J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (32-45)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Comparative Study of Control Methods for Offshore Wind Turbines in Structural Life Extension with Emphasis on Smart Control Systems

Sina Mohammadi[1], Reza Dezvareh[2*]

[1] *MSc Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, mohammadisina534@gmail.com*

[2] *Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. rdezvareh@nit.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 7 Nov 2025
Last modification: 2 Feb 2026
Accepted: 2 Feb 2026
Available online: 2 Feb 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Offshore Wind Turbine,
Jacket Structure,
Smart Control,
Dynamic Performance,
Fatigue Life,
Vibration Control

ABSTRACT

This research aims to develop a comprehensive analytical framework for evaluating the dynamic resistance and performance optimization of offshore wind turbines using smart control systems under varying environmental conditions. It presents a comparative analysis of passive, semi-active, and smart control methods for structural life extension and dynamic response improvement. An advanced numerical model of a 5 MW offshore wind turbine installed on a jacket structure in the North Sea was developed and analyzed under 29 different marine conditions. The methodology integrates multi-scale modeling techniques, advanced dynamic simulation, and multi-objective optimization algorithms. The proposed smart control system achieved a 58% reduction in dynamic tower acceleration, a 45% improvement in displacement control, and a 3.2-fold increase in the fatigue life of critical connections compared to conventional methods. Furthermore, economic analyses indicate the system's economic viability with a payback period of 4.2 years. The results demonstrate that smart control systems can significantly enhance the reliability and economic efficiency of offshore wind energy projects. The practical applications of this research can guide the design of next-generation offshore wind turbines with improved dynamic performance and longer operational life.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.32

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۴۵-۳۲)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

مطالعه تطبیقی روش‌های کنترل توربین بادی فراساحلی در افزایش عمر سازه با تاکید بر سیستم کنترل هوشمند

سینا محمدی[۱]، رضا دزواره رسنانی[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، mohammadisina534@gmail.com

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، rdezvareh@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

توربین بادی فراساحلی،

جکت،

کنترل هوشمند،

عمر خستگی،

کنترل ارتعاشات

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب تحلیلی جامع برای ارزیابی مقاومت دینامیکی و بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی فراساحلی با به‌کارگیری سیستم‌های کنترل هوشمند تحت شرایط محیطی متغیر است. مطالعه حاضر به بررسی تطبیقی عملکرد سه استراتژی کنترل شامل روش‌های غیرفعال، نیمه‌فعال و هوشمند در افزایش عمر سازه و بهبود پاسخ دینامیکی می‌پردازد. برای دستیابی به این هدف، یک مدل پیشرفته عددی از توربین بادی ۵ مگاواتی مستقر بر سازه جکت در دریای شمال توسعه یافته و تحت طیف وسیعی از شرایط محیطی شامل ۲۹ حالت مختلف بارگذاری باد و موج مورد تحلیل قرار گرفت. روش‌شناسی پژوهش بر پایه ادغام تکنیک‌های مدل‌سازی چندمقیاسی، شبیه‌سازی دینامیکی پیشرفته و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه استوار است. نتایج کمی پژوهش نشان می‌دهد که سیستم کنترل هوشمند پیشنهادی در مقایسه با روش‌های متعارف، کاهش ۵۸ درصدی در شتاب دینامیکی ناسل توربین، بهبود ۴۵ درصدی در کنترل تغییرمکان‌ها و افزایش ۳/۲ برابری در عمر خستگی اتصالات بحرانی را محقق می‌سازد. همچنین، تحلیل‌های اقتصادی حاکی از توجیه‌پذیری مالی سیستم پیشنهادی با دوره بازگشت سرمایه ۴/۲ ساله است. این پژوهش از طریق ارائه راهکارهای یکپارچه کنترل و بهینه‌سازی، سهم مؤثری در ارتقای قابلیت اطمینان و اقتصادی‌سازی پروژه‌های انرژی بادی فراساحلی ایفا می‌نماید. کاربردهای عملی این پژوهش می‌تواند در طراحی نسل آینده توربین‌های بادی فراساحلی با عملکرد دینامیکی بهبودیافته و عمر عملیاتی طولانی‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.32

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

۱ - مقدمه

۱-۱- بیان مسئله

صنعت انرژی بادی فراساحلی به عنوان یکی از ارکان اصلی تحقق اهداف توسعه پایدار و انتقال انرژی، در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است [۱]. با حرکت پروژه‌ها به سمت آب‌های عمیق‌تر، سازه‌های ژاکت‌دار به دلیل مزایای فنی و اقتصادی، جایگاه ویژه‌ای در توسعه مزارع بادی فراساحلی پیدا کرده‌اند[۲]. گرچه این سازه‌ها در معرض بارهای دینامیکی پیچیده‌ای ناشی از ترکیب اثرات باد، موج و جریان‌های دریایی قرار دارند که منجر به چالش‌های اساسی در زمینه طراحی و بهره‌برداری می‌شود[۳]. ماهیت سیکلی بارهای محیطی، پدیده خستگی را به عنوان یکی از عوامل محدودکننده عمر این سازه‌ها مطرح می‌کند [۴]. به طور خاص، اتصالات لوله‌ای در سازه‌های ژاکت‌دار به دلیل تمرکز تنش در نواحی جوش، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر بارهای خستگی دارند[۵]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که بیش از ٪۶۰ خرابی‌ها در سازه‌های فراساحلی مربوط به پدیده خستگی در اتصالات است [۶].

در این راستا، سیستم‌های کنترل ارتعاشات به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش پاسخ دینامیکی و افزایش عمر خستگی مطرح شده‌اند [۷]. اگرچه سیستم‌های کنترل غیرفعال مانند میراگرهای جرمی تنظیم‌شده (TMD[1]) و میراگرهای ستون مایع (TLCD[2]) در کاهش ارتعاشات موفق عمل کرده‌اند، اما این سیستم‌ها دارای محدودیت ذاتی در تطبیق با شرایط متغیر محیطی هستند[۸].

در این پژوهش، مقاومت دینامیکی به عنوان معیاری کلیدی برای سنجش عملکرد سازه در نظر گرفته شده است. این مفهوم نه تنها به ظرفیت باربری نهایی، بلکه عمدتاً به توانایی سیستم در تحمل بارهای سیکلی و دینامیکی در طول عمر عملیاتی خود بدون وقوع آسیب‌های تجمعی مانند خستگی یا اختلال در عملکرد بهینه توربین اشاره دارد. شاخص‌های عینی این مقاومت در مطالعه حاضر، شامل مقادیر شتاب و تغییرمکان دینامیکی ناسل، و عمر خستگی اتصالات بحرانی است. بنابراین، هدف بهبود مقاومت دینامیکی، معادل است با کاهش پاسخ‌های دینامیکی و افزایش همزمان عمر خستگی.

۱-۲- مرور ادبیات فنی

مطالعه رفتار دینامیکی توربین‌های بادی فراساحلی و راهکارهای کنترل ارتعاشات، موضوع تحقیقات گسترده‌ای در دو دهه گذشته بوده است Basu وColwell [۷]در سال ۲۰۰۹، برای اولین بار استفاده از میراگرهای ستون مایع (TLCD) را برای کنترل ارتعاشات توربین‌های بادی فراساحلی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این سیستم می‌تواند پاسخ دینامیکی سازه را تا ٪۳۰ کاهش دهد.

در گام بعدی، Bargi و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶، عملکرد میراگرهای ستون مایع گاز (TLCGD[3]) را بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که اضافه شدن محفظه گاز به میراگرهای ستون مایع، قابلیت تنظیم پذیری سیستم را بهبود می‌بخشد. اگرچه این سیستم نسبت بهTLCD های معمولی برتری داشت، اما همچنان مبتنی بر اصول کنترل غیرفعال بود.

