کنترل سازه ای و تحلیل خستگی توربین بادی پایه کششی شناور فراساحلی با استفاده از میراگر جرم تنظیم شونده

حمید حکم آبادی[۱]، علیرضا مجتهدی[۲]*، محمدعلی لطف اللهی یقین[۳]

[۱] کارشناس ارشد سازه های دریایی، دانشگاه تبریز، h.hokmabady@gmail.com
[۲] استادیار، دانشگاه تبریز، mojtahedi@tabrizu.ac.ir
[۳] استاد، دانشگاه تبریز، a_lotfollahi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۲

کلمات کلیدی:
توربین بادی
پایه کششی شناور
میراگر جرم تنظیم شونده
خستگی
زمان لازم تا خرابی

چکیده

با افزایش روز افزون استفاده از انرژی بادی، توربین‌های بادی فراساحلی سهم قابل توجهی از تولید این انرژی را برعهده گرفته‌اند. این توربین‌ها به دلیل قرارگیری در محیط دریا متحمل بارهای دینامیکی قابل توجه و طولانی مدت می‌شوند. وجود چنین بارهایی موجب ایجاد خستگی در اعضای مختلف سازه‌های فراساحلی و این نوع توربین‌ها می‌شود. خرابی بواسطه خستگی، یکی از اصلی‌ترین دلایل خرابی در سازه های فراساحلی به شمار می‌آید. یکی از بهترین راههای کاهش بارهای خستگی، کاهش ارتعاشات در سازه است. در این مطالعه بمنظور کاهش ارتعاشات در توربین، از یک میراگر جرم تنظیم شونده با جرم‌های مختلف، در قسمت ناسل توربین بهره گرفته شده و میزان کاهش‌ها ارتعاشات در درجات آزادی مختلف توربین با حضور میراگرها مورد بررسی قرارگرفته است. مدلسازی میراگرها بواسطه کد FAST-SC انجام پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهد که حضور میراگر در ناسل توربین می‌تواند موجب کاهش گشتاورهای پای برج توربین و نتیجتا کاهش بارهای خستگی در برج توربین می‌شود. می‌توان چنین عنوان نمود که افزایش جرم میراگر تا حدود ۲۱ تن، می‌تواند موجب کاهش قابل توجه تر ارتعاشات مختلف گردد. همچنین نتایج حاکی است که کاهش گشتاورهای پای برج توربین به دلیل کاهش ارتعاشات می‌تواند موجب افزایش زمان لازم تا خرابی توربین (طول عمر توربین) شود.

Structural Control and Fatigue Analysis of Offshore TLP Wind Turbine Using TMD

Hamid Hokmabady[1], Alireza Mojtahedi[2], Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin[3]

[1] *MSc of Marine Structure, University of Tabriz; h.hokmabady@gmail.com*
[2] *Assistant Professor, University of Tabriz; mojtahedi@tabrizu.ac.ir*
[3] *Professor, University of Tabriz; a_lotfollahi@yahoo.com*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 21 sep. 2014
Accepted: 3 Nov. 2015

Keywords:
Wind Turbine
TLP
TMD
Fatigue
Time until Failure

ABSTRACT

As wind power continues its rapid growth worldwide, Offshore Wind Turbines (OWTs) are likely to comprise a significant portion of the total production of wind energy. These kinds of wind turbines cause of their placement environment should resist in great stormy conditions, which cause fatigue failures. Fatigue loads are one of the main failure reasons in offshore structures. One of the best ways for decreasing these kinds of loads is reducing the structure vibration. In this research application of a tuned mass damper with different masses, in an offshore Tension Leg Platform (TLP) is investigated. Tuned Mass Dampers (TMDs) modeled in a developed code FAST-SC. Results show that using TMD in the nacelle can reduce the moments in the base of the tower and turbine vibration. This reduction can also increase time until failure factor of the OWTs.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

۱ – مقدمه

با افزایش روز افزون استفاده از انرژی بادی، توربین‌های بادی فراساحلی سهم قابل توجهی از تولید این انرژی را برعهده گرفته اند. یک توربین بادی فراساحلی به دلیل قرارگیری در محیط دینامیکی دریا باید مقاومت کافی برای حفظ پایداری و بهره‌برداری داشته باشد. اصلی‌ترین عوامل ایجاد کننده محیط دینامیکی دریا موج و باد می‌باشند که این عوامل نیز ایجاد کننده لرزش‌های سازه ای، بارهای خستگی و بارهای حداکثر در پره‌ها، فونداسیون، برج و دیگر اجزای توربین بادی هستند. در میان تمامی انواع بارهای وارده، بارهای خستگی، موجب افزایش نیاز به نگهداری سازه، هزینه های بالا و خرابی می‌گردد. یکی از بهترین راههای کاهش بارهای خستگی، کاهش ارتعاشات سازه و کاهش بارهای وارد بر آن است. تکنیک‌های کنترل سازه‌ای مختلفی به منظور کاهش ارتعاشات در سازه وجود دارد که در این بین روش کنترل غیرفعال رایج‌ترین آنهاست. در بین دستگاه‌های مختلف کنترل غیرفعال، میراگر جرم تنظیم شونده (TMD)، نقش بسزایی را در توربین‌های بادی فراساحلی داشته که این به دلیل عملکرد بالا و هزینه‌های پایین آن بوده است. به منظور کاهش ارتعاشات و بارهای وارده بر توربین های بادی تحقیقات بسیاری انجام شده است. در سال ۲۰۰۸ مورتاژ و همکارانش از یک روش کنترل سازه ای غیر فعال به منظور کاهش لرزش های ایجاد شده در توربین بادی استفاده نمود، وی بررسی نمود که استفاده از یک میراگر جرم تنظیم شونده به چه میزان می‌تواند لرزش های ایجاد شده در یک توربین بادی پایه ثابت را کاهش دهد [۱]. کال ول و همکارانش در سال ۲۰۰۸ وجود میراگر مایع تنظیم شونده را در یک توربین بادی فراساحلی مونوپایل به منظور کاهش لرزش‌های توربین بادی مورد بررسی قرار دادند، آنها به این نتیجه رسیدند که وجود یک میراگر مایع تنظیم شونده می‌تواند جابجایی حداکثر توربین را تا ۵۵ درصد کاهش دهد [۲]. استوارت در سال ۲۰۱۲ تاثیر وجود میراگر جرمی تنظیم شونده بر روی چند نوع توربین بادی شناور را بررسی نمود، وی بیان نمود که وجود میراگر جرمی تنظیم شونده می‌تواند باعث کاهش ۶۰ درصدی آسیب‌ها و کاهش ۴۰ درصدی گشتاور خمشی ایجاد شده در برج می شود [۳]. در سال ۲۰۱۰ لاکنر برای اولین بار کنترل غیر فعال، نیمه فعال و فعال میراگر جرمی تنظیم شونده را روی توربین بادی فراساحلی بارج بررسی نمود، نتیجه تحقیقات وی منتج به توسعه دادن نرم افزار FAST-SC گردید، وی در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که با استفاده از کنترل غیرفعال میراگر جرم تنظیم شونده می‌توان میزان بارهای وارده بر سازه را کاهش داد [۴].

