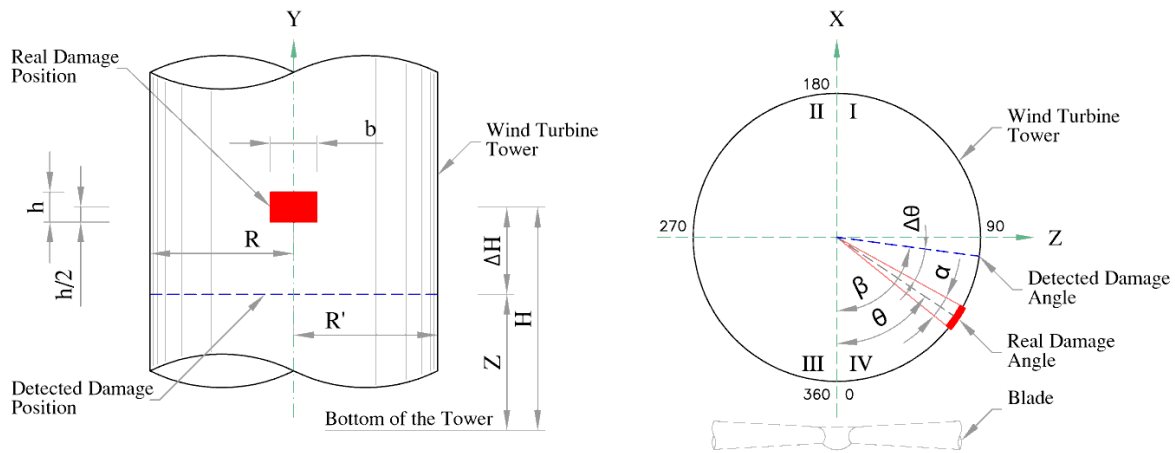
۴-۱- مدل پایه گیردار

$$\Delta H = \min \begin{cases} \left| Z - \left( H - \frac{h}{2} \right) \right| \\ \left| Z - \left( H + \frac{h}{2} \right) \right| \\ 0 \text{ if } H - \frac{h}{2} \leq Z \leq H + \frac{h}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta \theta = \min \begin{cases} \text{I, II: } \left| \beta - \theta - \frac{\alpha}{2} \right| \\ \text{III: } \left| 360 - \beta + \theta - \frac{\alpha}{2} \right| \\ \text{IV: } \left| \theta - \frac{\alpha}{2} - \beta \right| \\ 0 \text{ if } \theta - \frac{\alpha}{2} \leq \beta \leq \theta + \frac{\alpha}{2} \end{cases} \quad (6)$$

1 Wavelet diagonal detail coefficients





شکل ۲. فرضیات دقت تشخیص خرابی برج توربین بادی، (راست) پلان، (چپ) نما

Fig. 2. Hypotheses on height and angle of damage to the turbine tower: (right) plan and (left) view

جدول ۲. فهرست خانواده‌ها و موجک‌های دو متعامد نرم‌افزار MATLAB R2016b [۳۴]

Table 2. All biorthogonal wavelet families and their wavelets for MATLAB R2016b [34]

موجک‌ها	خانواده
bior1.1, bior1.3, bior1.5, bior2.2, bior2.4, bior2.6, bior2.8, bior3.1, bior3.3, bior3.5, bior3.7, bior3.9, bior4.4, bior5.5, bior6.8	<b>BiorSplines</b>
rbio1.1, rbio1.3, rbio1.5, rbio2.2, rbio2.4, rbio2.6, rbio2.8, rbio3.1, rbio3.3, rbio3.5, rbio3.7, rbio3.9, rbio4.4, rbio5.5, rbio6.8	<b>ReverseBior</b>

[۳۶]. مدول الاستیسیته برابر  $Gpa$  ۲۱۰، مدول برشی برابر  $Gpa$  ۸۰/۸ و چگالی مؤثر فولاد برابر  $kg/m^3$  ۸۵۰۰ در نظر گرفته شده است. چگالی مذکور برای به حساب آوردن وزن رنگ، پیچ‌ها، جوش‌ها و ورق‌هایی که در ساخت برج‌ها استفاده می‌شوند، از مقدار نمونه فولاد به مقدار  $kg/m^3$  ۷۸۵۰، بیشتر در نظر گرفته شده است [۳۶]. جزئیات کامل این توربین بادی در گزارش فنی جانکمن و همکاران [۳۶]، یافت می‌شود. پره مورد نظر، P2 LM61.5 بوده که ساخت گروه قدرت باد LM شهر کولدینگ کشور دانمارک<sup>۳</sup> می‌باشد. این پره به طول ۶۱/۵ متر و جرم کلی ۱۷۷۴۰ کیلوگرم است. به خاطر اینکه شعاع توپی برابر ۱/۵ متر است، شعاع چرخنده در کل برابر ۶۳ متر می‌باشد.

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی المان محدود توربین بادی و

توربین بادی ۵ مگاواتی مینا، دارای ویژگی‌های توزیع خطی از قطر و ضخامت برج بوده به طوری که قطر و ضخامت آن در پایین برج به ترتیب برابر ۶ m و ۰/۲۷ m و در بالای برج برابر ۳/۸۷ m و ۰/۱۹ m است. ویژگی‌های مکانیکی مؤثر فولاد، بر اساس گزارش DOWEC [۳۵] در نظر گرفته شد. شعاع و ضخامت برج از پایین تا بالای برج به صورت مخروط خطی، فرض شده‌اند. به دلیل اینکه دستگاه ۵ مگاواتی Repower دارای جرم بالای برج بزرگ‌تری، از توربین بادی DOWEC است، ضخامت برج به منظور قوی‌تر شدن برج، به صورت نسبی، افزایش یافته است. به منظور اطمینان از قرارگیری فرکانس‌های اول طولی و عرضی برج، ما بین فرکانس‌های اول و سوم<sup>۱</sup> (بر اساس محدوده بهره‌برداری توربین بادی در نمودار کمپل<sup>۲</sup>)، ضخامت‌های ذکر شده برج، به میزان ۳۰٪ افزایش یافته‌اند

1 One- and three-per-rev frequencies

2 Campbell diagram

3 LM Wind Power Group, Kolding, Denmark

موتورخانه متصل می‌شود. نظر به اینکه این تحقیق شامل ارزیابی عملکرد قسمت‌های مکانیکال توربین بادی نیست، موتورخانه به صورت جسم صلب<sup>۷</sup> با سطح مقطع مستطیلی، مدل‌سازی شده است [۳۹]. نمایی از برج، موتورخانه و جرم‌های متمرکز و نقاط مرجع مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. نظر به اینکه در این پژوهش، اثر آئرودینامیکی باد مدنظر نیست و از طرفی وجود موتورخانه باعث دید مناسبی نسبت به شکل‌های مودی و جهت تغییر مکان‌های برج می‌دهد، بنابراین ابعاد هندسی موتورخانه طبق مرجع [۳۵] لحاظ شده است. ارتفاع موتورخانه برابر ۳/۵ متر و مساحت وجه کناری و جلویی موتورخانه به ترتیب برابر ۵۰ و ۸ مترمربع می‌باشد؛ بنابراین بر اساس ارتفاع موتورخانه، مقدار طول و عرض موتورخانه به ترتیب برابر ۱۴/۳ و ۲/۳ متر به دست می‌آیند. نظر به اینکه تمایلی برای انجام محاسبات تنش و کرنش برای موتورخانه نداریم و تغییر شکلی نیز در این قطعه، در حین تحلیل به وجود نمی‌آید، این قطعه به صورت discrete rigid مدل شده که نیازی به اختصاص دادن ماده و مقطع نیز نداشته ولیکن می‌بایست مش‌بندی گردد. المان از نوع R3D4 و به تعداد ۴۰ جزء، به موتورخانه اختصاص داده شد.