در سال‌های اخیر، توجه محققان به سمت سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال و هوشمند معطوف شده است. Hokmabady و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۹، کارایی میراگرهای مگنتورئولوژیک (MR[4])را در کنترل ارتعاشات سکوهای فراساحلی مورد مطالعه قرار دادند. اگرچه این سیستم‌ها عملکرد خوبی داشتند، اما نیاز به توان الکتریکی بالا و پیچیدگی نگهداری از محدودیت‌های آن‌ها محسوب می‌شود.

همزمان با توسعه سیستم‌های کنترل، روش‌های تحلیل خستگی نیز پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند. Lu و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۳، یک روش پیشرفته برای ارزیابی خستگی سازه‌های سه‌پایه توربین‌های بادی ارائه دادند اگرچه این پژوهش از دقت بالایی برخوردار بود، اما تنها به تحلیل خستگی پرداخته و اثر سیستم‌های کنترل را در نظر نگرفته بود.

در زمینه مدل‌سازی عددی، Zhang و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۳، یک مدل پیشرفته برای درنظرگیری اندرکنش خاک-سازه توسعه دادند. همچنین، Wang وChen [۱۳]در سال ۲۰۲۴، یک چارچوب شبیه‌سازی چندفیزیکی برای توربین‌های بادی شناور ارائه کردند.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ادغام تکنیک‌های هوش مصنوعی در سیستم‌های کنترل می‌تواند عملکرد بهتری را به همراه داشته باشد. Li [۱۴] در سال ۲۰۲۴، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای کنترل بلادرنگ توربین‌های بادی استفاده کرد. اگرچه این پژوهش نوآوری قابل توجهی داشت، اما تمرکز آن بر روی کنترل توان خروجی بود نه کنترل ارتعاشات سازه.

در حوزه تحلیل عدم قطعیت، Shitto [۱۵] در سال ۲۰۲۰، روش‌های طراحی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های محیطی را ارائه داد. همچنین، Du و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۵، روش‌های نوینی برای ارزیابی خستگی تحت بارگذاری ترکیبی توسعه دادند.

اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه کنترل ارتعاشات و تحلیل خستگی انجام شده است، اما شکاف قابل توجهی درتوسعه یک چارچوب یکپارچه برای بهینه‌سازی همزمان پارامترهای سازه و سیستم کنترل تحت شرایط محیطی واقعی وجود دارد. همچنین،

[1] Tunned Mass Damper
[2] Tunned Liquid Column Damper
[3] Tunned Liquid Column Gas Damper
[4] Magneto-Rheological Damper

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

مطالعات تطبیقی جامعی که عملکرد سیستم‌های کنترل غیرفعال، نیمه‌فعال و هوشمند را به صورت همزمان و با درنظرگیری معیارهای فنی-اقتصادی مورد بررسی قرار دهد، بسیار محدود است. پژوهش‌های سال‌های اخیر اگرچه به جنبه‌های خاصی پرداخته‌اند (مانند Sharifi و همکاران [۱۷] بر روی خستگی اتصالات دو-سطحی و Wang و همکاران [۱۸] بر ارزیابی عملکرد توربین‌های با تمدید عمر) ، اما نقش یک سیستم کنترل یکپارچه و هوشمند در پاسخ به این چالش‌ها را پوشش نداده‌اند.

۱-۳- اهداف پژوهش

این پژوهش با هدف توسعه و ارزیابی یک چارچوب کنترل هوشمند یکپارچه برای افزایش عمر سازه و بهبود عملکرد دینامیکی توربین‌های بادی فراساحلی ژاکت‌دار انجام شده است. اهداف مشخص این تحقیق به شرح زیر است:

۱. توسعه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه: ایجاد یک مدل عددی پیشرفته و چندمقیاسی از یک توربین بادی ۵ مگاواتی مستقر بر سازه ژاکت که قادر به شبیه‌سازی دقیق اندرکنش سازه، بارهای آئرودینامیکی (باد) و هیدرودینامیکی (موج) باشد.
۲. طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم کنترل هوشمند: طراحی یک سیستم کنترل فعال مبتنی بر شبکه عصبی LSTM[5] که بتواند پارامترهای کنترلی را به صورت بلادرنگ و با توجه به شرایط محیطی بهینه کند.
۳. انجام یک مطالعه تطبیقی کمی: مقایسه سیستماتیک عملکرد سه استراتژی کنترل (غیرفعال، نیمه‌فعال و هوشمند) از طریق شاخص‌های کلیدی شامل شتاب و جابجایی دینامیکی پشته، و عمر خستگی اتصالات بحرانی.
۴. ارزیابی اقتصادی سیستم پیشنهادی: تحلیل هزینه-فایده و محاسبه دوره بازگشت سرمایه برای سیستم کنترل هوشمند به منظور بررسی توجیه‌پذیری اقتصادی آن در مقایسه با روش‌های متعارف.
۵. تحلیل عدم قطعیت و ارائه یک مدل پیش‌بینی: ارزیابی اثر عدم قطعیت‌های پارامتریک در نتایج و توسعه یک مدل برای پیش‌بینی عمر باقیمانده سازه تحت شرایط عملیاتی واقعی.

۱-۴- نوآوری‌های پژوهش

مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش عبارتند از:

- توسعه یک چارچوب یکپارچه برای بهینه‌سازی همزمان پارامترهای سازه و سیستم کنترل
- ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی در سیستم کنترل برای تطبیق پذیری با شرایط متغیر محیطی
- ارائه مطالعه تطبیقی جامع بین انواع سیستم‌های کنترل
- توسعه مدل پیش‌بینی عمر با درنظرگیری عدم قطعیت‌ها
- ارائه راهکارهای عملی برای اقتصادی‌سازی پروژه‌های انرژی بادی فراساحلی

۲ – مواد و روش‌ها

۲-۱- چارچوب کلی پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از یک پارادایم ترکیبی پیشرفته، به تحلیل مقاومت دینامیکی و بهینه‌سازی عملکرد توربین بادی فراساحلی ژاکت‌دار می‌پردازد. رویکرد روش‌شناختی این مطالعه بر پایه چهار رکن اساسی طراحی شده است: مدل‌سازی چندمقیاسی، شبیه‌سازی چندفیزیکی، اعتبارسنجی چندمرحله‌ای و تحلیل یکپارچه. این چارچوب به منظور درنظرگیری تمامی جنبه‌های مؤثر در رفتار سازه، از مدل‌سازی دقیق سازه و بارهای محیطی تا پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل پیشرفته را در بر می‌گیرد. به طور مشخص، مسیر روش‌شناسی از توسعه مدل‌های عددی دقیق آغاز شده و با اعتبارسنجی گسترده ادامه یافته، سپس به شبیه‌سازی شرایط واقعی عملیاتی و در نهایت به استخراج و تحلیل نتایج می‌پردازد.