نظر به این که در بین تحقیقات انجام شده، پژوهشی که به بررسی رفتار ارتعاشی توربین پایه کششی شناور پرداخته و کنترل غیر فعال این نوع توربین را مطابق روش بکار گرفته شده در این پژوهش مورد ارزیابی قراردهد، مشاهده نگردید، در این پژوهش کنترل سازه‌ای توربین بادی فراساحلی پایه کششی شناور، مورد ارزیابی و رفتار لرزه‌ای آن، مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر کنترل سازه‌ای توربین، در زمان لازم تا خرابی توربین به عنوان یکی از پارامترهای خستگی، مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲ – توربین‌های بادی و انواع آن

امروزه توربین‌های بادی ساحلی، انتقالی و فراساحلی به دلیل وسعت زیاد دریاها و سواحل و در ضمن ارزش بالای زمین و قابل استفاده‌تر بودن آن، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع توربین ها همانند سکو های نفتی، با توجه به میزان عمق آب دارای سیستم های عملکرد مختلفی هستند که طراحی و ساخت و نصب هریک از آنها هزینه‌های متفاوت و قابل توجهی را شامل می‌شود. تا به امروز توربین‌های فراساحلی مختلفی، به منظور استفاده در مناطق آب و هوایی و جغرافیایی مختلف، طراحی و ساخته شده است. یکی از اصلی‌ترین روش‌های طبقه بندی توربین‌های فراساحلی براساس عمق آبی است که در آن قرار می‌گیرند. توربین-هایی بادی با فونداسیون ثابت، در آبهایی تا عمق ۶۰ متر کاربرد دارند، فونداسیون این نوع توربین ها به طور کلی به دو نوع فونداسیون آب های کم‌عمق، که در عمق آب از صفر تا ۳۰ متر کاربری دارند، فونداسیون آب‌های انتقالی که در عمق آب بین ۳۰ تا ۶۰ متر کاربری دارد. و نوع دیگر مربوط به فونداسیون آب‌های عمیق است که برای آب‌هایی با عمق بیش از ۶۰ متر کاربرد دارند [۵].

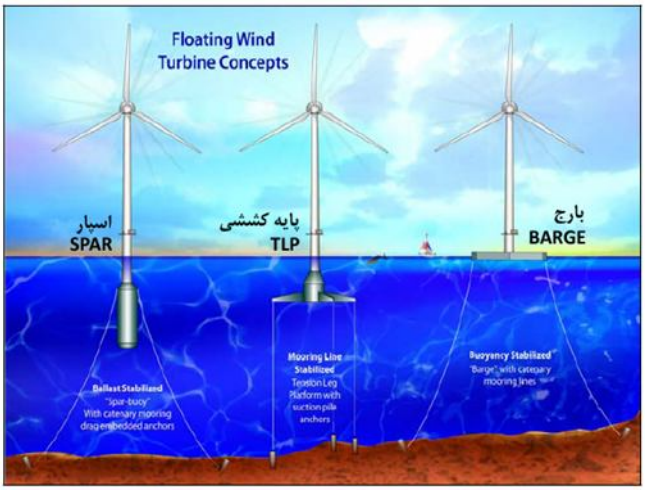
با افزایش عمق آب به بیش از ۶۰ متر، مشکلات فراوانی برای هزینه‌های نصب و ساخت فونداسیون ثابت برای توربین‌های بادی فراساحلی بوجود می‌آید، به همین منظور در آب‌های عمیق از انواع دیگر تکنولوژی‌های شناوری استفاده می‌شود. آب‌های عمیق شامل بیشترین سرعت‌های باد هستند که نیازمند تکنولوژی فراساحلی‌ای به منظور مقاومت در برابر این نیروی وارده از طرف باد هستند. این نوع توربین‌ها به مقدار قابل توجهی مستقل‌تر از شرایط کف دریا عمل می‌کنند و می‌توانند در مناطق مختلفی نصب گردند. در حالت کلی سه نوع سیستم فونداسیون مختلف برای این نوع توربین‌ها وجود دارد که شامل، سیستم شناوری اسپار، بارج و پایه کششی است. فونداسیون‌های اشاره شده، هریک از روش خاصی به منظور حفظ پایداری خود استفاده می‌کنند. شکل ۱ نشان دهنده انواع فونداسیون توربین‌های بادی فراساحلی است. توربین‌های بادی با فونداسیون پایه کششی‌ها به منظور حفظ تعادل خود از کابل‌های مهاری استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها شامل یک اسپار مرکزی بمنظور ایجاد شناوری مورد نیاز هستند و در کنار این دو مورد وزنه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

متعادل کننده‌ای نیز به منظور ایجاد تعادل در برابر هر نوع حرکتی در این سیستم‌ها وجود دارد.

توربین‌های بادی نیز همانند دیگر انواع سازه ها مجموعه نرم افزارهایی را برای طراحی خود دارند که در این میان می‌توان به کد FAST اشاره نمود.



شکل ۱ – انواع فونداسیون توربین‌های بادی فراساحلی [۷]

این کد یک شبیه ساز آیرو-سروو-الاستیک غیرخطی در دامنه زمان است که برای پیش بینی بارهای حداکثر و خستگی در توربین‌های محور افقی دو پره و سه پره می‌باشد [۳]. این کد توسط آزمایشگاه انرژی‌های تجدید پذیر ایالات متحده تهیه و تدوین شده است. به منظور طراحی توربین بادی برای مقابله با دو نیروی باد و موج، این نیروها در نرم افزار FAST توسط دو زیر برنامه محاسبه می‌شوند. فایل اطلاعات باد را با استفاده از زیر برنامه AeroDyn و نیروهای Hydrodynamic نیز بواسطه زیر برنامه HydroDyn این کد محاسبه می‌گردند.

۳ – کنترل سازه‌ای توربین بادی

هر سازه‌ای که ساخته می‌شود در طول عمر خود با احتمال وقوع بارگذاری‌های بحرانی از جمله تحریکات جانبی ناشی از موج، زلزله، باد و... مواجه می‌شود که در صورت وقوع هریک از آنها، سازه باید مقاومت کافی داشته باشد. در سال‌های اخیر به دلیل نیاز روز افزون بشر، محدودیت‌های موجود در روش‌های طراحی سنتی شامل میرایی اندک سیستم‌های سازه‌ای و مصالح، جهت جذب انرژی بارهای دینامیکی و دارابودن خواص دینامیکی ثابت و غیرقابل تطبیق با بارهای دینامیکی خارجی، موجب ایجاد روش‌های نوین و مدرن به منظور طراحی سازه‌هایی مقاوم با هدف کاهش پاسخ سازه‌ای و خسارات وارده شده است. سیستم‌های کنترل سازه‌ای به منظور کاهش لرزش‌های ناخواسته‌ای هستند که به هر دلیلی بر روی سیستم اصلی اعمال می‌شود. این نوع سیستم‌های کنترلی می‌توانند به شکل‌های مختلفی طراحی شوند. روش‌های کنترل سازه شامل سیستم کنترلی غیرفعال، سیستم کنترلی نیمه فعال، سیستم کنترلی فعال و سیستم‌های کنترلی ترکیبی است [۶]. سیستم بکار گرفته شده در این پژوهش سیستم کنترل غیرفعال است.