به منظور درک رفتار دینامیکی توربین بادی، شکل‌های مودی و فرکانس‌های طبیعی آن به دست آمدند. در جدول ۳ فرکانس‌های طبیعی خمشی مدل المان محدود پایه گیردار این تحقیق و فرکانس‌های طبیعی توربین بادی ۵ مگاواتی مینا، ارائه شده است.

مطابق این نتایج، حداکثر اختلاف نسبی ما بین فرکانس‌های اول این تحقیق نسبت به مدل مینا، مربوط به مود پهلو - پهلو و برابر ۳/۸۱٪ است. همچنین حداکثر اختلاف نسبی ما بین فرکانس‌های دوم این تحقیق نسبت به مدل مینا مربوط به مود جلو - عقب و برابر ۵/۴۰٪ است. همان طوری که ملاحظه می‌شود با وجود اینکه مدل نسبتاً ساده‌ای برای توربین بادی در نظر گرفته شده و تفاوت بنیادی ما بین نرم‌افزارهای Abaqus، FAST و ADAMS، ولیکن نتایج فرکانس‌های طبیعی مدل این تحقیق، حاکی از دقت قابل قبولی نسبت به فرکانس‌های طبیعی توربین بادی ۵ مگاواتی مینا است. هر چند توربین بادی نسبت به محور برج، متقارن است ولیکن مدهای خمشی باید در هر دو جهت در نظر گرفته شود زیرا موتورخانه و چرخنده منجر به اختلاف در فرکانس‌ها و شکل‌های

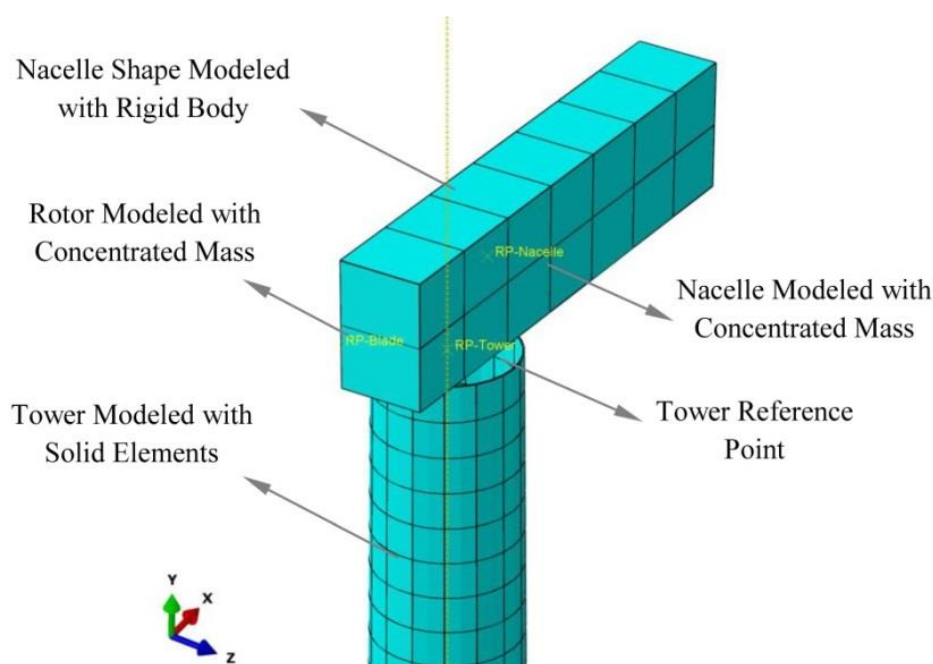
شرایط محیطی آن، از نرم‌افزار المان محدود Abaqus/CAE 2-6.14 شرکت فرانسوی Dassault [۳۷] استفاده گردیده است. مدل‌های متعددی با در نظر گرفتن مش‌بندی‌های مختلف و با لحاظ کردن فرمولاسیون‌های انتگرال‌گیری کامل<sup>۱</sup> و انتگرال‌گیری کاهش‌یافته<sup>۲</sup> و پرهیز از پدیده‌هایی همانند قفل‌شدگی برشی<sup>۳</sup> و ساعت شنی<sup>۴</sup>، ساخته و مورد تحلیل قرار گرفت. توربین بادی در فضای ۳-بعدی، مدل شده و سیستم مختصات کارترین برای مدل‌سازی المان محدود، اختیار گردیده است. قرارداد مختصاتی مورد استفاده در این تحقیق بر اساس مختصات قراردادی نرم‌افزار Abaqus در نظر گرفته شد. x در جهت مسیر باد، مثبت است، y به طرف بالا مثبت می‌باشد و z از قانون دست راست تبعیت می‌کند. در نرم‌افزار Abaqus مختصات x، y و z به ترتیب با ۱، ۲ و ۳ مشخص شده‌اند. فرض بر این است که چرخنده همیشه در جهت باد است. در مدل برج، از المان solid نوع C3D20R بهره برده شد که دارای مرتبه هندسی درجه ۲<sup>۵</sup> و انتگرال‌گیری کاهش یافته است. وزن برج مدل شده در محیط نرم‌افزار Abaqus برابر ۳۴۷۳۷۴ کیلوگرم شده که با مقدار وزن توربین بادی ۵ مگاواتی مینا (برابر ۳۴۷۴۶۰ کیلوگرم) تنها ۸۶ کیلوگرم اختلاف دارد. بعد وتری (محیطی) و ارتفاعی المان برج برابر مقدار تقریبی ۱ متر، در نظر گرفته شده و ضخامت المان، برابر ضخامت هندسه برج اختیار شده است. تعداد المان‌های برج برابر ۱۳۲۰ است.

جرم موتورخانه و چرخنده توسط برج توربین بادی تحمل می‌شود و نظر به اینکه جرم موتورخانه و چرخنده، بیشتر از ۳۰٪ جرم کلی برج است، بنابراین باید در تحلیل دینامیکی توربین بادی، لحاظ گردد [۳۸]. با توجه به اینکه شبیه‌سازی توربین بادی، بر روی برج آن متمرکز بوده و شامل پره نمی‌شود، جزئیات هندسه پره در مدل المان محدود، منظور نشده و مشخصات ساده‌ای برای آن به صورت جرم متمرکز و ممان اینرسی جرمی، لحاظ شده است. هندسه موتورخانه ساخته شده توسط کارخانه‌های مختلف، متفاوت است. اکثر آن‌ها شامل مقطع منشوری با گوشه‌های مدور یا قائم هستند. موتورخانه، اجزای مکانیکی گوناگونی شامل جعبه‌دنده، ژنراتور و محور<sup>۶</sup> را نگه می‌دارد. چرخنده که خود شامل پرها و توپی شده، به محور داخل

- 1 Full integration
- 2 Reduced integration
- 3 Shear locking
- 4 Hourglass
- 5 Quadratic Geometric Order
- 6 Shaft

7 Rigid body





شکل ۳. نمایی از برج، موتورخانه، جرم‌های متمرکز و مش‌بندی المان محدود

Fig. 3. View of the tower, nacelle, concentrated masses, and finite-element mesh

جدول ۳. فرکانس‌های طبیعی مدل توربین بادی پایه گیردار و نتایج جانکمن و همکاران [۳۶]

Table 3. Natural frequencies of the fully fixed wind turbine model and results by Jonkman et al. [36]