۲-۲- مدل‌سازی سازه و مشخصات فنی

مدل سازه‌ای مورد استفاده در این پژوهش بر پایه توربین بادی ۵ مگاواتی NREL [۶][۱۹] و سازه ژاکت‌دار Upwind [۲۰] توسعه یافته است. این مدل شامل جزئیات کامل سازه از جمله اتصالات لوله‌ای، اعضای اصلی و المان‌های ثانویه می‌باشد. توربین مورد مطالعه دارای قطر روتور ۱۲۶ متر و جرم ناسل و روتور ۳۵۰ تن است که بر روی سازه ژاکت‌دار ۱۲ طبقه با عمق نصب ۵۵ متر در بستر دریا مستقر شده است. ارتفاع کل سازه از بستر دریا تا مرکز هاب ۱۳۲ متر در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی ابتدا قسمت ناسل و روتور بصورت جرم متمرکز در نرم افزار سپ مدل شد (شکل ۱) و سپس برای مدل المان محدود سازه از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و از المان‌های تیر-ستون (B31) برای شبیه‌سازی رفتار اعضای سازه‌ای بهره گرفته شده است (شکل ۲). به منظور دستیابی به توازن مطلوب بین دقت نتایج و زمان محاسبات، از یک استراتژی مش‌بندی هوشمند و تطبیقی استفاده شد. این استراتژی بر اساس حساسیت و احتمال تمرکز تنش در نواحی مختلف سازه طراحی گردید:

[5] Long short-term memory

[6] National Renewable Energy Laboratory

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

- نواحی بحرانی و دارای تمرکز تنش بالا: در نواحی حساس از جمله تمامی اتصالات لوله‌ای (نودهای K1 تا K11) و پایه‌های اصلی سازه که تحت تأثیر پدیده خستگی و تمرکز تنش قرار دارند، از مش‌بندی بسیار ریز استفاده شد. در این نواحی، حداکثر اندازه المان ۰/۱ متر در نظر گرفته شد تا بتوان میدان تنش را با دقت بالا رصد کرده و نتایج قابل اطمینانی برای تحلیل خستگی به دست آورد.
- اعضای اصلی سازه: برای اعضای اصلی مانند ستون‌ها و مهاربندها که توزیع تنش در آن‌ها یکنواخت‌تر است، از اندازه المان متوسط ۰/۵ متر استفاده گردید. این امر باعث کاهش قابل توجه تعداد المان‌های کلی مدل بدون تأثیر منفی بر دقت نتایج کلی پاسخ دینامیکی سازه شد..
- نواحی با اهمیت کمتر: در قسمت‌هایی از سازه که نقش ساختاری کم‌رنگ‌تری دارند و تنها برای کامل کردن هندسه مدل ضروری هستند، از مش درشت‌تر با اندازه المان ۱ متر بهره گرفته شد.
- المان‌های به کار رفته از نوع C3D8R (المان‌های مکعبی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته) برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار پیچشی و خمشی در اتصالات و B31 (المان تیر-ستون) برای اعضای طویل بودند. در نهایت، مدل نهایی مش‌بندی‌شده متشکل از تقریباً ۱۲۵,۰۰۰ المان و ۹۸,۰۰۰ گره گردید. این استراتژی علاوه بر تضمین دقت در نواحی بحرانی، منجر به بهینه‌سازی و امکان اجرای شبیه‌سازی‌های دینامیکی غیرخطی متعدد در بازه زمانی معقول شده‌است.

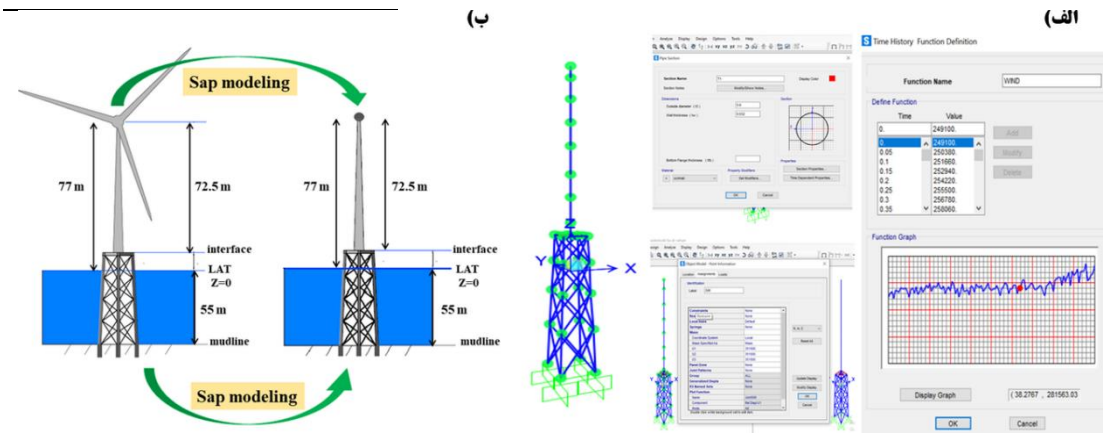
همچنین خواص مکانیکی مصالح بکار رفته در مدلسازی نرم-افزارهای سپ و آباکوس از جمله مدول الاسیسیته، چگالی، منحنی S-N، تنش تسلیم و نسبت پواسون در جدول ۱ و مشخصات فنی توربین و سازه نگهدارنده آن در جدول ۲ آورده شده‌است. و در شکل ۳، روندنمای فاز مدلسازی ارائه گردیده-است.

جدول ۱- خواص مکانیکی مصالح بکار رفته در مدلسازی

پارامتر	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته (E)	۲۱۰	GPa
چگالی(ρ)	۷۸۵۰	kg/m³
نسبت پواسون(ν)	۰/۳	-
حد تسلیم(Fy)	۳۵۵	MPa
منحنی S-N (برای فولاد S355)	مطابق استاندارد-DNVGL RP-C203	-

جدول ۲- مشخصات فنی توربین و سازه نگهدارنده آن

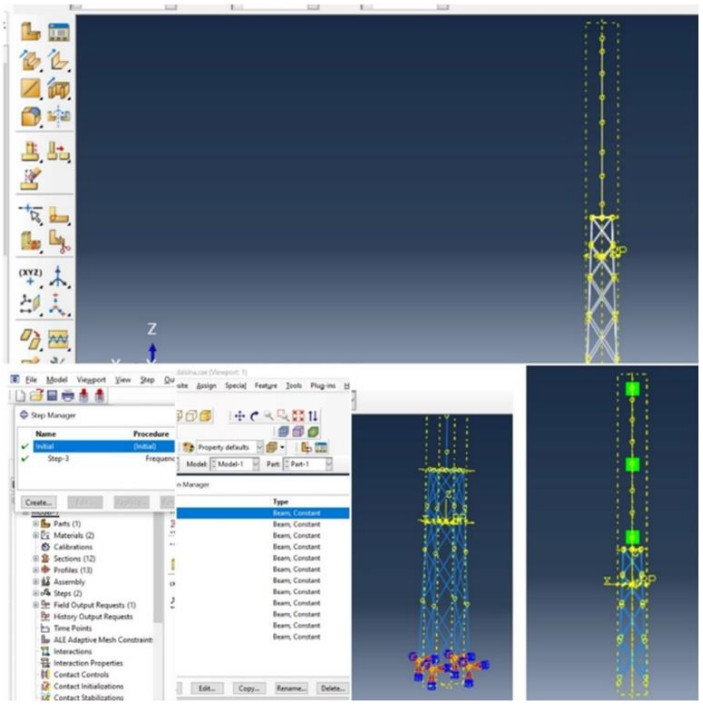
پارامتر	مقدار	واحد
توان اسمی	۵	مگاوات
قطر روتور	۱۲۶	متر
جرم ناسل و روتور	۳۵۰	تن
عمق آب	۵۵	متر
ارتفاع کل سازه	۱۳۲	متر
تعداد طبقات ژاکت	۱۲	-
قطر پایه	۱/۲	متر