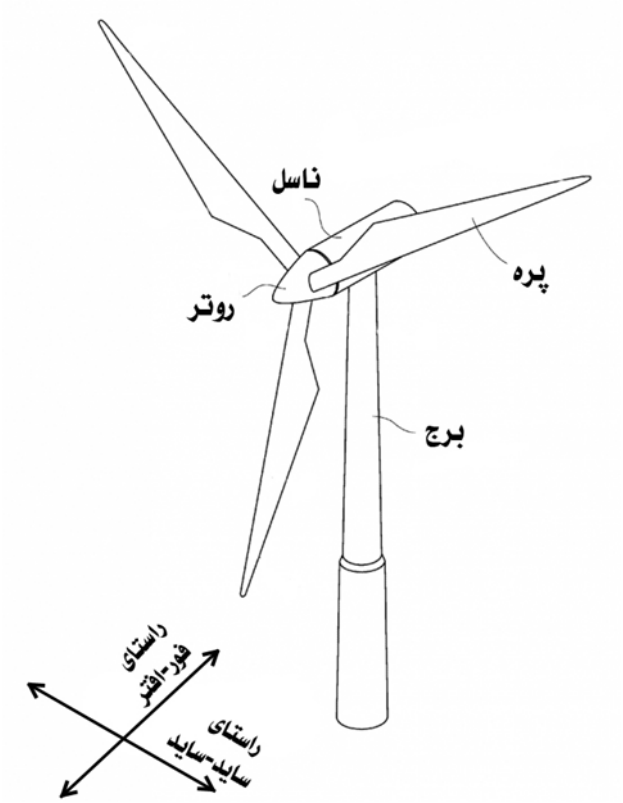
سیستم‌های کنترل غیرفعال را می‌توان سیستم اتلاف انرژی دانست که با استفاده از برخی ابزارها و مواد، سختی و میرایی سازه را افزایش می‌دهند. سیستم‌های کنترل غیرفعال نیاز به هیچگونه منبع انرژی خارجی ندارند. این سیستم‌ها قابل اعتماد بحساب می‌آیند چون ابزارها عموما بر اساس اصولی مانند لغزش اصطکاکی، جاری شدن فلز، اختلاف فاز حرکت، تغییرات ویسکوالاستیک مایعات و جامدات عمل می‌کند. در بین ابزارهای مختلف اتلاف‌گر انرژی در سیستم کنترلی غیر فعال میراگر جرم تنظیم شونده به دلیل عملکرد بالا و هزینه‌ی پایین آن بسیار مورد توجه بوده است. در سیستم میراگر جرم تنظیم شونده، وزنه‌ای به جرم مشخص در محلی از سازه نصب می‌شود و تنها توسط یک فنر و یک میراگر با ضریب سختی و میرایی معین به سازه وصل می‌گردد. با انتخاب مقادیر مناسب برای جرم و ضریب سختی فنر و ضریب میرایی میراگر، دامنه‌ی ارتعاشات سازه در مود اول کنترل می‌گردد. در صورتی که این میراگر بصورت غیرفعال در سازه به کار گرفته شود باید با مود اول سازه که مهمترین فرکانس تحریک سازه است تنظیم شود تا بیشترین میزان کاهش جابجایی-ها در سازه را در پی داشته باشد [۵]. از میان ابزارهای مختلف اتلاف‌گر انرژی برای سیستم‌های کنترل غیرفعال، در این پژوهش از میراگر جرم تنظیم شونده استفاده شده است. استفاده اولیه از میراگرهای تنظیم کننده در جهت کاهش اثرات تحریک باد بر روی سازه‌ها بوده است [۶]. لازم به ذکر است که میراگر تنظیم شونده در صورتی که بصورت غیر فعال در سازه بکار گرفته شود، می‌تواند تنها برای یک فرکانس مشخصی از سازه اصلی تنظیم شود که این فرکانس معمولا فرکانس مود اول سازه می‌باشد. مود اول در حقیقت محتمل‌ترین نوع پاسخ سازه به تحریکات وارد شده است، هر چه مودها بالاتر می‌روند به دلیل افزایش فرکانس احتمال وقوع کمتری دارند، عموما در سازه ها سه مود اول به منظور طراحی در محاسبات مورد بررسی قرار می‌گیرد که در این میان مود اول به دلیل احتمال رخداد بالا بیشترین نقش را دارد. هرگاه تحریک خارجی به نحوی باشد که سهم مودهای بالاتر در پاسخ سازه نسبت به مود اول قابل توجه باشد، در این صورت ممکن است سیستم جرم تنظیم شونده اثر معکوسی داشته و دامنه ارتعاشات را بیشتر نماید، توربین بادی فراساحلی نیز در صورتی که جهت جریان و باد در راستای فور-افتر باشد، در همین راستا نیز دارای بیشترین میزان ارتعاش خواهد بود،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

پس کاهش این ارتعاش که در مود اول راستای فور-افتر بیشترین میزان خواهد بود می‌تواند به عنوان هدف پژوهش تعیین گردد.

به منظور کنترل سازه‌ای توربین های بادی فراساحلی کدی به نام کد FAST-SC توسط لاکنر و همکارانش در سال ۲۰۱۰ تهیه گردیده که این کد، نسخه توسعه داده شده کد اصلی FAST به منظور کنترل سازه ای توربین‌هاست. این کد که تمامی توانایی های کد FAST را داراست، قابلیت شبیه سازی کنترل غیرفعال سازه‌ای توسط میراگر جرمی تنظیم شونده را دارد. در این کد دو میراگر جرم تنظیم شونده که بطور مستقل از هم عمل می‌کنند گنجانده شده‌اند. به منظور مدل نمودن سیستم میراگر در یک توربین بادی لاکنر و همکارانش با درنظر گرفتن حضور میراگرها در ناسل توربین و با بهره‌گیری از دینامیک Kane که مبنای نرم افزار FAST نیز هست، اقدام به استخراج معادلات حرکت نمودند، معادلات حرکت جدید شامل معادلاتی به همراه معادلات مرتبط با میراگرها بود که به دلیل نوشتاری بودن فایل ورودی، بخشی برای وارد شدن پارامترهای مختلف میراگرها از جمله جرم، میرایی و سختی در فایل اصلی ورودی گنجانده شد [۴]. میراگرهای شبیه سازی شده در این کد در ناسل توربین قرار دارند و قابلیت جابه جایی در دو مود حرکتی توربین یعنی مود فور-افتر (Fore-After) و ساید-ساید (Side-Side) را دارا می‌باشند، شکل ۲ اجزا مختلف توربین بادی و نیز راستاهای حرکتی توربین را نشان می‌دهد.



شکل ۲ – اجزا و راستاهای حرکتی توربین بادی

۳-۱- توربین ۵ مگاواتی پایه کششی شناور

در این پژوهش کنترل سازه‌ای توربین بادی ۵ مگاواتی پایه کششی شناور فراساحلی به عنوان یکی از توربین‌های رایج در امر تحقیقات دانشگاهی و مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است، این توربین توسط آزمایشگاه انرژی‌های تجدید پذیر ایالات متحده طراحی شده است.

به منظور کنترل سازه‌ای این توربین از یک میراگر جرم تنظیم شونده در ناسل توربین بهره گرفته شده است که میراگر در راستای فور-افتر توربین قابلیت جابه‌جایی دارد. مشخصات توربین ۵ مگاواتی مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ - مشخصات توربین بادی ۵ مگاواتی پایه کششی

مشخصه	مقدار
قدرت توربین	۵ مگاوات
پیکربندی روتر	۳ پره، بطول ۶۱/۵ متر
قطر روتر، هاب	۱۲۶ متر، ۳ متر
ارتفاع هاب	۹۰ متر
سرعت باد:	
سرعت باد شروع به کار	۳ متر برثانیه
سرعت باد در حال کار	۱۱/۴ متر برثانیه
سرعت باد اتمام کار	۲۵ متر بر ثانیه
جرم روتر	۱۱۰۰۰۰ کیلوگرم
جرم ناسل	۲۴۰۰۰۰ کیلوگرم
جرم برج	۳۴۷۴۶۰ کیلوگرم
قطر پایه ی برج	۶ متر
قطر بالای برج	۳/۸۷ متر

به منظور معرفی مشخصات توربین، فایل‌های ورودی نرم افزار FAST که فایل‌های نوشتاری هستند، به نرم افزار معرفی شدند. به منظور بررسی، از ۲ سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و ۱۸ متر بر ثانیه استفاده گردید، این انتخاب به نحوی انجام گردید که سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه بین سرعت بادهای شروع به کار و در حال کار و سرعت باد ۱۸متر بر ثانیه بین سرعت باد در حال کار و اتمام کار توربین قرار داشته باشند. به منظور داشتن قابلیت آشفتگی که یکی از اصلی‌ترین پارامترهای نیروهای آیرودینامیکی است، از نرم افزار TurbSim استفاده گردید. این نرم افزار نیز یکی دیگر از کد های نوشته شده توسط آزمایشگاه ملی انرژی های تجدید پذیر ایالات متحده است که به منظور شبیه سازی آشفتگی در نیروی باد طراحی شده است [۷]، فایل خروجی این نرم افزار که فایل اطلاعات باد است به عنوان ورودی زیر برنامه AeroDyn به نرم افزار FAST معرفی گردید.