قدر مطلق اختلاف نسبی (%)		ADAMS	FAST	این تحقیق	شکل مودی
ADAMS	FAST				
۱/۱۹	۰/۲۲	۰/۳۱۹۵	۰/۳۲۴۰	۰/۳۲۳۳	مود اول طولی برج (Hz)
۲/۳۷	۳/۸۱	۰/۳۱۶۴	۰/۳۱۲۰	۰/۳۲۳۹	مود اول عرضی برج (Hz)
۴/۰۳	۵/۴۰	۲/۸۵۹۰	۲/۹۰۰۳	۲/۷۴۳۸	مود دوم طولی برج (Hz)
۳/۸۶	۳/۷۱	۲/۹۴۰۸	۲/۹۳۶۱	۲/۸۲۷۲	مود دوم عرضی برج (Hz)
-	-	-	-	۷/۹۵۳۱	مود سوم طولی برج (Hz)
-	-	-	-	۸/۱۵۱۴	مود سوم عرضی برج (Hz)

جانکمن<sup>۲</sup> (بخش برنامه‌نویسی) نگارش شده است. این نرم‌افزار، یک شبیه‌ساز ایروالاستیک جامع بوده که توانایی پیش‌بینی بارهای حدی و خستگی توربین‌های بادی دو و سه پره را دارد. این شبیه‌ساز به عنوان برنامه صحت‌سنجی مدل این تحقیق برگزیده شد. این نرم‌افزار در سال ۲۰۰۵ میلادی، توسط انجمن انرژی بادی Germanischer Lloyd مورد ارزیابی قرار گرفت و برای محاسبات بارهای توربین بادی

مودی برای دو جهت می‌گردند. لازم به ذکر است فرکانس‌های طبیعی سوم توربین مورد اشاره در گزارش جانکمن و همکاران [۳۶] ارائه نگردیده است. نرم‌افزار FAST [۴۰] یکی از تخصصی‌ترین نرم‌افزارها در زمینه شبیه‌سازی توربین بادی می‌باشد که تنها برای این کاربرد و تحت استانداردهای آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر وزارت نیرو آمریکا توسط آقای جیسون جانکمن<sup>۱</sup> (بخش تئوری) و خانم بانی

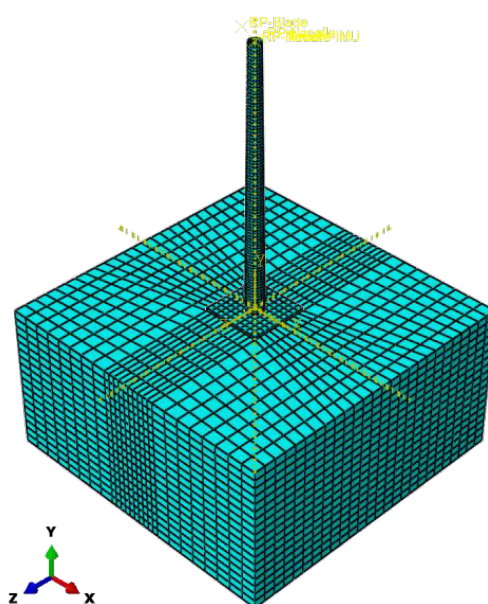
2 Bonnie Jonkman

1 Jason Jonkman

جدول ۴. مشخصات خاک‌های استفاده شده در این تحقیق [۲۹]

Table 4. Soil models specifications considered in this research [29]

شـرح	خاک ۱ (رس عادی تحکیم یافته)	خاک ۲ (ماسه متراکم)
وزن مخصوص غیراشباع ( $\text{kN/m}^3$ )	۱۵	۱۷
مدول یانگ ( $\text{kN/m}^2$ )	۱۰۰۰	۵۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۳۵	۰/۳
چسبندگی ( $\text{kN/m}^2$ )	۵	۰/۱
زاویه اصطکاک ( $^\circ$ )	۰	۳۵
زاویه اتساع ( $^\circ$ )	۰	۵



شکل ۴. هندسه ۳-بعدی مدل عددی توربین بادی به همراه پی سطحی و خاک

Fig. 4. 3D geometry of the numerical wind turbine model with a shallow foundation and soil

سنگ بستر<sup>۱</sup> می‌رسیم. در مرجع اشاره شده، تحلیل محیط خاک در نرم‌افزار المان محدود PLAXIS صورت گرفته است. مشخصات خاک بر اساس جدول ۴ در نظر گرفته شده و نمایی از هندسه ۳-بعدی مدل عددی توربین بادی به همراه پی سطحی و خاک، در شکل ۴ ارائه شده است. به منظور آدرس‌دهی نوع خاک در این تحقیق، خاک ۱ و خاک ۲ به ترتیب متناظر با خاک‌های رس عادی تحکیم یافته و ماسه متراکم می‌باشند. برای پرهیز از بروز خطای عددی به هنگام تحلیل مدل، مقدار زاویه اتساع برای خاک رس عادی تحکیم یافته، برابر مقدار کوچک  $0/1^\circ$  در نظر گرفته شد و از تغییرات مدول یانگ

ساحلی مورد استفاده در طراحی و تأیید، مناسب تشخیص داده شد [۴۱ و ۴۲].

#### ۲-۴- مدل با پی سطحی و خاک

پی بتنی مربعی به ابعاد  $20 \times 20 \times 1$  متر معکب مطابق مرجع [۲۹] در نظر گرفته شد. مدول یانگ بتن برابر مقدار  $30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ، وزن مخصوص  $24 \text{ kN/m}^3$  و ضریب پواسون  $0/15$  است. ابعاد مدل خاک به صورت مربعی و به ابعاد  $100 \times 100 \times 50$  مترمکعب در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که بعد از ارتفاع  $50$  متری لایه خاک، به

1 Bed rock

فرکانس‌های طبیعی خاک به طور کلی از روابط زیر به دست می‌آیند [۴۳]:

$$f_n = \frac{(2n-1)\bar{v}_s}{4H} \quad (8)$$

$$\bar{v}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_{si}}} \quad (9)$$

$$H = \sum_{i=1}^n h_i \quad (10)$$

که در آن  $f_n$  فرکانس طبیعی مود مورد نظر،  $n$  شماره مود/تعداد لایه‌های روی بستر سنگی،  $H$  عمق ستون خاک،  $h_i$  ضخامت لایه  $i$  بر روی سنگ بستر،  $v_{si}$  سرعت موج برشی متناظر با لایه  $i$  است. بر

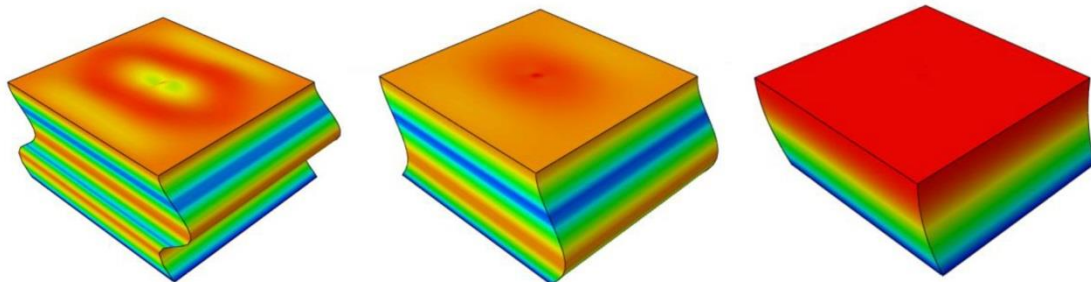
و چسبندگی، بر حسب افزایش عمق، صرف‌نظر گردیده است. در مدل خاک، از المان نوع solid نوع C3D8 بهره جسته شد. همچنین المان پی نیز از نوع solid نوع C3D8 در نظر گرفته شد. اتصال کف خاک به صورت کاملاً گیردار لحاظ شده است. گره‌های بیرونی مدل در ترازهای یکسان ( $Y$  برابر) با استفاده از قید MPC-Tie به یکدیگر دوخته شده‌اند تا رفتار همسانی با یکدیگر داشته باشند.