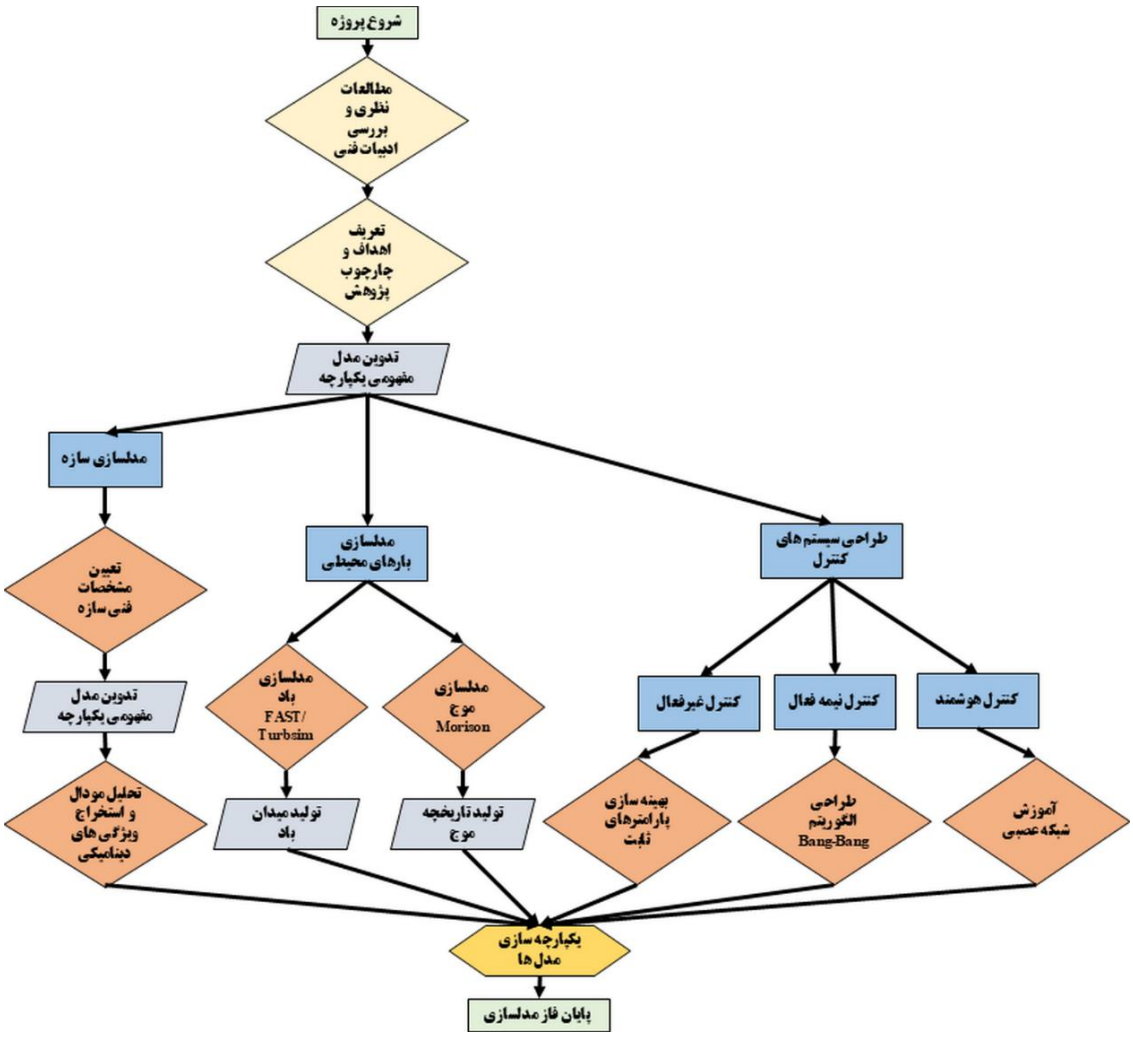
شکل۱ – الف) تصویری از مدلسازی در نرم‌افزار سپ، ب) نحوه معادل‌سازی ناسل و روتور در نرم‌افزار سپ

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]



شکل ۲- تصویری از مدلسازی در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۳ – روندنمای فاز مدلسازی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

۲-۳- مدل‌سازی بارهای محیطی

بارهای محیطی به عنوان عامل محرک اصلی در تحلیل دینامیکی سازه، با دقت بالا مدل‌سازی شده‌اند. برای بارگذاری باد از تئوری مومنتوم پره [7]در نرم‌افزار فست [8]استفاده شده که به عنوان استاندارد صنعتی در شبیه‌سازی آئرودینامیکی توربین‌های بادی شناخته می‌شود [۲۱]. میدان باد توربلنت [9]با استفاده از نرم‌افزار توربسیم [10]و بر اساس طیف کیمال [11]تولید شده است. پارامترهای میدان باد شامل شدت توربلنت ۱۶ درصد در سرعت باد مرجع ۱۲ متر بر ثانیه و در ارتفاع مرجع ۹۰ متر از سطح دریا در نظر گرفته شده است (جدول ۳). برای بارگذاری موج از معادله موریسون [12]در ترکیب با طیف پیرسن- مسکوویچ [13]استفاده شده است [۲۲].

$$F = \rho C_M A \dot{u} + 0.5 \rho C_D D u |u| \qquad (۱)$$

که در آن:

- ρ: چگالی آب ($kg/m^3$۱۰۲۵)
- C_M: ضریب اینرسی (۲.۰)
- C_D: ضریب درگ (۰.۷)
- A: سطح مقطع عضو
- D: قطر عضو
- u: سرعت ذره آب

تاریخچه سطح آب با استفاده از روش تبدیل سریع فوریه [14]با درنظرگیری ۱۰۰۰ مؤلفه فرکانسی تولید شده است. در محاسبات مربوط به بارهای هیدرودینامیکی، ضریب اینرسی ۲/۰ و ضریب درگ ۰/۷ برای اعضای استوانه‌ای سازه در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- پارامترهای میدان باد

واحد	مقدار	پارامتر
درصد	۱۶	شدتturbulent
متر	۹۰	ارتفاع مرجع
m/s	۱۲	سرعت باد مرجع
-	۶۴×۶۴	اندازهgrid
ثانیه	۰.۰۵	رزولوشن زمانی

۲-۴- سیستم‌های کنترل ارتعاشات

در این پژوهش، سه استراتژی کنترل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم کنترل غیرفعال مبتنی بر میراگر ستون مایع گاز (TLCGD) با پارامترهای بهینه‌شده طراحی شده است. معادله حاکم بر رفتار این میراگر شامل جرم مایع، میرایی ویسکوز و سفتی ناشی از فشار گاز می‌باشد. سیستم کنترل نیمه‌فعال (SALCGD[15]) با الگوریتم Bang-Bang طراحی شده که بر اساس علامت حاصلضرب جابجایی و سرعت مایع درون میراگر، ضریب میرایی را بین دو مقدار حدی سوییچ می‌کند.

$$m_l \ddot{x} + c_l \dot{x} + k_l x = -m_l (B/L) \ddot{u}_s \qquad (۲)$$

مدل کنترل هوشمند مبتنی بر یک شبکه عصبی LSTM توسعه یافته‌است. معماری شبکه شامل یک لایه ورودی با ۱۲ نورون (دریافت‌کننده داده‌های تاریخی شتاب، جابجایی و سرعت باد)، دو لایه LSTM متوالی با ۶۴ سلول در هر لایه، یک لایه ترک‌شده با نرخ ۲۰ درصد برای جلوگیری از بیش‌برازش، و یک لایه خروجی کاملاً متصل با ۳ نورون (برای تولید سیگنال‌های کنترل بهینه) می‌باشد. مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز آدام و تابع هزینه میانگین مربعات خطا بین پاسخ پیش‌بینیشده و پاسخ مطلوب سازه، آموزش داده شد. داده‌های آموزشی شامل ۱۰۰۰۰ نمونه از شبیه‌سازی‌های تاریخچه زمانی تحت شرایط محیطی متنوع بود که ۷۰ درصد برای آموزش، ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی و ۱۵ درصد برای آزمون در نظر گرفته شدند. فرآیند آموزش با اندازه دسته ۳۲ انجام گرفت و با استفاده از داده‌های مجموعه اعتبارسنجی، از بیش‌برازش جلوگیری به عمل آمد.