پیش بینی ارتفاع موج در کارهای مهندسی عموما بواسطه‌ی طیف های موج انجام می‌شود. یکی از رایج‌ترین طیف‌های موج، طیف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

موج جانسوپ (JONSWAP) است. به دلیل این که موج نیز منشا بادی دارد و این که توربین‌های بادی باید برای هر دو نیروی باد و موج طراحی و محاسبه شوند، ارتفاع و پریود موج شاخص در این پژوهش بواسطه فرمول بندی این طیف بدست آمد، در این فرمول بندی پیش بینی ارتفاع و پریود موج بواسطه طول بادخور و سرعت باد انجام می‌شود [۸]. مشخصات مربوط به داده‌های محیطی استفاده شده در جدول ۲ آورده شده‌اند. فرمول های محاسبه ارتفاع موج شاخص بواسطه سرعت باد بصورت زیر می‌باشند.

$$W_A = 0.71\,W^{1.23} \quad (۱)$$

$$\frac{gH_S}{W_A} = 0.0016\,(\frac{gF}{W_A^2})^{0.5} \quad (۲)$$

$$\frac{gT_S}{W_A} = 0.286\,(\frac{gF}{W_A^2})^{0.33} \quad (۳)$$

در این فرمول‌ها، W و W_A به ترتیب سرعت باد و سرعت باد اصلاح شده هستند که هر دو بر حسب متر بر ثانیه تعیین می‌شوند، H_s مقدار ارتفاع موج شاخص، T_s مقدار پریود موج شاخص، g مقدار شتاب گرانش زمین و F مقدار طول بادخور است.

جدول ۲ - مشخصات محیطی انتخاب شده

مشخصه	مقدار
عمق آب	۲۰۰ متر
طول بادخور	۱۰۰ کیلومتر
ارتفاع موج شاخص برای سرعت باد ۱۰ متر برثانیه	۳ متر
پریود موج شاخص برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه	۶/۴۵ ثانیه
ارتفاع موج شاخص برای سرعت باد ۱۸ متر برثانیه	۴ متر
پریود موج شاخص برای سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه	۸/۲۵ ثانیه

به منظور کنترل سازه‌ای توربین پایه کششی، در این پژوهش از میراگرهای با وزن ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ تن، بهره‌گرفته شده که هریک به ترتیب دارای وزنی برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی جرم بالای سکوی توربین هستند. علت این انتخاب رایج بودن درصدهای وزنی عنوان شده به عنوان مبنای وزنی میراگرهای TMD در مهندسی عمران است. به علت این که توربین پایه کششی دارای رفتار پیچیده‌ای است و تعریف یک مدل با درجه آزادی محدود برای این توربین زمان‌گیر و پیچیده است، به منظور محاسبه‌ی ثابت فنر و ثابت میرایی هریک از میراگرها از یک مطالعه پارامتریک در نرم افزار FAST-SC استفاده شد. نحوه انجام کار بر این اساس بود که برای مقداری برای ثابت میرایی، به عنوان مقدار اولیه درنظر گرفته شد و سپس مقدار ثابت فنر با آنالیزهای مختلف در نرم افزار تغییر یافت تا مقدار بهینه‌ای برای آن با بررسی مقدار جابجایی حداکثر بدست آید، سپس ثابت فنر بهینه بدست آمده، ثابت در نظر گرفته شده و مقدار بهینه‌ای برای ثابت میرایی با آنالیزهای مختلف بدست آمد.

مقادیر فرکانس طبیعی سازه با استفاده از آنالیز خطی سازی شده نرم افزار FAST بدست آمد و پارامترها به نحوی تعیین شدند که فرکانس طبیعی میراگر تقریبا با فرکانس طبیعی سیستم برابر باشد. مشخصات میراگرهای انتخابی و پارامترهای مربوط به آنها در جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳ - مشخصات میراگرهای انتخابی

درصد جرمی	جرم میراگر ها (Kg)	ثابت فنر (N/m)	ثابت میرایی (N/m/s)
۱ درصد	۷۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۰۰۰
۲ درصد	۱۴۰۰۰	۲۳۰۰۰	۱۷۰۰
۳ درصد	۲۱۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۵۰۰
۴ درصد	۲۸۰۰۰	۴۰۰۰۰	۴۰۰۰

۳-۲- صحت سنجی داده‌ها

مدل استفاده شده در این، پژوهش همانطور که اشاره شد یک توربین بادی پنج مگاواتی پایه کششی شناور است، داده‌های مربوط به این توربین در سایت آزمایشگاه ملی انرژی های تجدید پذیر ایالات متحده موجود بوده و به صورت متعددی توسط پژوهشگران و محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱، ۱۰، ۹]. به منظور صحت سنجی داده‌های مورد استفاده برای TMD، یک میراگر با جرم و مشخصات نشان داده شده در جدول زیر مورد استفاده قرار گرفت که توسط استوارت و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز بکار گرفته شده بود [۱۲].

جدول ۳ - مشخصات میراگر مورد استفاده توسط استوارت و همکاران

پارامتر	جرم Kg	میرایی N-s/m	سختی N/m
مقدار	۱۰۰۰۰	۱۳۰۰	۱۲۳۵۰

میراگر مورد استفاده در پژوهش استوارت برای یک توربین بادی پنج مگاواتی پایه کششی مشابه بود که برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی این صحت سنجی پارامتر مورد مطالعه توسط استوارت و همکاران مربوط به آسیب خستگی در جهت فور-افتر توربین بود که به همین دلیل این پارامتر نیز در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت و میزان تفاوت نتایج نسبت به حالت کنترل نشده توربین، مقایسه گردید، نتایج گرفته شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

با توجه به جدول ۴ می توان چنین عنوان نمود که به دلیل خطای تقریبا ۲ درصدی در نتایج دو پژوهش انجام پذیرفته، داده های مورد استفاده در این مطالعه قابل استناد خواهند بود.

جدول ۴ – صحت سنجی پارامتر آسیب خستگی در راستای فور-افتر برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه

پارامتر	آسیب خستگی جهت فور-افتر (kNm)
کنترل نشده	۳۳۶۸۴
نتیجه استوارت و همکاران	۳۲۲۰۶
نتیجه این پژوهش	۳۲۷۹۰
میزان کاهش نسبت به حالت کنترل نشده	**۲/۶ درصد**
میزان درصد اختلاف با نتیجه استوارت و همکاران	**۱/۸ درصد**

۴- ارزیابی خستگی در توربین بادی فراساحلی

طراحی اکثر توربین‌های بادی بجای بارهای حداکثر، برای بارهای خستگی انجام می‌پذیرد. به همین دلیل، در این پژوهش نیز به منظور بررسی خستگی، تاثیر کنترل سازه‌ای انجام شده بواسطه میراگر جرمی تنظیم شونده در کاهش بارهای وارد بر پای برج یک توربین بادی فراساحلی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بررسی خستگی در توربین‌های بادی باید طبق اصول بیان شده در استاندارد ۱-۶۱۴۰۰ انجام شود. طبق این استاندارد باید ترکیب بار DLC1.2 در محاسبات در نظر گرفته شود. مطابق این ترکیب بار باید علاوه بر درنظر گرفته شدن بارگذاری اعمالی بواسطه ارتفاع و پریود طراحی در طول مدت زمان خستگی برای سازه، باید بازه وسیعی از ارتفاعات موج و پریودها که در جهات مختلف به سازه وارد می‌شوند، در محاسبات درنظر گرفته شوند. برای بررسی این ترکیب بار همانطور که عنوان شد، بازه‌ی وسیعی از ارتفاعات موج و پریودهای مربوطه در کنار سرعت بادهای مختلف، در محاسبات درنظر گرفته شد [۱۳]. به منظور انجام محاسبات خستگی در این پژوهش، حالت سه بعدی جهات موج و باد تنها به صورت یک بعدی جهت ساده سازی مسئله درنظر گرفته شدند. این بدین معنی است که تمامی ورودی‌های موج و باد تنها در راستای فور-افتر توربین بر آن وارد گردیدند. در نظر گرفتن نیروی موج به دلیل منشا بادی بودن موج نیازمند اطلاعات بادی است. اما درکنار این موضوع اثرات خود نیروی باد باید بطور جداگانه مورد بررسی قرار بگیرد. به همین منظور ۱۲ سرعت باد مختلف یعنی از ۲ تا ۲۴ متر بر ثانیه با فواصل ۲ متر بر ثانیه‌ای در نظر گرفته شد، اما بدلیل تفاوت نیروی باد در هنگام وزش، سرعت بادهای در نظر گرفته شده هریک با ۶ فایل اطلاعات باد مختلف محاسبه گشتند. این فایل‌های اطلاعات باد به منظور داشتن قابلیت آشفتگی مجددا توسط نرم افزار TurbSim محاسبه گردیدند. در نهایت به تعداد ۷۲ آنالیز برای بررسی خستگی و بررسی تفاوت حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده انجام شد. برای هر سرعت باد در نظر گرفته شده، یک ارتفاع موج و پریود شاخص نیز با روش بیان شده، بدست آمد.