بعد عرضی المان‌های پی برابر ۲ متر بوده و به منظور المان بندی مناسب، بعد عرض خاک در زیر پی نیز برابر ۲ متر در نظر گرفته شده است. ضخامت المان خاک در زیر پی برابر ۲ متر بوده و با توجه به اینکه هر چه به سمت سنگ بستر می‌رویم، از اهمیت بعد مش خاک، کاسته می‌شود، ضخامت تقریبی ۵ متر برای آن منظور گردیده است. بعد تقریبی المان خاک در محیط بیرونی و کف آن حدود ۵ متر، اختصاص داده شده که بر اساس آن، بعد المان‌های میانی از مقدار ۲ متر داخلی، به صورت خطی به مقدار تقریبی ۵ متر پیرامونی، تغییر یافته‌اند. تعداد المان‌های پی و خاک به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۲۱۶۸ است.

#### جدول ۵. فرکانس‌های طبیعی مدل المان محدود خاک و مقایسه آن با مقادیر نظری

Table 5. Comparison of the natural frequencies between the soil models and the theoretical values

مود	فرکانس طبیعی (Hz)					
	این تحقیق		تئوری		قدرمطلق اختلاف نسبی (%)	
	خاک ۱	خاک ۲	خاک ۱	خاک ۲	خاک ۱	خاک ۲
۱	۰/۰۷۸۴	۰/۱۶۷۹	۰/۰۷۸۶	۰/۱۶۸۲	۰/۱۷	۰/۱۸
۲	۰/۲۳۴۷	۰/۵۰۲۳	۰/۲۳۵۷	۰/۵۰۴۵	۰/۴۳	۰/۴۳
۳	۰/۳۸۸۷	۰/۸۳۲۵	۰/۳۹۲۸	۰/۸۴۰۸	۰/۹۹	۱/۰۶



شکل ۵. شکل‌های مودی مدل المان محدود خاک، (راست) شکل مودی اول، (وسط) شکل مودی دوم، (چپ) شکل مودی سوم

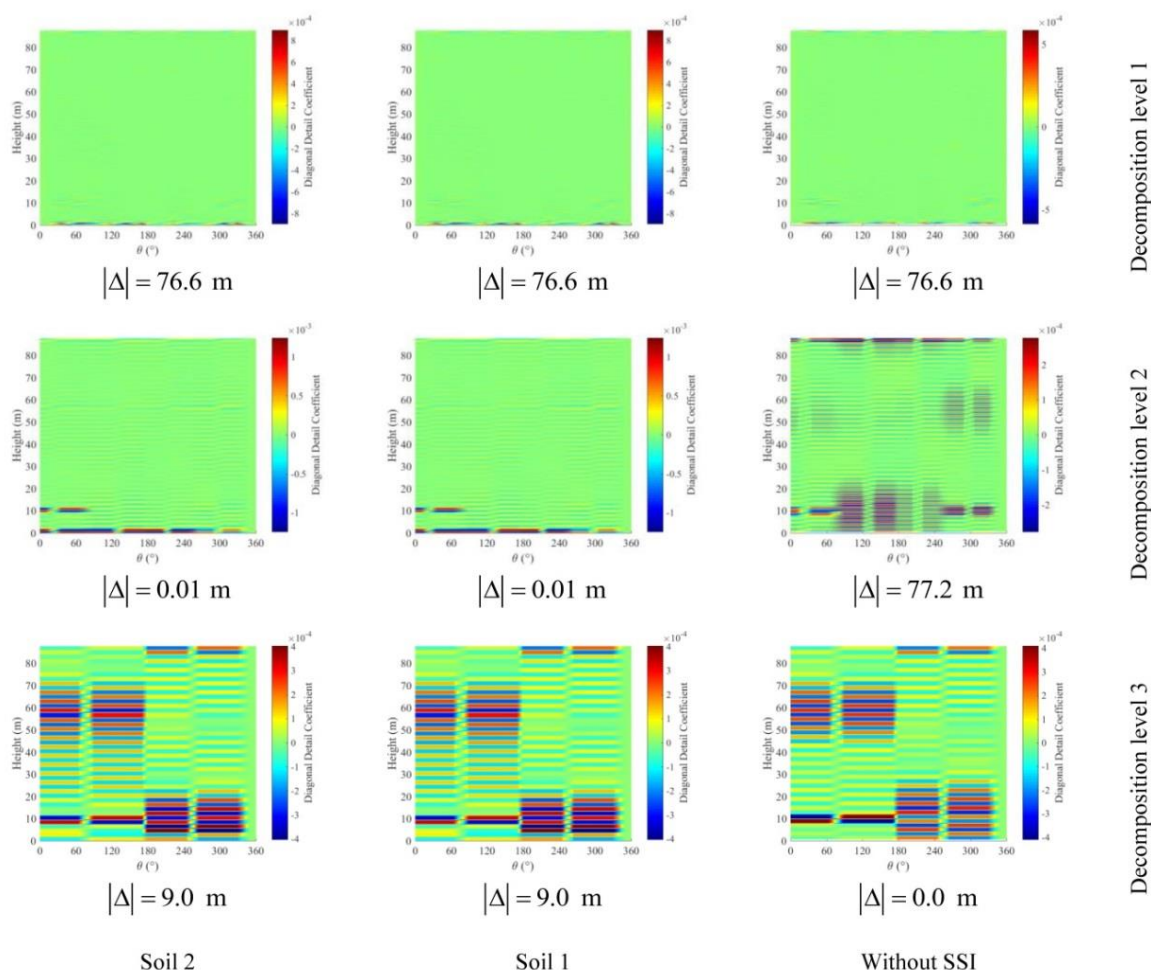
Fig. 5. Fundamental mode shapes of the soil finite-element model: (right) 1st, (middle) 2nd and (left) 3rd

### ۵- نتایج و بحث

روش پیشنهادی، شامل تحلیل‌های گسترده‌ای به منظور تعیین بهترین نوع موجک، سطح تجزیه موجک و شکل مودی کاربردی برج می‌گردد. در واقع در این تحقیق، نتایج حدود ۳۰ هزار تجزیه موجک گسسته، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، نقشه تجزیه موجک گسسته شکل مودی سوم پهلوی - پهلوی مدل طبق سناریوی خرابی ۵ توسط موجک *BiorSplines1.1* در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. همان طوری که مشاهده می‌گردد نتایج در سه ردیف و سه ستون دسته‌بندی گردیده‌اند. ردیف‌ها شامل سطوح تجزیه ۱، ۲ و ۳ بوده و ستون‌ها نیز شامل حالات مدل بدون خاک، خاک ۱ و

اساس روابط بالا مقدار سرعت موج برشی برای خاک‌های ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۱۵/۷۱ و ۳۳/۶۳ متر بر ثانیه به دست می‌آید.