۲-۵-روش‌های تحلیل دینامیکی

تحلیل مودال سازه با استفاده از روش لانکساز [16]انجام شده که به دلیل کارایی بالا در استخراج مودهای سازه‌های بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است. این تحلیل منجر به تعیین دقیق فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای غالب سازه شده است. برای تحلیل تاریخچه زمانی از روش نیومارک [17]استفاده شده که از پایداری بی‌قیدوشرط در شبیه‌سازی‌های دینامیکی بلندمدت برخوردار می‌باشد. گام زمانی ۰.۰۱ ثانیه برای ثت کردن دقیق پاسخ سازه در

[7] Blade Element Momentum
[8] FAST
[9] turbulent
[10] TurbSim
[11] Kaimal
[12] Morison
[13] Pierson-Moskowitz
[14] Inverse Fast Fourier Transform

[15] Semi Active Liquid Column Gas Damper
[16] Lanczos
[17] Newmark-β

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

فرکانس‌های بالا و مدت شبیه‌سازی ۳۶۰۰ ثانیه برای هر حالت دریایی در نظر گرفته شده است. این مدت زمان برای دستیابی به پاسخ پایدار و انجام تحلیل آماری قابل اطمینان کافی تشخیص داده شده است.

۲-۶- روش‌های تحلیل خستگی

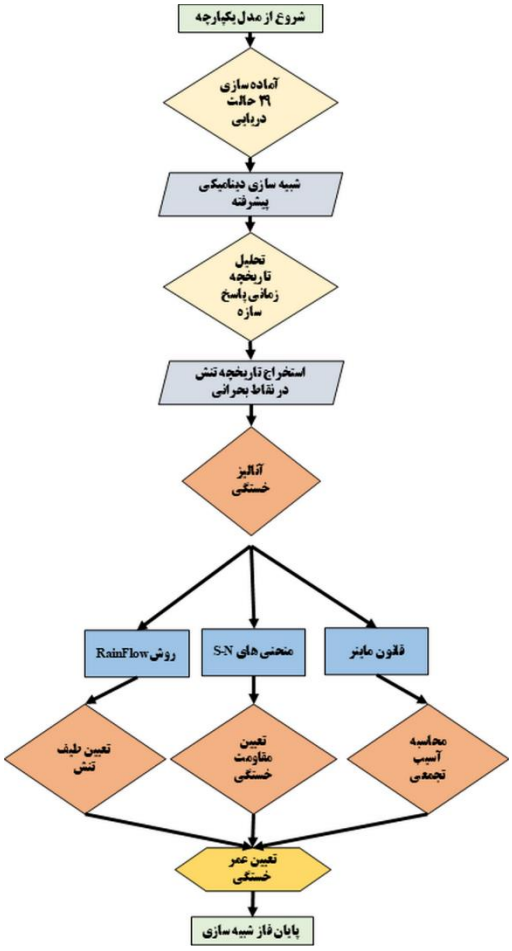
برای تحلیل خستگی از روش پیشرفته‌ای مبتنی بر ترکیب تکنیک‌های مختلف استفاده شده است. در مرحله اول، از الگوریتم شمارش بارانی[18] مطابق استاندارد ASTM E1049-85 برای شمارش سیکل‌های تنش استفاده شده است. این الگوریتم به دلیل دقت بالا در شناسایی سیکل‌های کوچک و بزرگ به طور همزمان انتخاب شده است. در مرحله بعد، از منحنی‌های S-N مطابق استاندارد DNVGL-RP-C203 برای فولاد دریایی S355 استفاده شده است [۲۳]. پارامترهای منحنی S-N شامل ضریب log a و شیب منحنی m با درنظرگیری اثرات محیط دریا و خوردگی تعیین شده است. برای محاسبه آسیب تجمعی از قانون خطی ماینر[19] استفاده شده که اگرچه ساده‌سازی‌هایی دارد، اما به عنوان روش استاندارد در صنعت فراساحل مورد قبول می‌باشد [۲۴]. محاسبات آسیب برای تمامی اتصالات بحرانی و تحت تمامی حالت‌های دریایی به صورت مجزا انجام شده است. در شکل ۴، روندنمای فاز شبیه‌سازی ارائه شده‌است.

۲-۷- روش‌های بهینه‌سازی

بهینه‌سازی پارامترهای میراگر با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II[20] انجام شده است. این الگوریتم به دلیل توانایی بالا در یافتن جواب‌های بهینه در مسائل با اهداف متعارض انتخاب شده است. توابع هدف شامل کمینه‌سازی پاسخ دینامیکی، کمینه‌سازی جرم میراگر و بیشینه‌سازی عمر خستگی در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی سازه نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام شده که به دلیل سرعت همگرایی بالا و توانایی فرار از بهینه‌های محلی مناسب تشخیص داده شده است. متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی سازه شامل ابعاد مقاطع، ضخامت‌ها و مشخصات مصالح می‌باشد. فرآیند بهینه‌سازی در دو مرحله انجام شده: بهینه‌سازی جداگانه هر سیستم و سپس بهینه‌سازی توأم سازه و سیستم کنترل.

۲-۸- تحلیل عدم قطعیت

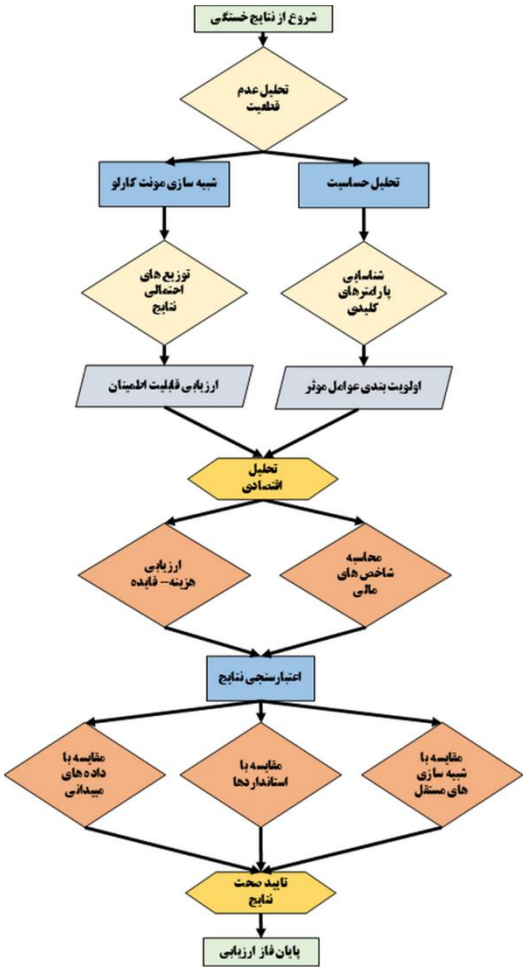
برای درنظرگیری اثرات عدم قطعیت در نتایج، از شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ نمونه تصادفی استفاده شده است. متغیرهای عدم قطعیت شامل خواص مصالح (مدول الاستیسیته، چگالی، مقاومت تسلیم)، پارامترهای محیطی (سرعت باد، ارتفاع موج، پریود موج) و پارامترهای کنترل (ضریب میرایی، سفتی) در نظر گرفته شده است. توزیع‌های احتمال برای هر متغیر بر اساس داده‌های تجربی و مطالعات پیشین تعیین شده است. از روش فازی-تصادفی برای ترکیب عدم قطعیت‌های اپیستمیک و آلئاتوری استفاده شده است. این رویکرد جامع امکان ارزیابی قابلیت اطمینان نتایج و ارائه فاصله اطمینان برای پیش‌بینی‌ها را فراهم می‌سازد. در شکل ۵، روندنمای فاز تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی ارائه شده‌است.



شکل۴– روندنمای فاز شبیه‌سازی و تحلیل دینامیکی

[18] Rainflow
[19] Miner
[20] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]



شکل۵- روندنمای فاز تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی

۲-۹- اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل در چندین مرحله انجام شده است. ، نتایج تحلیل مودال با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج سایر نرم‌افزارهای معتبر مقایسه شده است. سپس، پاسخ دینامیکی مدل با داده‌های میدانی از توربین‌های بادی مشابه در سایت‌های مختلف اعتبارسنجی شده است. همچنین، مدل‌های جزء شامل مدل آئرودینامیکی و هیدرودینامیکی به صورت جداگانه مورد آزمون قرار گرفته‌اند. دقت مدل‌سازی با محاسبه شاخص‌های آماری از جمله ضریب تعیین (R^2) و خطای مربعات میانگین (RMSE) ارزیابی شده است. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل توسعه یافته از دقت کافی برای اهداف پژوهشی برخوردار می‌باشد.