جهت آنالیز خروجی‌های گرفته شده از دو نرم افزار FAST و FAST-SC از کدی به نام MLife استفاده شده است [۱۴]. این کد نیز توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدید پذیر ایالات متحده تهیه شده، یک کد نوشته شده در نرم افزار متلب برای پس پردازش اطلاعات شبیه سازی شده توسط کدهایی همچون FAST جهت محاسبه پارامترهای مختلف خستگی است. این کد به منظور محاسبه آماری اطلاعات و تخمین خستگی برای یک یا چند سری اطلاعات خروجی گرفته شده است [۱۵]. به عنوان پارامترهای ورودی این نرم افزار، مقدار ۲۰ سال برحسب ثانیه یعنی مقدار ۶۳۰۷۲۰۰۰۰ ثانیه به عنوان عمرطراحی توربین، مقدار ۳ به عنوان مقدار شیب مربوط به نمودار S-N فرض گردیده و دو کانال بررسی برای گشتاورهای پای برج توربین معرفی گردید تا زمان لازم تا خرابی برج توربین بواسطه گشتاورهای پای برج توربین محاسبه گردد.

۵ - نتیجه گیری

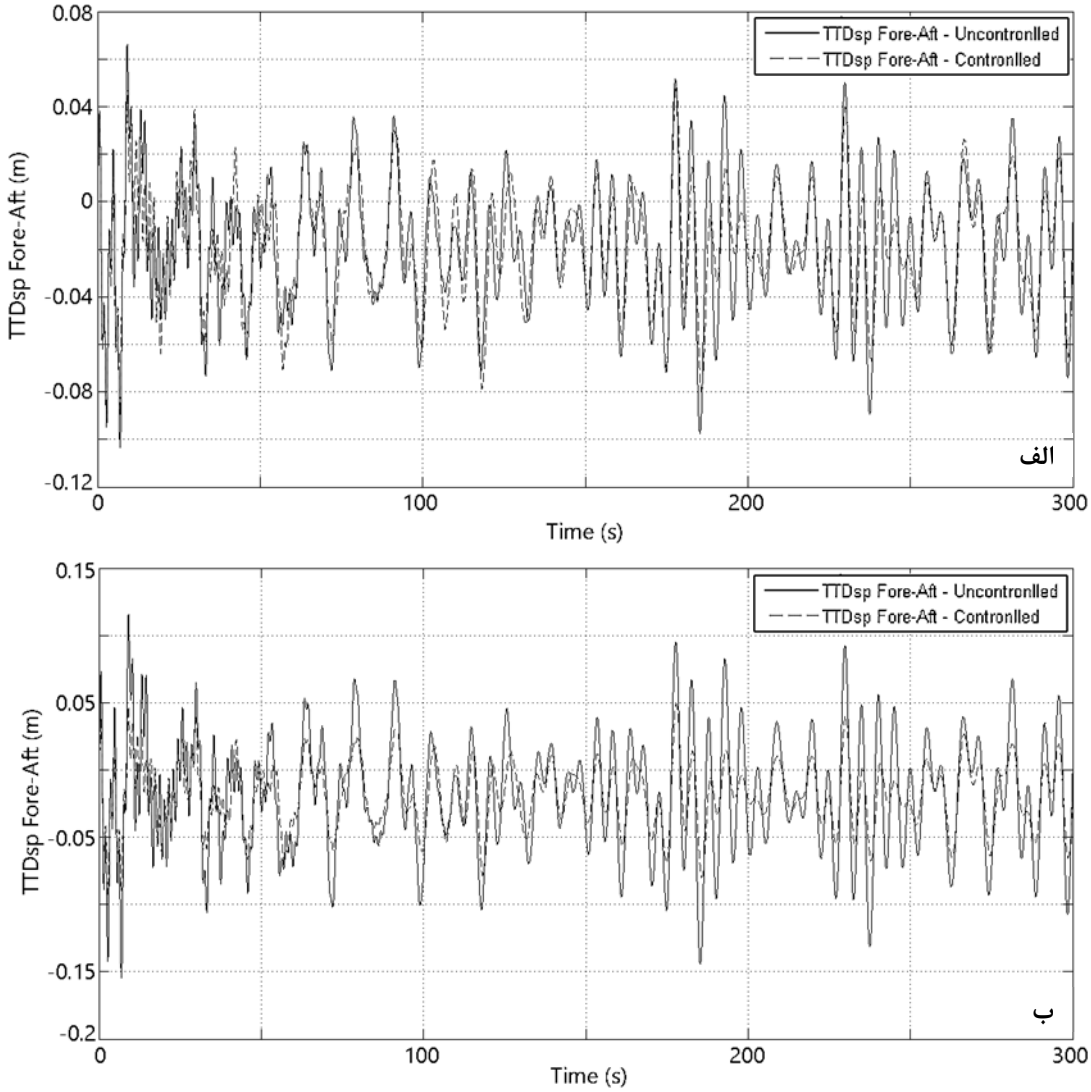
در این پژوهش کنترل سازه‌ای یک توربین ۵ مگاواتی پایه کششی شناور بواسطه میراگر جرم تنظیم شونده با اجرام مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار سازه با حضور این میراگرها بررسی گردید. میراگرهای مورد استفاده تماما در ناسل توربین قرار داشته و اجرامی درحدود ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد جرم بالای سکوی توربین، یعنی ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ تن را دارا بودند. هدف از این پژوهش بررسی میزان کاهش پاسخ ارتعاشی سازه در درجات آزادی مختلف بود، در راستای همین هدف میزان زمان لازم برای خرابی سازه تحت دو پارامتر گشتاورهای پای توربین نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصله در حیطه این پژوهش را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود. نتایج مربوط به پژوهش انجام شده در دو بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بخش اول نتایج، به بررسی کنترل سازه‌ای انجام شده توسط اجرام مختلف میراگر پرداخته می‌شود و در بخش دوم به بررسی پارامتر زمان لازم تا خرابی توربین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۵-۱- نتایج کنترل سازه ای توربین

پاسخ تاریخچه زمانی پارامترهای مختلفی از توربین همانند جابجایی بالای توربین در دو راستای ساید-ساید و فور-افتر انجام گردید. تمامی این پاسخ‌ها در زمانی برابر با ۳۰۰ ثانیه با گام‌های زمانی ۰/۰۱۲۵ انجام شد تا رفتار توربین قابل بررسی باشد. این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]



شکل ۳ – پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی بالای توربین در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده در راستای فور-افتر (الف): سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، (ب): سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه

آنالیزها برای تمامی میراگرها جرمی انجام گردید، نتایج مربوطه برای میراگر جرمی ۲۱ تنی نمایش داده شده است. نمودارهایی نیز جهت مقایسه‌ی دیگر میراگرها با میراگر ۲۱ تنی مورد بررسی، نمایش داده شده اند. همانطور که نمودارهای شکل ۳ نشان می-دهد، کاربرد میراگر ۲۱ تنی در توربین بادی فراساحلی موجب کاهش جابجایی در بیشتر لحظات در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و برای تمامی لحظات در سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه بوده است.

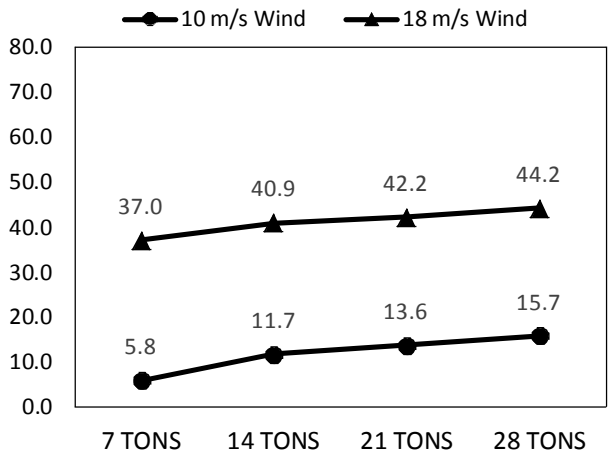
مقایسه‌ی این دو نمودار حاکی از آن است که حضور میراگر و عملکرد آن در راستای فور-افتر توربین برای سرعت‌های باد بالاتر موثرتر بوده و منجر به کاهش بیشتر جابجایی می‌گردد. نمودار شکل ۴ جابجایی بالای توربین در راستای فور-افتر را برای دیگر اجرام میراگرهای جرمی تنظیم شونده را نشان می‌دهد.