به منظور صحت‌سنجی مدل خاک، فرکانس‌های طبیعی مدل المان محدود خاک و مقایسه آن با مقادیر نظری، در جدول ۵ گردآوری شده‌اند و نتایج حاصل، حاکی از دقت خوب مدل ساخته شده نسبت به مقادیر نظری، است. با توجه به اینکه مدل خاک دارای تقارن است، از ذکر مقادیر اضافی فرکانس طبیعی، صرف‌نظر شده است. سه شکل مودی اول مدل المان محدود خاک در شکل ۵ به تصویر کشیده شده‌اند.

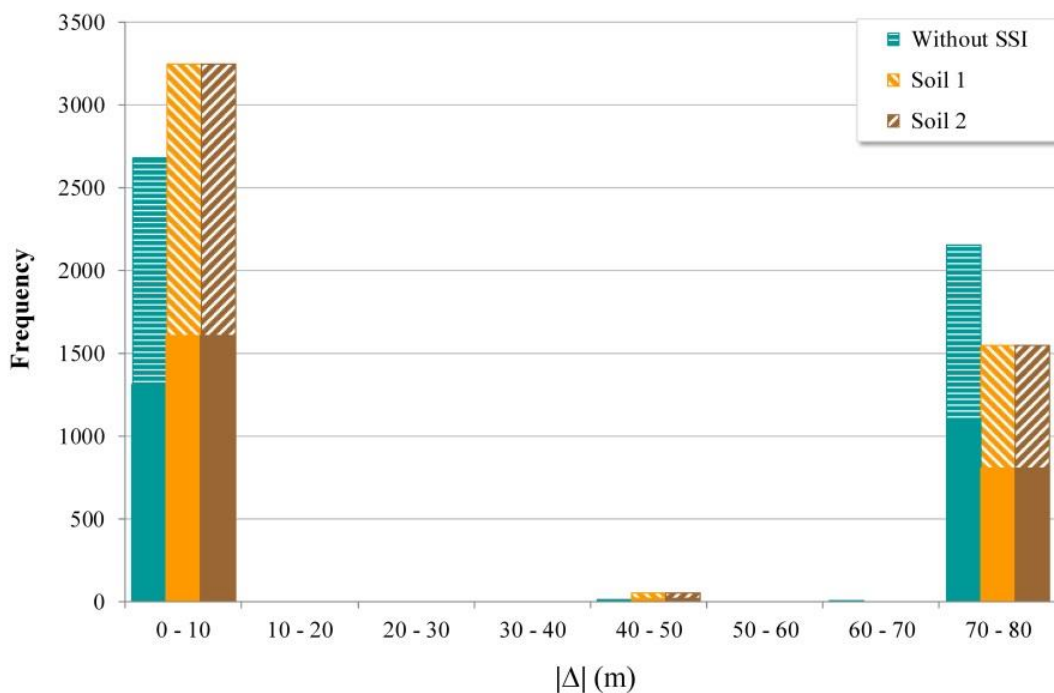


شکل ۶. نقشه تجزیه موجک گسسته شکل مودی سوم پهلوی - پهلوی مدل طبق سناریوی خرابی ۵ توسط موجک *BiorSplines1.1*  
**Fig. 6. Discrete wavelet decomposition of the 3rd side-to-side mode shape of damage scenario 5 with BiorSplines1.1**

محور افقی این نمودارها، کیفیت نتایج تشخیص خرابی را نشان می‌دهد و به بازه‌های ده متری تقسیم شده است و همان طوری که مشاهده می‌گردد تعداد جواب‌های مطلوب که در محدوده بازه ۰ الی ۱۰ متری هستند نیز از بقیه جواب‌ها بیشتر است. نمودارهای ستونی شامل تحلیل‌های با/بدون اندرکنش خاک-سازه بوده و ستون‌های پر شده، نماینده تعداد نتایج تجزیه موجک با موجک BiorSplines می‌باشند. قسمت غیر پر ستون‌ها، بیانگر تعداد نتایج تجزیه موجک با موجک ReverseBior هستند.

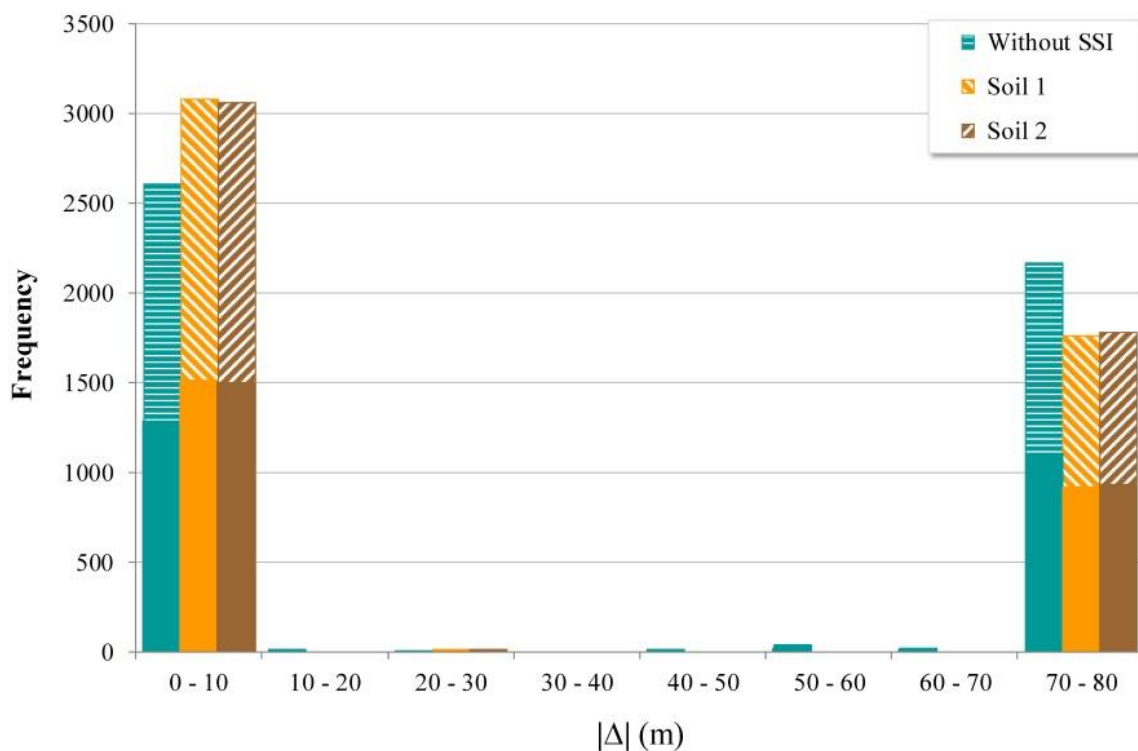
در یک نگاه کلی، تعداد جواب‌های مطلوب با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه افزایش یافته است به گونه‌ای که به ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹، نوع خاک تأثیرگذار نبوده ولیکن به ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸، خرابی‌های مدل با خاک ۱، بهتر تشخیص داده شده‌اند. افزایش متوسط تعداد جواب‌های مطلوب با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه بالغ بر ۱۹ درصد نسبت به حالت فاقد اندرکنش خاک-سازه است. با بررسی نتایج، شاهد برتری قابل اغماض موجک‌های خانواده ReverseBior بر BiorSplines

خاک ۲ می‌شوند. شکل مذکور شامل نه نقشه تجزیه موجک شده که محور افقی هر شکل، بیانگر زاویه هر قسمت از برج بر اساس مختصات استوانه‌ای است و محور قائم نیز موقعیت ارتفاعی برج را نشان می‌دهد. به منظور آدرس‌دهی مختصات آسیب‌دیدگی در برج توربین بادی، از سیستم مختصات استوانه‌ای استفاده شده که شباهت زیادی نیز با هندسه برج دارد. تفاوت قطری موقعیت خرابی واقعی و خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی ( $\Delta$ ) را پایین هر نقشه، ارائه شده است. مطابق مقادیر این شاخص، سطح تجزیه ۱، منجر به مقادیر کیفی مناسبی برای تشخیص خرابی، نشده به طوری که ناپیوستگی بالای برج را به عنوان محل خرابی، مشخص کرده است. در سطح تجزیه ۲، به غیر از حالت مدل بدون خاک، شاهد مقادیر کیفی عالی هستیم. شاخص کیفی برای حالت بدون خاک در سطح تجزیه ۳، دارای دقت عالی بوده ولی در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه باعث دقت ۹ متری در تشخیص خرابی شده است. در شکل ۷ و شکل ۸ هیستوگرام نتایج دقت تشخیص خرابی، به ترتیب برای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹ و ۱۰ الی ۱۸ ترسیم شده‌اند.