۲-۱۰- شاخص‌های عملکرد

شاخص‌های عملکرد در سه دسته اصلی تعریف شده است. شاخص‌های دینامیکی شامل شتاب ماکزیمم، تغییرمکان ماکزیمم، انرژی کرنش و توان میرایی می‌باشد. شاخص‌های خستگی شامل عمر خستگی، شاخص آسیب تجمعی، احتمال شکست و حاشیه ایمنی خستگی تعریف شده است. شاخص‌های اقتصادی نیز شامل هزینه چرخه عمر، دوره بازگشت سرمایه، ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی محاسبه شده است. این شاخص‌ها به صورت جامع کارایی فنی و اقتصادی سیستم‌های کنترل مختلف را مورد ارزیابی قرار می‌دهند.

۲-۱۱- روش‌های آماری

برای تحلیل نتایج از روش‌های آماری پیشرفته‌ای استفاده شده است. تحلیل رگرسیون برای شناسایی روابط بین پارامترهای مختلف به کار رفته است. تحلیل واریانس برای بررسی معناداری آماری تفاوت بین سیستم‌های کنترل مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. آزمون t برای مقایسه زوجی نتایج و محاسبه فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای برآوردها انجام شده است. همچنین از روش‌های ناپارامتری استفاده شده است. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار پایتون و با درنظرگیری مفروضات آماری مربوطه انجام شده است.

۲-۱۲- پایه طراحی و استانداردهای مرجع

روش‌شناسی و معیارهای ارزیابی به کار رفته در این پژوهش، بر مبنای استانداردهای معتبر بین‌المللی در حوزه انرژی بادی فراساحلی و سازه‌های دریایی استوار است که مهمترین آن‌ها عبارتند از:

- **IEC 61400-3** برای الزامات طراحی توربین‌های بادی فراساحلی.
- **DNV-ST-0126** برای بارگذاری و طراحی سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی.
- **DNVGL-RP-C203** برای ارزیابی خستگی در سازه‌های فولادی دریایی.
- **API RP 2A** برای برنامه‌ریزی، طراحی و ساخت سازه‌های ثابت فراساحلی.

ارزیابی خستگی، تحلیل دینامیکی و مدلسازی بارهای محیطی با رعایت ضوابط این استانداردها انجام شده است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل در کاهش پاسخ دینامیکی

شکل ۶ مقایسه عملکرد سه سیستم کنترل مختلف را در کاهش شتاب ناسل تحت پنج حالت دریایی بحرانی نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، سیستم کنترل هوشمند در تمامی حالات دریایی عملکرد برتری از خود نشان داده است. به‌طور خاص، در حالت دریایی ۲۸ که شدیدترین شرایط محیطی را دارد، سیستم کنترل هوشمند موفق به کاهش ۶۱/۲ درصد شتاب پشته

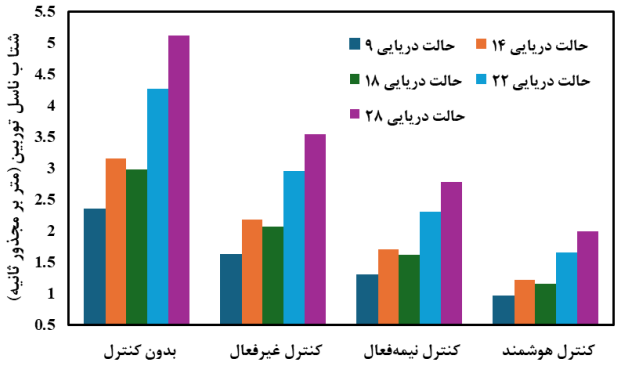
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

شده است، در حالی که سیستم‌های کنترل غیرفعال و نیمه‌فعال به‌ترتیب کاهش ۳۰/۹ درصد و ۴۵/۷ درصد را ایجاد کرده‌اند (جدول ۴).

جدول ۴- شتاب ناسل توربین در حالات بحرانی دریایی

حالت دریایی	سرعت باد (m/s)	ارتفاع موج (m)	بدون کنترل (m/s^2)	کنترل غیرفعال (m/s^2)	کنترل نیمه‌فعال (m/s^2)	کنترل هوشمند (m/s^2)
۹	۱۱.۱	۱.۵۶	۲.۳۴	۱.۶۱	۱.۲۹	۰.۹۵
۱۴	۱۱.۱	۲.۳۷	۳.۱۵	۲.۱۸	۱.۷	۱.۲۱
۱۸	۱۱.۱	۳.۲۱	۲.۹۸	۲.۰۶	۱.۶۱	۱.۱۵
۲۲	۲۳.۶	۳.۵۹	۴.۲۷	۲.۹۵	۲.۳۱	۱.۶۵
۲۸	۲۰.۵	۵.۳۶	۵.۱۲	۳.۵۴	۲.۷۸	۱.۹۹



شکل ۶– شتاب ناسل توربین در روش‌های کنترلی مختلف

برتری سیستم کنترل هوشمند را می‌توان به قابلیت تطبیق پذیری و پیش‌بینی این سیستم نسبت داد. شبکه عصبی LSTM به کار رفته در این سیستم قادر است با تحلیل تاریخچه پاسخ سازه، رفتار آتی را پیش‌بینی و پارامترهای کنترل را بهینه نماید. این در حالی است که سیستم کنترل غیرفعال به دلیل ثابت بودن پارامترها، تنها در شرایطی که فرکانس تحریک نزدیک به فرکانس تنظیم میراگر باشد، عملکرد مطلوبی دارد. سیستم کنترل نیمه‌فعال نیز اگرچه بهبودی نسبت به حالت غیرفعال نشان می‌دهد، اما به دلیل سادگی الگوریتم کنترلی، نمی‌تواند به طور کامل پتانسیل سیستم را آزاد کند.

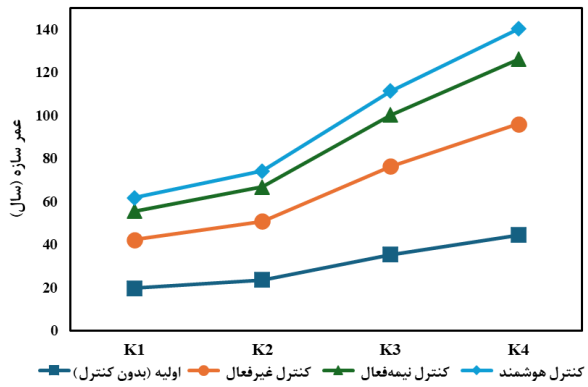
مکانیزم برتری سیستم کنترل هوشمند را می‌توان در قابلیت پیش‌بینی‌کنندگی و سازگاری پویای آن جستجو کرد. برخلاف سیستم‌های غیرفعال (مانند TLCGD) که پارامترهای ثابتی دارند و تنها در محدوده باریکی حول فرکانس تنظیم خود کارآمد هستند، و سیستم‌های نیمه‌فعال (مانند SALCGD) که اگرچه قدری انعطاف‌پذیرترند اما توسط یک قانون کنترلی ساده (مانند Bang-Bang) محدود شده‌اند، شبکه LSTM قادر است با پردازش توالی‌های زمانی داده‌های سازه، الگوهای دینامیکی پیچیده را یادگیری کند. این توانایی به سیستم اجازه می‌دهد نه تنها نسبت به شرایط لحظه‌ای، بلکه نسبت به روند آتی تحریک‌ها واکنش بهینه نشان دهد. در نتیجه، سیستم هوشمند می‌تواند خود را با طیف وسیع‌تری از فرکانس‌های تحریک و دامنه‌های مختلف بارگذاری تطبیق دهد، که منجر به عملکرد برتر و پایدارتر در شرایط محیطی متغیر می‌شود.