این نمودار حاکی از آن است که افزایش جرم میراگر برای هر دو سرعت باد موجب کاهش بیشتر جابجایی در بالای توربین در راستای فور-افتر شده است، این کاهش در مقدار حداکثر خود حدود ۴۴/۲ درصد در سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه بوده و در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه حدود ۱۵/۷ درصد بوده که مقادیر حداکثر کاهش هر دو برای میراگر ۲۸ تنی بوده است. نمودار شکل ۵ پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی بالای توربین در راستای ساید-ساید را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل ۵ می‌توان دریافت که در راستای ساید-ساید توربین نیز بدلیل استفاده از میراگر در ناسل، حتی با وجود این که درجه آزادی میراگر مورد استفاده در راستای فور-افتر توربین بوده است، اما استفاده از میراگر موجب کاهش جابجایی‌ها در راستای ساید-ساید توربین شده که این موضوع نیز بیانگر مثبت بودن استفاده از میراگر جرم تنظیم شونده در ناسل توربین است. نمودارهای نمایش داده شده در شکل ۶ بیانگر جابجایی بالای توربین در راستای ساید-ساید، دیگر اجرام میراگر های جرمی تنظیم شونده است، این نمودار نیز حاکی از آن است

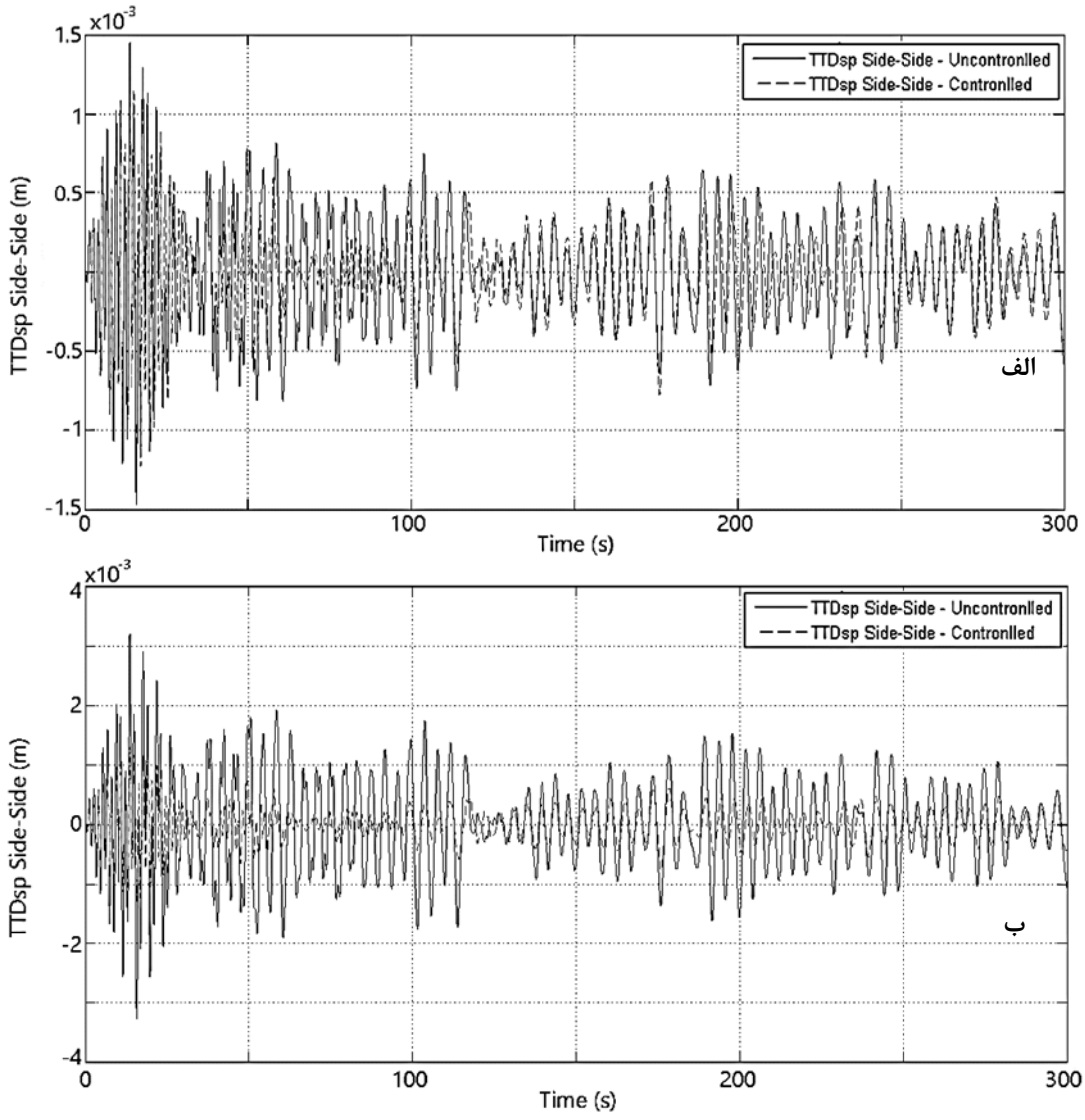
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

که افزایش جرم میراگر برای هر دو سرعت باد موجب کاهش بیشتر جابجایی در بالای توربین در راستای فور-افتر شده است، با توجه به نمودارهای شکل ۶، با وجود کاهش حادث شده در راستای ساید-ساید توربین بخاطر استفاده از میراگر در ناسل، به دلیل این که درجه آزادی میراگر مورد استفاده در راستای فور-افتر توربین بوده است، مقدار افزایش جرم میراگر تاثیر قابل توجهی در بیشتر شدن میزان کاهش¬ها نداشته است. اما با این حال، افزایش جرم میراگر به ۲۸ تن، کاهش ۶۲ درصدی جابجایی¬ها را در سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه موجب شده که این میزان نسبت به جرم ۷ تنی میراگر، تنها ۴ درصد بیشتر بوده است. در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، افزایش جرم میراگر به ۲۸ تن موجب کاهش ۱۳/۴ درصدی جابجایی شده و این میزان کاهش برای جرم ۷ تنی ۶/۵ درصد بوده که که نشان از افزایش تقریبا ۷ درصدی جابجایی است و این در حالی است که مقدار حداکثر جابجایی در این نمودار در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه برای میراگر ۱۴ تنی بوده است.