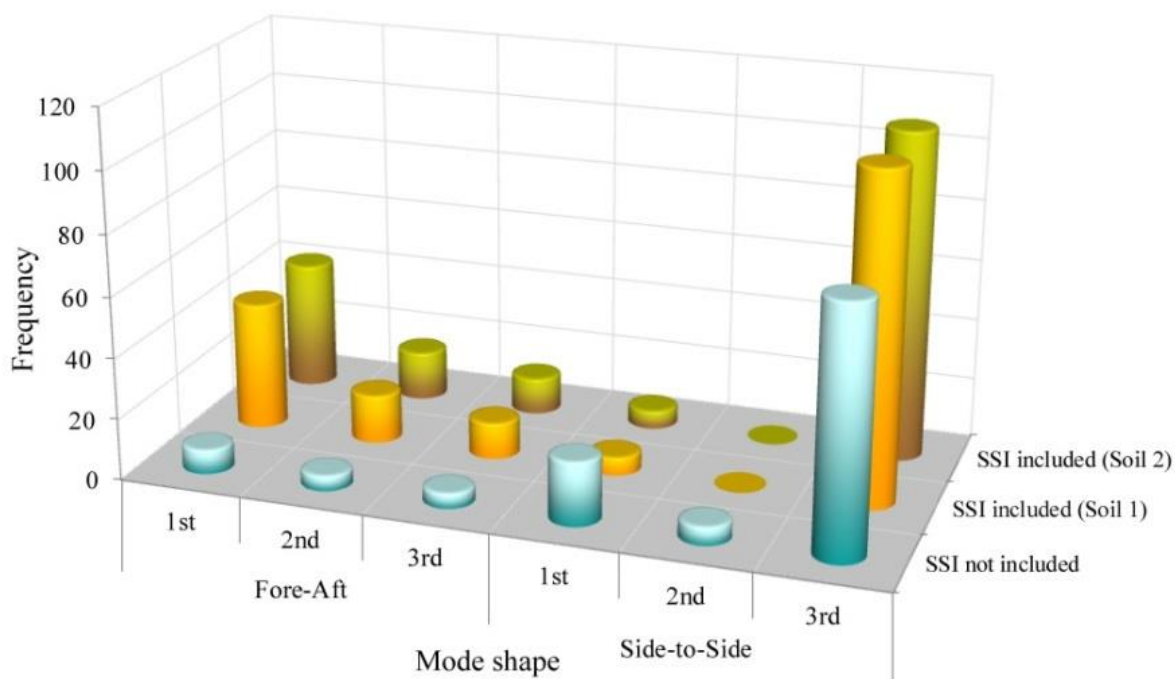


شکل ۷. هیستوگرام نتایج دقت تشخیص خرابی به ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹  
 Fig. 7. Histogram of damage detection accuracy in damage scenarios 1-9





شکل ۸. هیستوگرام نتایج دقت تشخیص خرابی به ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸  
 Fig. 8. Histogram of damage detection accuracy in damage scenarios 10–18



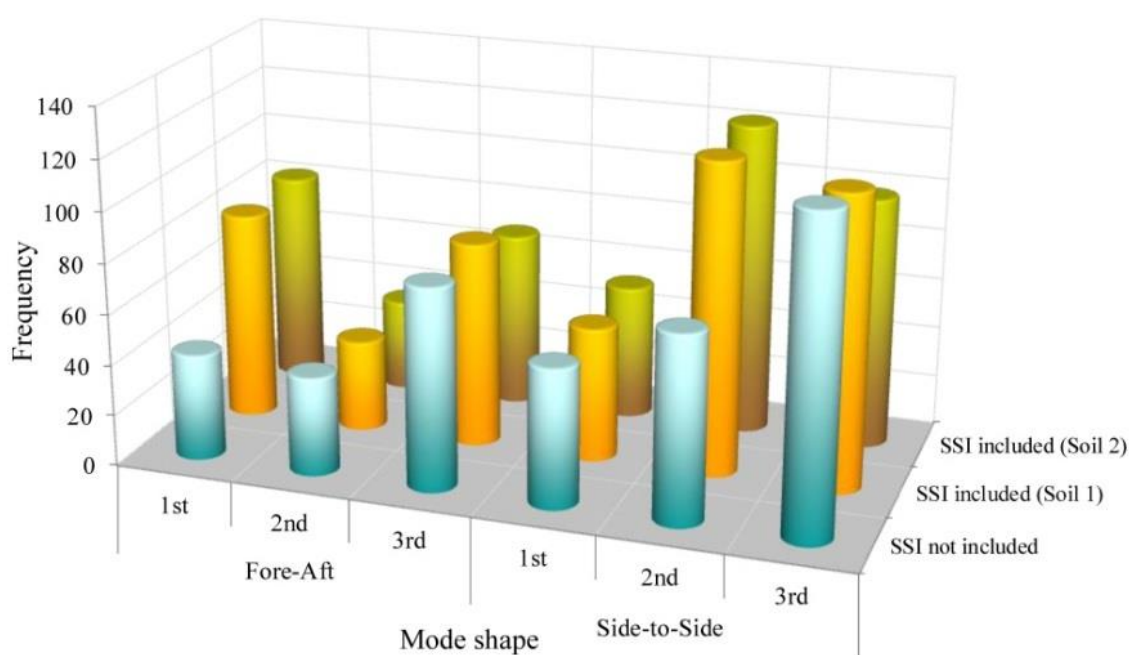
شکل ۹. نمودار تعداد جواب‌های محدوده مجاز به ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹  
 Fig. 9. Histogram of damage detection accuracy in damage scenarios 1–9



که در شکل ۹ و شکل ۱۰ به نمایش درآمده‌اند. همچنین تعداد جواب‌های محدوده مجاز به ازای سناریوهای مختلف خرابی نیز در جدول ۶ گردآوری شده‌اند.