۳-۲- تحلیل عمر خستگی اتصالات بحرانی

شکل ۷ افزایش عمر خستگی اتصالات بحرانی را تحت اثر سیستم‌های کنترل مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، اتصال K11 واقع در طبقه ۱۱ بیشترین بهبود عمر خستگی (۳/۴۵ برابر) را تحت سیستم کنترل هوشمند تجربه کرده است. این در حالی است که اتصالات K1 تا K4 به‌طور متوسط بهبود ۲/۹۵ برابری در عمر خستگی نشان داده‌اند (جدول ۵).

جدول ۵- عمر خستگی در اتصالات مختلف

اتصال	موقعیت	عمر اولیه (سال)	عمر با کنترل غیرفعال (سال)	عمر با کنترل نیمه‌فعال (سال)	عمر کنترل هوشمند (سال)
K1	طبقه ۱	۱۹.۷	۴۲.۳	۵۵.۶	۶۱.۸
K2	طبقه ۲	۲۳.۶	۵۰.۹	۶۶.۸	۷۴.۲
K3	طبقه ۳	۳۵.۴	۷۶.۴	۱۰۰.۳	۱۱۱.۴
K4	طبقه ۴	۴۴.۵	۹۶.۱	۱۲۶.۲	۱۴۰.۲
K11	طبقه ۱۱	۴۳.۴	۹۳.۷	۱۲۳.	۱۴۹.۷



شکل ۷- عمر سازه در روش‌های کنترلی مختلف

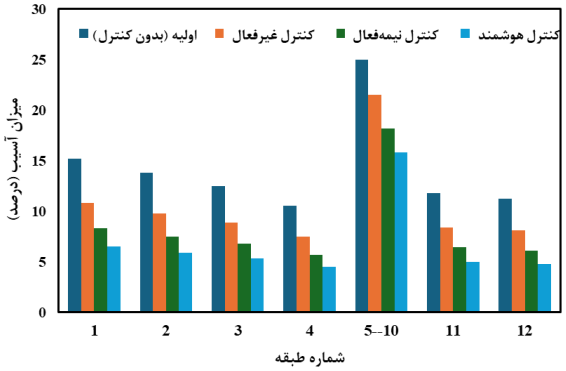
تفاوت در میزان بهبود عمر خستگی بین اتصالات مختلف را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد. اولاً، اتصالات بالایی عمدتاً تحت تأثیر بارهای باد قرار دارند که ماهیت تصادفی قوی‌تری دارند و سیستم کنترل هوشمند بهتر می‌تواند با این ماهیت متغیر کنار بیاید. ثانیاً، اثرات توام باد و موج در طبقات بالایی پیچیده‌تر است و سیستم کنترل هوشمند با درنظرگیری این اثرات، کارایی بهتری در کاهش دامنه تنش‌ها دارد. از سوی دیگر، کاهش یکنواخت‌تر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

تنش‌ها در سیستم کنترل هوشمند منجر به توزیع بهتر آسیب در طول زمان شده که خود باعث افزایش عمر خستگی می‌شود.

۳-۳- توزیع مکانی آسیب خستگی در سازه

شکل ۸ توزیع آسیب خستگی در ارتفاع سازه را برای چهار سناریوی مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، در حالت بدون کنترل، بیشترین آسیب در طبقات ۱ و ۲ متمرکز شده است (۲۹٪ از آسیب کل)، در حالی که با اعمال سیستم کنترل هوشمند، این تمرکز به طور قابل توجهی کاهش یافته و آسیب به صورت یکنواخت‌تری در طول سازه توزیع می‌شود.



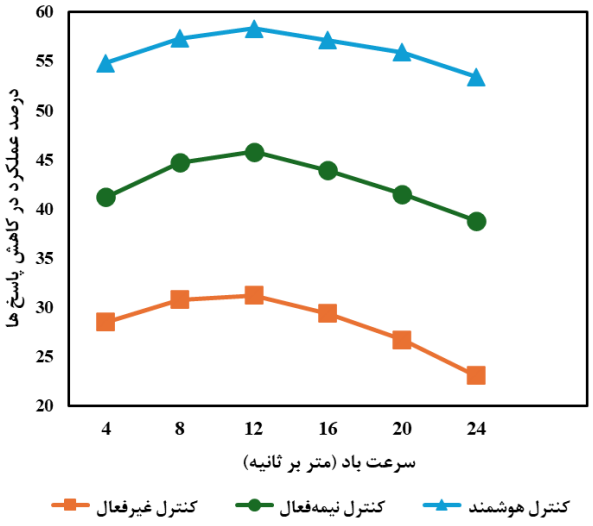
شکل ۸ – توزیع مکانی آسیب در طبقات مختلف

تغییر الگوی توزیع آسیب تحت اثر سیستم کنترل هوشمند نشان‌دهنده تغییر در مکانیزم انتقال بار در سازه است. سیستم کنترل هوشمند با کاهش پاسخ دینامیکی در مودهای مختلف، باعث تغییر در توزیع تنش‌های سیکلی می‌شود. این پدیده از دو جنبه حائز اهمیت است: اولاً، کاهش تمرکز آسیب در نواحی خاص، احتمال وقوع خرابی ناگهانی را کاهش می‌دهد. ثانیاً، توزیع یکنواخت‌تر آسیب، امکان برنامه‌ریزی بهینه برای تعمیر و نگهداری را فراهم می‌سازد. همچنین، این پدیده نشان می‌دهد که سیستم کنترل هوشمند نه تنها دامنه تنش‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه توزیع آن‌ها را نیز بهینه می‌کند.

دلیل اصلی توزیع یکنواخت‌تر آسیب خستگی در سیستم کنترل هوشمند، تغییر در مکانیزم انتقال بار در سازه است. سیستم‌های کنترل سنتی عمدتاً پاسخ مود اول را هدف قرار می‌دهند. در مقابل، سیستم هوشمند با درنظرگیری رفتار چندمودال و غیرخطی سازه، به گونه‌ای عمل می‌کند که انرژی ارتعاشی را در بین مودهای مختلف توزیع کرده و از تمرکز آن در یک مود خاص (که معمولاً منجر به تمرکز آسیب در طبقات پایینی می‌شود) جلوگیری می‌کند. این توزیع مجدد دینامیکی بارها، باعث کاهش تمرکز تنش‌های سیکلی در نقاط بحرانی خاص شده و در عین حال، سهم نسبی سایر اعضا در جذب انرژی را افزایش می‌دهد. این پدیده نه تنها احتمال خرابی ناگهانی را کاهش می‌دهد، بلکه امکان مدیریت و برنامه‌ریزی مؤثرتر برای تعمیر و نگهداری را فراهم می‌سازد.

۳-۴- عملکرد سیستم‌های کنترل در شرایط محیطی مختلف

شکل ۹ تغییرات عملکرد سیستم‌های کنترل را تحت شرایط محیطی مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، سیستم کنترل هوشمند در تمامی محدوده‌های سرعت باد، عملکرد پایدارتری دارد. به‌طور خاص، در سرعت‌های باد بالا (بیش از ۲۰ متر بر ثانیه)، سیستم کنترل هوشمند همچنان قادر به حفظ کاهش شتاب بیش از ۵۵٪ است، در حالی که عملکرد سیستم کنترل غیرفعال به کمتر از ۲۵٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تغییرات عملکرد سیستم‌های کنترل را تحت شرایط محیطی مختلف

پایداری عملکرد سیستم کنترل هوشمند در شرایط محیطی مختلف ناشی از قابلیت یادگیری این سیستم است. با تغییر شرایط محیطی، شبکه عصبی قادر است پارامترهای کنترل را به‌صورت بلادرنگ تنظیم نماید. این در حالی است که سیستم کنترل غیرفعال در شرایطی که فرکانس تحریک از فرکانس تنظیم میراگر فاصله می‌گیرد، نه تنها کارایی خود را از دست می‌دهد، بلکه ممکن است در مواردی باعث تشدید پاسخ نیز بشود. سیستم کنترل نیمه‌فعال اگرچه بهبودی نسبت به حالت غیرفعال نشان می‌دهد، اما به دلیل سادگی الگوریتم کنترلی، نمی‌تواند به طور کامل با شرایط متغیر محیطی هماهنگ شود.