شکل ۴ –درصد کاهش جابجایی بالای توربین در راستای فور-افتر برای میراگرهای مختلف



شکل ۵– پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی بالای توربین در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده در راستای ساید-ساید
(الف): سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، (ب): سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه

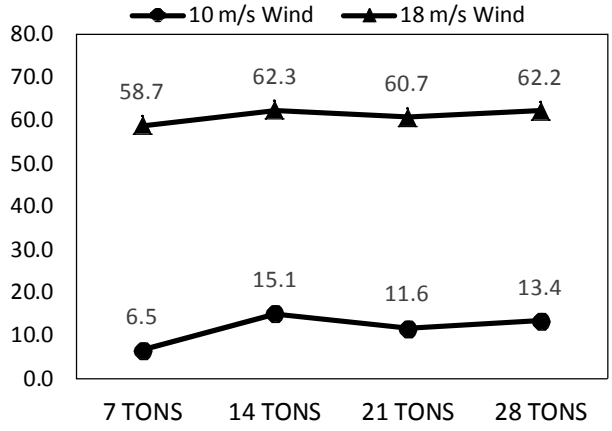
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

نتایج مربوط به کاهش و یا افـــــزایش جابجـایی هـا در درجـات آزادی مختلف، مورد بررسی در توربین به دلیل حضور میراگـرهـای مختلف در ناسل، در دو جدول ۵ و ۶ آورده شده اند، جدول ۵ نتایج مربوط به جابجایی‌ها برای سرعت باد ۱۰ متر بـر ثانیـه و جـدول ۶ برای سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه است. کاهش جابجایی‌های تـوربین زمانی ارزشمند خواهد بود که میزان بارهـای وارد بـر قسـمت‌هـای مختلف توربین یا بعبارت بهتر تنش‌هـای وارد بـر اعضـای مختلـف توربین کاهش پیدا کند، به منظور بررسی این مورد، در این پژوهش میزان گشتاور وارد بر پای برج را که پارامتر تاثیرگذاری در خستگی پای برج توربین است مورد بررسی قرار داده شده است. گشتاورهای پای برج در دو راستای فور-افتر و ساید-سـاید بررسی گردیده و تاثیر حضور میراگر در توربین در ایـن گشـتاورهـا ارزیـابی شـده اسـت. بمنظور بررسی گشـتاور پـای بـرج و مقایسـه‌ی میـزان کـاهش یـا افزایش آن، تنها آنالیز برای میراگر ۲۱ تنی و برای سرعت بـاد بـالا یعنی ۱۸ متر بر ثانیه انجام شد. نتایج مربـوط بـه ایـن تحلیـل در شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی این نمودارها نشان مـی‌دهـد که در حالت کلی به دلیل حضور میراگر نیـروی وارد بـر پـای بـرج توربین در راستای فور-افتر به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا مـی-کند که این نشان از بهبود رفتار لرزه‌ای به دلیل کنترل انجام شـده است. همچنین با توجه به نمودار می‌توان چنین بیان کرد که درصد کاهش برای گشتاور در راستای ساید-ساید بیشتر از راستای فـور-افتر بوده است، اما باید توجه داشت که با وجود بیشتر بودن میـزان درصد کاهش برای گشتاور راستای ساید-ساید، مقـدار گشـتاور در راستای فور-افتر کاهش بیشتری داشته که این موضوع بیانگر میزان تاثیر بیشتر میراگر در این راستا می‌باشد.

۵-۲- نتایج تحلیل خستگی (زمان لازم تا خرابی)

به منظور بررسی خستگی در توربین بادی، در این پژوهش، پارامتر زمان لازم تا خرابی توربین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بخش برای دو پارامتر گشتاور پای برج در راستای فور-افتر و ساید-ساید به عنوان موثرترین پارامترهای ایجاد کننده خستگی و خرابی در برج توربین مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل ۶ – درصد کاهش جابجایی بالای توربین در راستای ساید-ساید برای میراگرهای مختلف

جدول ۵- میزان درصد کاهش یا افزایش جابجایی‌ها برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه

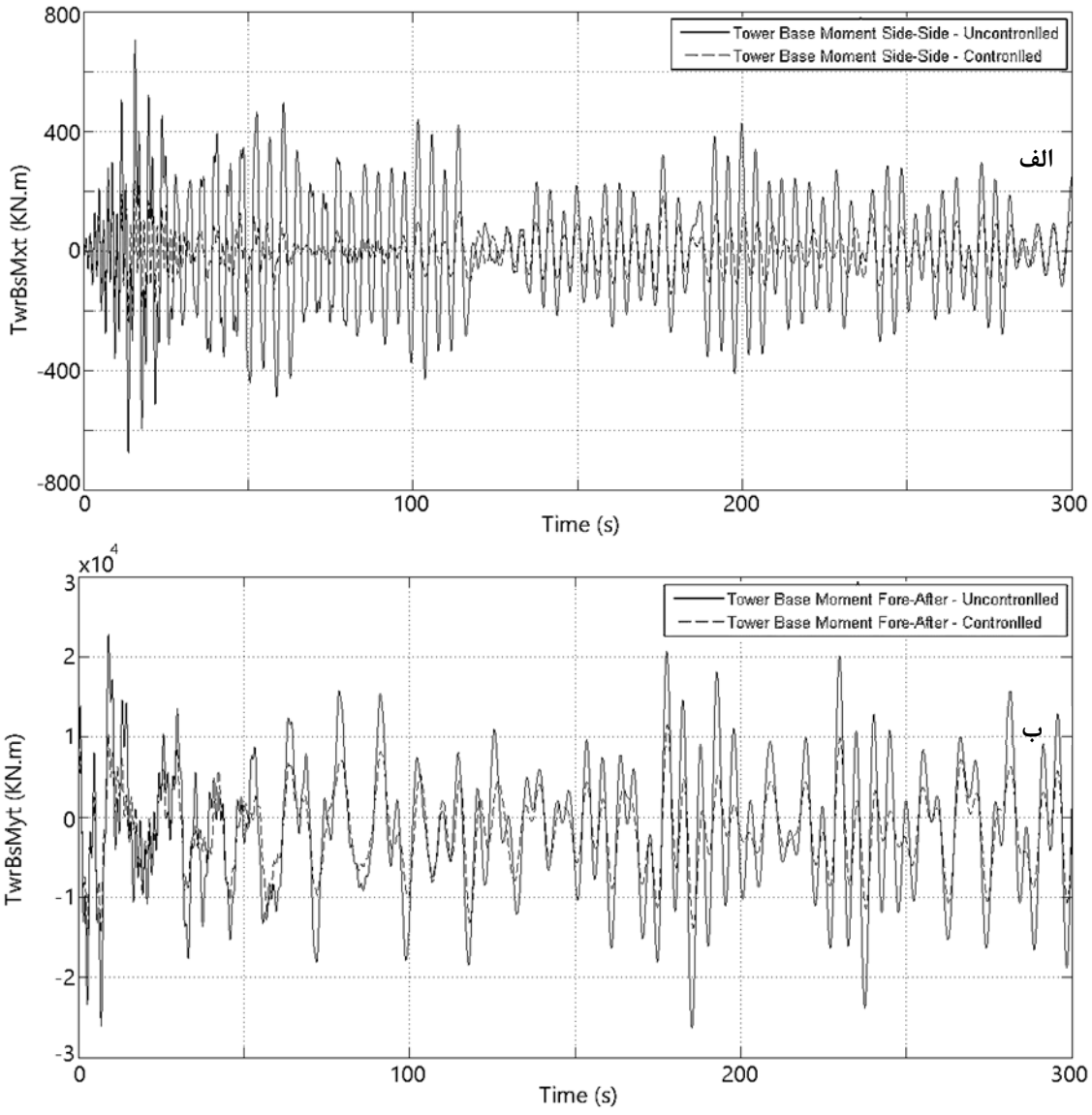
نام مود	میزان (کاهش + افزایش -) (درصد)			
	میراگر ۷ تنی	میراگر ۱۴ تنی	میراگر ۲۱ تنی	میراگر ۲۸ تنی
اولین مود فور-افتر برج	+۵/۸	+۱۱/۷	+۱۳/۶	+۱۵/۷
اولین مود ساید-ساید	+۶/۵	+۱۵/۱	+۱۱/۶	+۱۳/۴
سرج سکو	+۰/۳	+۰/۳	+۰/۳	+۰/۱
سوی سکو	+۵/۶	+۹/۶	+۲۳/۷	+۳۰/۳
هیو سکو	+۶/۳	-۳/۱	-۹/۴	-۱۲/۵
رول سکو	+۱/۰	-۰/۸	-۰/۸	+۵/۸
پیچ سکو	+۰/۸	+۰/۸	+۲/۸	+۰/۸
یاء سکو	+۳/۹	+۶/۶	+۲۲/۴	+۲۷/۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

جدول ۶- میزان درصد کاهش یا افزایش جابجایی‌ها برای سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه

نام مود	میزان (کاهش + افزایش -) (درصد)			
	میراگر ۷ تنی	میراگر ۱۴ تنی	میراگر ۲۱ تنی	میراگر ۲۸ تنی
اولین مود فور-افتر برج	+۳۷/۰	+۴۰/۹	+۴۲/۲	+۴۴/۲
اولین مود ساید-ساید	+۵۸/۷	+۶۲/۳	+۶۰/۷	+۶۲/۳
سرج سکو	+۳۷/۱	+۳۷/۱	+۳۷/۱	+۳۷/۱
سوی سکو	+۶۹/۹	+۶۸/۸	+۶۸/۷	+۷۰/۸
هیو سکو	+۶۲/۴	+۶۱/۲	+۵۸/۸	+۵۶/۵
رول سکو	+۶۲/۷	+۶۱/۷	+۶۱/۷	+۶۴/۵
پیچ سکو	+۳۵/۲	+۳۵/۷	+۳۶/۷	+۳۶/۷
یاء سکو	+۴۰/۸	+۴۱/۳	+۵۰/۸	+۵۵/۰



شکل ۷– نمودار تاریخچه زمانی گشتاور وارد بر پای برج برای میراگر ۲۱ تنی (الف): جهت ساید-ساید (ب): جهت فور-افتر

نتایج حاصل از انجام محاسبات برای خستگی بواسطه‌ی اعدادی بر حسب ثانیه است که جدول ۷ نمایش دهنده نتایج مربوطه است.