محدوده جواب مجاز در این شکل‌ها، با کیفیت‌تر در نظر گرفته شده به طوری که ارضای هر دو شرط حداکثر اختلاف ارتفاعی ۵۰ سانتی‌متر و حداکثر اختلاف زاویه‌ای ۱۰ درجه، مدنظر قرار گرفته

هستیم. افزایش متوسط تعداد جواب‌های مطلوب موجک‌های خانواده ReverseBior نسبت به مدل‌های فاقد خاک، خاک ۱ و خاک ۲ به ترتیب برابر ۳/۵٪، ۳/۱٪ و ۳/۳٪ می‌باشد. به منظور مقایسه تعداد جواب‌های محدوده مجاز بر حسب شکل‌های مودی طولی و عرضی، شماره شکل مودی، سناریوهای خرابی مختلف و اثر اندرکنش خاک - سازه، از نمودارهای ستونی استفاده شده است



شکل ۱۰. نمودار تعداد جواب‌های محدوده مجاز به ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸  
 Fig. 10. Histogram of damage detection accuracy in damage scenarios 10-18

جدول ۶. تعداد جواب‌های محدوده مجاز به ازای سناریوهای مختلف خرابی

Table 6. Number of allowed range responses for different damage scenarios

تعداد کل	شکل مودی پهلو - پهلو			شکل مودی جلو - عقب			حالت	سناریو
	۳	۲	۱	۳	۲	۱		
۱۲۶	۸۱	۶	۲۱	۵	۵	۸	بدون خاک	
۱۸۴	۱۰۸	۰	۶	۱۲	۱۶	۴۲	خاک ۱	۹ الی ۱۰
۱۸۴	۱۰۸	۰	۶	۱۲	۱۶	۴۲	خاک ۲	
۴۱۴	۱۲۴	۷۴	۵۵	۸۰	۳۹	۴۲	بدون خاک	
۴۹۱	۱۱۶	۱۲۳	۵۳	۸۱	۳۶	۸۲	خاک ۱	۱۸ الی ۱۰
۴۶۳	۹۹	۱۲۳	۵۳	۶۹	۳۶	۸۳	خاک ۲	

است. همان طوری که قبلاً نیز دیده شد، تأثیر اندرکنش خاک - سازه، قابل ملاحظه بوده به طوری که شاهد افزایش تعداد جواب‌های محدوده مجاز با لحاظ کردن اندرکنش خاک - سازه هستیم. تأثیر نوع خاک به ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹، بی‌تأثیر است. به ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸، نوع خاک تنها بر تعداد جواب‌های مجاز حاصل از شکل مودی سوم، تأثیرگذار است به طوری که سبب کاهش متوسط تعداد جواب‌های مجاز برای خاک نوع ۲ به میزان ۱۵٪ نسبت به خاک ۱ گردیده است.

استفاده از شکل‌های مودی پهلو - پهلو به منظور تشخیص خرابی، دارای برتری محسوسی نسبت به شکل‌های مودی جلو - عقب هستند. این برتری به خصوص به ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹، بیشتر دیده می‌شود. در کل، تعداد جواب‌های محدوده مجاز، به ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸ به میزان ۱۷۷٪ بیشتر از سناریوهای خرابی ۱ الی ۹ بوده و این نشان می‌دهد که احتمال یافتن موقعیت‌های خرابی جانبی (زاویه  $\alpha$  برابر ۹۰ درجه) محتمل‌تر است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مویک‌های دو متعام نرم‌افزار MATLAB به منظور تشخیص خرابی برج توربین بادی ۵ مگاواتی مبنا در نرم‌افزار Abaqus/CAE استفاده گردید. عملکرد روش پیشنهادی در تعیین خرابی با شدت‌های کم تا زیاد، دو موقعیت زاویه‌ای مختلف همراه با بدون اندرکنش خاک - سازه، شش شکل مودی مختلف و سه تجزیه مویک، مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های مودی سازه آسیب‌دیده، شامل سه مود اصلی اول جلو - عقب و پهلو - پهلو بودند. تحلیل‌های گسترده‌ای حدود ۳۰ هزار مورد به منظور تعیین بهترین تابع مویک، صورت گرفت. به منظور نمایش نتایج، از تبدیل مختصات استوانه‌ای به کارتزین و فرمولاسیون پیشنهادی دقت تشخیص موقعیت خرابی بر حسب ارتفاع و زاویه، استفاده شد.

هر چند با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، تعداد تشخیص مطلوب موقعیت خرابی، افزایش داشته است ولیکن به ازای سناریوهای خرابی رو به جهت باد، نوع خاک تأثیرگذار نبوده است؛ اما به ازای سناریوهای خرابی عمود بر جهت باد، خرابی مدل‌های با خاک رس عادی تحکیم یافته، بهتر تشخیص داده شده‌اند. البته این تأثیر مثبت فقط در شکل‌های مودی سوم جلو - عقب و پهلو - پهلو برج توربین

بادی، مشاهده می‌گردد.

بررسی گسترده تشخیص خرابی مدل توربین بادی، با مویک‌های خانواده‌های *BiorSplines* و *ReverseBior* نشان داد که مویک‌های خانواده *ReverseBior* دارای برتری ناچیزی نسبت به خانواده *BiorSplines* در تشخیص خرابی هستند. استفاده از شکل‌های مودی پهلو - پهلو به منظور تشخیص خرابی، دارای برتری محسوسی نسبت به شکل‌های مودی جلو - عقب هستند. این برتری به خصوص به ازای سناریوهای خرابی رو به جهت باد، بیشتر دیده می‌شود. در کل، تعداد جواب‌های محدوده مجاز، به ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸ (عمود بر جهت باد) به میزان ۱۷۷٪ بیشتر از سناریوهای خرابی ۱ الی ۹ (در جهت باد) بوده و این نشان می‌دهد که احتمال یافتن موقعیت‌های خرابی جانبی، محتمل‌تر است.

با توجه به بررسی حالات مختلف شدت خرابی و مویک‌های مختلف، تعیین مویکی که در تمامی حالات، قادر به تشخیص خرابی باشد، بسیار مهم است. در صورتی که خاک زیر پی از نوع رس عادی تحکیم یافته باشد، تنها مویک‌های *BiorSplines.l.1* و *ReverseBior.l.1* قادر به تشخیص خرابی همه سناریوهای این تحقیق و با دقت صفر تا یک متر می‌باشند. شکل مودی مورد استفاده در این حالت، مود سوم پهلو - پهلو بوده و تجزیه مویک نیز باید در سطح دوم باشد. اگر خاک زیر پی از نوع ماسه متراکم باشد، آنگاه تنها مویک *ReverseBior3.3* قادر به تشخیص خرابی همه سناریوهای این تحقیق و با دقت نیم تا یک متر است. شکل مودی مورد استفاده کماکان مود سوم پهلو - پهلو بوده و تجزیه مویک نیز باید در سطح یک صورت گیرد. نظر به تأثیرگذاری مطلوب تأثیر اندرکنش خاک - سازه بر روی دقت تشخیص خرابی، لحاظ نمودن این اثر در تحلیل‌ها، پیشنهاد می‌شود.

## فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$a$	پارامتر مقیاس
$b$	پارامتر انتقال / عرض خرابی، $m$
$f$	فرکانس طبیعی مود مورد نظر، $Hz$
$h$	بعد ارتفاعی خرابی، $m$ / ضخامت لایه خاک بر روی سنگ بستر، $m$
$v$	سرعت، $m/s$
$A$	سطح مقطع خرابی، $m^2$
$E$	مدول الاستیسیته، $kN/m^2$
$H$	موقعیت ارتفاعی خرابی واقعی، $m$ / عمق ستون خاک، $m$