با توجه به این نتایج می‌توان چنین عنوان کرد که حضور میراگر ۲۱ تنی در ناسل توربین بادی فراساحلی موجب افزایش زمان لازم برای خرابی توربین شده است، در حالت کنترل نشده‌ی توربین میزان زمان لازم تا خرابی در پارامتر گشتاور حول محور Y پای برج توربین در حدود ۲۸ سال بوده که این میزان با استفاده از میراگر در ناسل در حدود ۳ سال افزایش داشته و به زمانی در حدود ۳۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

سال رسیده است. نتیجه دیگر حاکی از آن است که به دلیل استفاده از میراگر در ناسل توربین فراساحلی مورد بررسی، میزان

جدول ۷- نتایج تحلیل خستگی (زمان لازم تا خرابی توربین برحسب ثانیه و سال)

پارامتر	کنترل نشده	کنترل شده
راستای فور-افتر حول محور Y	$۸/۸۷۳ \times ۱۰^{۸}$ = ۲۸ سال	$۹/۷۹۱ \times ۱۰^{۸}$ = ۳۱ سال
راستای ساید-ساید حول محور X	$۹/۱۴ \times ۱۰^{۸}$ = ۲۹ سال	$۱۰/۴۳ \times ۱۰^{۸}$ = ۳۳ سال

زمان لازم برای خرابی توربین به دلیل بررسی گشتاور حول محور X افزایش پیدا کرده است. این زمان در حالت بدون کنترل در حدود ۲۹ سال بوده که به دلیل استفاده از میراگر به مقداری در حدود ۳۳ سال افزایش پیدا کرده و این نشان از افزایش ۴ سالی زمان لازم برای خرابی سازه است.

۵-۳- جمع بندی

در این پژوهش کنترل سازه‌ای یک توربین ۵ مگاواتی پایه کششی شناور بواسطه میراگر جرم تنظیم شونده با اجرام مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار سازه با حضور این میراگرها بررسی گردید، می‌توان چنین عنوان نمود که استفاده از میراگر جرم تنظیم شونده با اجرام مختلف، می‌تواند به دلیل کاهش ارتعاشات، موجب بهبود رفتار ارتعاشی توربین در تمامی درجات آزادی شود. با توجه به نتایج مربوط به میزان جابجایی‌ها، حضور میراگر در ناسل توربین، در اکثر درجات آزادی، می‌تواند موجب کاهش قابل توجهی در جابجایی‌ها شود به طوری که این کاهش در بهترین حالت برای درجه آزادی سووی سکو و بواسطه‌ی میراگر ۲۸ تنی بوده که کاهشی در حدود ۷۰ درصدی را در پی داشته است. همچنین نتایج نشان می‌داد که مقدار جابجایی‌ها بواسطه حضور میراگرها در ناسل، برای سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه در هر دو راستای فور-افتر و ساید-ساید کاهش قابل توجه‌تری را نسبت به سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه از خود نشان می‌دهد. در ارتباط با افزایش جرم میراگر در طول مطالعه می‌توان چنین عنوان نمود که افزایش جرم میراگر تا ۲۸ تن موجب کاهش بیشتر مقدار جابجایی‌ها در بیشتر درجات آزادی می‌شود که نشان از بهبود رفتار ارتعاشی با افزایش جرم میراگر است. حضور میراگر در ناسل توربین بطور قابل توجهی گشتاور وارد بر پای برج توربین را کاهش می‌دهد، درصد کاهش در جهت ساید-ساید بیشتر از راستای فور-افتر بوده است، اما به دلیل بیشتر کاهش پیدا کردن گشتاور در راستای فور-افتر از لحاظ مقداری می‌توان چنین عنوان نمود که میزان گشتاور در راستای فور-افتر بیشتر کاهش داشته است. همچنین حضور میراگر ۲۱ تنی در ناسل توربین می‌تواند میزان گشتاور پای توربین را که عامل ایجاد کننده خستگی در برج توربین است، را در حدود ۵۰ درصد کاهش دهد. با بررسی میراگر منتخب ۲۱ تنی برای بررسی خستگی نیز می‌توان چنین عنوان نمود که حضور این میراگر به دلیل کاهش حداکثر میزان جابجایی‌ها و نیز گشتاور پای برج به حدود ۵۰ درصد، عمر خستگی سازه را در حدود ۳ سال برای راستای فور-افتر و ۴ سال برای راستای ساید-ساید افزایش داده و زمان لازم برای خرابی سازه را نیز بصورت مشابه افزایش می‌دهد.

کلید واژگان

JONSWAP: Joint North Sea Wave Project
OWT: Offshore Wind Turbines
TLP: Tension Length Platform
TMD: Tuned Mass Damper

۶ - مراجع

1- Lackner, M., Rotea, M., (2011), *Passive structural Control of Offshore Wind Turbines*, Journal of Wind Energy, Vol. 14, pp. 373–388.

2- Colwell, S., Basu, B., (2009), *Tuned Liquid Column Dampers in Offshore Wind Turbines for Structural Control*, Journal of Engineering Structures, Vol. 31, pp. 358-368.

3- Roderick, C., (2012), *Vibration Reduction of Offshore Wind Turbines Using Tuned Liquid Column Dampers*, Master's thesis, University of Massachusetts Amherst, April.

4- Lackner, M., Rotea, M., (2011), *Structural Control of Floating Wind Turbines*, Journal of Mechatronics, Vol. 21, pp. 704–719.

5- Franklin, Y.C, Hongping, J., Kangyu, L. (2008), *Smart Structures Innovative For Seismic Response Control*, Tylor and Francis Group.

6- Gawronski, W., (2004), *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*, Springer Pub.

7- Jonkman, J., Matha, D., (2009), *A Quantitative Comparison of the Responses of Three Floating Platforms*, Conf. Rep. NREL/CP-46726, National Renewable Energy Laboratory.

8- Jonkman, J., Buhl, M., (2005), *FAST User's Guide*, Tech. Rep. NREL/EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory.

9- Jonkman J., (2005), *Dynamics of Offshore Floating Wind Turbines – Model Development and Verification*, Journal of Wind Energy, Vol. 12, pp. 459–492.

10- Jonkman J., (2009), *Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform, with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts*, Subcontract Rep.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]

NREL/SR-500-45891, National Renewable Energy Laboratory.

11- Lackner, M., Rotea, M., (2010), *Structural Control of Floating Wind Turbines,* Journal of Mechatronics, Vol. 21, pp. 704–719.

12- Stewart, G., Lackner, M., (2013), *Offshore Wind Turbine Load Reduction Employing Optimal Passive Tuned Mass Damping Systems,* IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, pp. 1091-1104.

13- Herbert, J., (1999), *On the Fatigue Analysis of Wind Turbines*, SANDIA Rep. SAND99-0089.

14- Hayman, G., (2012), MLife Theory Manual for Version 1.00. Tech. Rep. National Renewable Energy Laboratory.

15- Jonkman, J., (2007), *Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine*, Tech. Rep. NREL/TP-500-41958, National Renewable Energy Laboratory.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8]