- principais-avarias-electricas-mecanicas-aerogeradores/, 2018.
- [7] S. Butterfield, S. Sheng, F. Oyague, Wind energy's new role in supplying the world's energy: what role will structural health monitoring play?, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- [8] CWIF, Summary of wind turbine accident data to 30 september 2019, <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics.htm>, 2019.
- [9] C.C. Ciang, J.-R. Lee, H.-J. Bang, Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods, Measurement science and technology, 19(12) (2008) 122001.
- [10] F. Ashley, R. Cipriano, S. Breckenridge, G. Briggs, L. Gross, J. Hinkson, P. Lewis, Bethany Wind Turbine Study Committee Report, in, 2007.
- [11] Y. Amirat, M.E.H. Benbouzid, E. Al-Ahmar, B. Bensaker, S. Turri, A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems, Renewable and sustainable energy reviews, 13(9) (2009) 2629-2636.
- [12] E. Gross, R. Zadoks, T. Simmermacher, M. Rumsey, Application of damage detection techniques using wind turbine modal data, in: 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1999, pp. 47.
- [13] A. Ghoshal, M.J. Sundaresan, M.J. Schulz, P.F. Pai, Structural health monitoring techniques for wind turbine blades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 85(3) (2000) 309-324.
- [14] M. Sundaresan, M. Schulz, A. Ghoshal, Structural health monitoring static test of a wind turbine blade, (2002).
- [15] M. Blanch, A. Dutton, Acoustic emission monitoring of field tests of an operating wind turbine, in: Key Engineering Materials, Trans Tech Publ, 2003, pp. 475-482.
- [16] S. Eum, K. Kageyama, H. Murayama, K. Uzawa, I. Ohsawa, M. Kanai, H. Igawa, Process/health monitoring for wind turbine blade by using FBG sensors with multiplexing techniques, in: 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, International Society for Optics and Photonics, 2008, pp. 70045B.
- [17] L. Doliński, M. Krawczuk, Damage detection in turbine
- $R$  شعاع برج در محل خرابی واقعی،  $m$   
 $R'$  شعاع برج در محل خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی،  $m$   
 $Z$  ارتفاع خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی،  $m$
- علائم یونانی**
- $\alpha$  زاویه مرکزی خرابی،  
 $\beta$  زاویه خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی،  
 $\theta$  زاویه خرابی واقعی، / زاویه هر قسمت از برج بر اساس مختصات استوانه‌ای،  
 $\psi$  موجک مادر<sup>۱</sup>  
 $\Delta$  تفاوت قطری موقعیت خرابی واقعی و خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی،  $m$   
 $\Delta\theta$  تفاوت زوایای خرابی واقعی و خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی،  
 $\Delta H$  تفاوت ارتفاعی خرابی واقعی و خرابی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی،  $m$
- زیرنویس**
- $i$  شماره لایه خاک  
 $n$  شماره مود/ تعداد لایه‌های روی بستر سنگی  
 $s$  موج برشی
- مراجع**
- [1] R. Wiser, M. Hand, J. Seel, B. Paulos, Reducing Wind Energy Costs through Increased Turbine Size: Is the Sky the Limit?, Lawrence Berkeley National Laboratory, (2016).
- [2] E. Hau, Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics, Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] F.P.G. Márquez, A.M. Tobias, J.M.P. Pérez, M. Papaelias, Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods, Renewable Energy, 46 (2012) 169-178.
- [4] P.W. Harper, S.R. Hallett, Advanced numerical modelling techniques for the structural design of composite tidal turbine blades, Ocean Engineering, 96 (2015) 272-283.
- [5] J. Nilsson, L. Bertling, Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems—life cycle cost analysis for two case studies, IEEE Transactions on energy conversion, 22(1) (2007) 223-229.
- [6] Portal-Energia, Major electrical and mechanical damages to wind turbines, <https://www.portal-energia.com/>

1 Mother wavelet

- vibration, 19(1) (2012) 37-56.
- [28] M. Harte, B. Basu, S.R. Nielsen, Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction, *Engineering Structures*, 45 (2012) 509-518.
- [29] B. Fitzgerald, B. Basu, Structural control of wind turbines with soil structure interaction included, *Engineering Structures*, 111 (2016) 131-151.
- [30] D.L. Fugal, *Conceptual wavelets in digital signal processing: an in-depth, practical approach for the non-mathematician*, Space & Signals Technical Pub., 2009.
- [31] A.I. Zemmour, *The Hilbert-Huang transform for damage detection in plate structures*, 2006.
- [32] P.S. Addison, *The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*, CRC press, 2017.
- [33] J. Olkkonen, *Discrete Wavelet Transforms—Theory and Applications*, in, InTech, 2011.
- [34] MATLAB R2016b x64, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, US, (2016).
- [35] H. Kooijman, C. Lindenburg, D. Winkelaar, E. Van der Hooft, *DOWEC 6 MW Pre-Design: Aero-elastic modeling of the DOWEC 6 MW pre-design in PHATAS*, Energy Research Center of the Netherlands, Technical Report No. DOWEC 10046\_009, (2003).
- [36] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- [37] Abaqus Unified FEA—SIMULIA™ by Dassault Systèmes®. Available online: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/> (accessed on 11 April 2018).
- [38] Y. Hu, *Improvement of the structural response of steel tubular wind turbine towers by means of stiffeners*, University of Birmingham, 2015.
- [39] V. Smith, *Evaluation of wind turbine towers under the simultaneous application of seismic, operation and wind loads*, Colorado State University. Libraries, 2013.
- [40] J.M. Jonkman, M.L. Buhl Jr, *FAST user's guide*, National wind blades by vibration based methods, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2009, pp. 012086.
- [18] B. Park, Y.-K. An, H. Sohn, Visualization of hidden delamination and debonding in composites through noncontact laser ultrasonic scanning, *Composites science and technology*, 100 (2014) 10-18.
- [19] M.M. Rezaei, M. Behzad, H. Moradi, H. Haddadpour, Modal-based damage identification for the nonlinear model of modern wind turbine blade, *Renewable energy*, 94 (2016) 391-409.
- [20] J.E. Luco, Soil-structure interaction effects on the seismic response of tall chimneys, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(3) (1986) 170-177.
- [21] M. Zaaier, *Foundation models for the dynamic response of offshore wind turbines*, in: *Proceedings of MAREC*, 2002, pp. 1.
- [22] T. Camp, M. Morris, R. Van Rooij, J. Van Der Tempel, M. Zaaier, A. Henderson, K. Argyriadis, S. Schwartz, H. Just, W. Grainger, *Design methods for offshore wind turbines at exposed sites*, Final Report of the OWTES Project, Garrad Hassan and Partners Ltd., Bristol, UK, (2003).
- [23] M. Zaaier, *Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines*, *Applied Ocean Research*, 28(1) (2006) 45-57.
- [24] P. Murtagh, B. Basu, B. Broderick, Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading, *Engineering structures*, 27(8) (2005) 1209-1219.
- [25] X. Zhao, P. Maisser, Seismic response analysis of wind turbine towers including soil-structure interaction, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 220(1) (2006) 53-61.
- [26] E. Bush, L. Manuel, *Foundation models for offshore wind turbines*, in: *47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition*, 2009, pp. 1037.
- [27] S. Adhikari, S. Bhattacharya, *Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations*, *Shock and*

- [42] A. Manjock, Evaluation report: Design codes FAST and ADAMS for load calculations of onshore wind turbines, Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Rept, 72042 (2005).
- [43] S.L. Kramer, Geotechnical earthquake engineering, Pearson Prentice Hall, 1996.
- Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Technical Report No. NREL/EL-500-38230, (2005).
- [41] A. Manjock, Design codes FAST and ADAMS for load calculations of onshore wind turbines, 2005, National Renewable Energy Laboratory (NREL): Golden, Colorado, USA, (2005).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Mehr Motlagh, A. Bahar, O. Bahar, Investigation of Soil-Structure Interaction Effects on Damage Detection of Wind Turbine Tower with Biorthogonal Wavelets. Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2581-2600.*

DOI: [10.22060/ceej.2021.17394.6566](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.17394.6566)