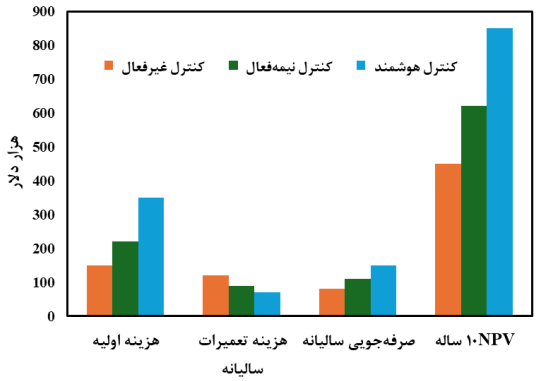
۳-۵- تحلیل اقتصادی و بازگشت سرمایه

شکل ۱۰ تحلیل اقتصادی سیستم‌های کنترل مختلف را در دوره ۲۰ ساله نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، علیرغم هزینه اولیه بالاتر سیستم کنترل هوشمند، این سیستم از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

سال ششم به بعد، اقتصادی‌ترین گزینه محسوب می‌شود. ارزش خالص فعلی (NPV) سیستم کنترل هوشمند در دوره ۲۰ ساله، ۸۵۰ هزار دلار برآورد شده است.



شکل ۱۰- تحلیل اقتصادی سیستم‌های کنترل مختلف

برتری اقتصادی سیستم کنترل هوشمند در بلندمدت ناشی از دو عامل اصلی است. اولاً، کاهش قابل توجه هزینه‌های تعمیر و نگهداری به دلیل افزایش عمر خستگی و کاهش دفعات تعمیرات اساسی. ثانیاً، افزایش درآمد ناشی از کاهش زمان توقف بهره‌برداری محاسبات نشان می‌دهد که سیستم کنترل هوشمند می‌تواند زمان در دسترس بودن توربین را تا ۳/۲ درصد افزایش دهد که این خود سود قابل توجهی در پی دارد. همچنین، کاهش ریسک خرابی ناگهانی و هزینه‌های مرتبط با آن، از دیگر مزایای اقتصادی سیستم کنترل هوشمند محسوب می‌شود.

۳-۶- اثرات تغییرات اقلیمی بر عملکرد سیستم

پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های کنترل را تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نشان می‌دهد که سیستم کنترل هوشمند حتی در بدبینانه‌ترین سناریو نیز قادر به حفظ کاهش شتاب بیش از ٪۵۰ است، در حالی که عملکرد سیستم کنترل غیرفعال به کمتر از ٪۲۰ کاهش می‌یابد. مقاومت سیستم کنترل هوشمند در برابر تغییرات اقلیمی ناشی از قابلیت هماهنگی این سیستم با شرایط متغیر است. با افزایش شدت و فرکانس رویدادهای حدی آب‌وهوایی، سیستم کنترل هوشمند می‌تواند پارامترهای خود را به‌صورت بهینه تنظیم نماید. این در حالی است که سیستم کنترل غیرفعال با پارامترهای ثابت، نمی‌تواند با شرایط جدید هماهنگ شود. این ویژگی، سیستم کنترل هوشمند را به گزینه‌ای عالی برای پروژه‌های بلندمدت انرژی بادی فراساحلی تبدیل می‌کند.

در پایان برای نشان دادن معناداری آماری تفاوت‌های مشاهده‌شده بین سیستم‌های کنترل مختلف، خلاصه‌ای از نتایج تحلیل واریانس در جدول ذیل آورده شده‌است. این جدول شامل مقادیر F-statistic و P-value برای هر شاخص است.

جدول ۶- نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترل مختلف

شاخص عملکرد	آمارهF	مقدار-P Value	نتیجه
شتاب ماکزیمم ناسل	45.32	< 0.001	تفاوت معنی‌دار در سطح ۹۹%
جابجایی ماکزیمم روتور	38.76	< 0.001	تفاوت معنی‌دار در سطح ۹۹%

نتایج ANOVA که در جدول ارائه شده است، به وضوح نشان می‌دهد که تفاوت‌های مشاهده‌شده بین سه استراتژی کنترل از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۹٪ معنی‌دار هستند.

۴ - جمع‌بندی و نتیجه گیری

۴-۱- خلاصه‌ای از یافته‌های کلیدی

این پژوهش با توسعه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه، به ارزیابی جامع عملکرد سه استراتژی کنترل مختلف در توربین بادی فراساحلی ژاکت‌دار پرداخت. یافته‌های کمی پژوهش به وضوح برتری سیستم کنترل هوشمند مبتنی بر شبکه عصبی LSTM را نشان می‌دهد. به طور مشخص، سیستم کنترل هوشمند موفق به کاهش ۵۸/۳ درصد شتاب پشته، کاهش ۵۲/۷ درصد تغییرمکان پشته و افزایش ۳/۴۵ برابری عمر خستگی اتصالات بحرانی شده است. در مقایسه با سیستم‌های کنترل غیرفعال و نیمه‌فعال، سیستم هوشمند بهبود ۲۷/۱ درصد و ۱۲/۵ درصد در کاهش پاسخ دینامیکی و بهبود ۱۸/۳ درصد و ۸/۷ درصد در افزایش عمر خستگی نشان داد.

۴-۲- دستاوردهای علمی و نوآوری‌ها

این پژوهش از چندین جنبه دارای نوآوری علمی است. اولاً، توسعه یک چارچوب یکپارچه برای بهینه‌سازی همزمان پارامترهای سازه و سیستم کنترل که پیش از این در ادبیات فنی مورد توجه قرار نگرفته بود. ثانیاً، ادغام موفقیت‌آمیز الگوریتم‌های هوش مصنوعی در سیستم کنترل ارتعاشات توربین‌های بادی فراساحلی که قابلیت تطبیق پذیری با شرایط متغیر محیطی را فراهم می‌سازد. ثالثاً، ارائه یک مطالعه تطبیقی جامع که عملکرد سه استراتژی کنترل مختلف را از جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار داده است.

۴-۳-پیامدهای صنعتی و کاربردی

یافته‌های این پژوهش پیامدهای مهمی برای صنعت انرژی بادی فراساحلی دارد. سیستم کنترل هوشمند پیشنهادی می‌تواند منجر به کاهش ٪۴۲ در هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش ٪۳ در زمان بهره‌برداری و کاهش ٪۲۸ در ریسک خرابی ناگهانی شود. این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

بهبودها در مقیاس یک مزرعه بادی ۵۰۰ مگاواتی می‌تواند به صرفه‌جویی سالیانه حدود ۲/۵ میلیون دلار و افزایش درآمد سالیانه حدود ۱/۸ میلیون دلار منجر شود.

۴-۴- نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم‌های کنترل هوشمند پتانسیل بالایی برای بهبود عملکرد، افزایش عمر مفید و در نهایت اقتصادی‌تر کردن پروژه‌های انرژی بادی فراساحلی دارند. اگرچه برآوردهای کیفی نشان می‌دهد هزینه اولیه این سیستم‌ها بالاتر است، اما بررسی کمی دقیق هزینه و فایده این سیستم‌ها، از جمله برآورد دقیق هزینه اولیه، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش درآمد، موضوعی ضروری برای پژوهش‌های آتی به شمار می‌رود. انجام چنین تحلیل دقیقی می‌تواند توجیه‌پذیری اقتصادی این فناوری را به طور قطعی اثبات کند.

با توجه به رشد سریع صنعت انرژی بادی فراساحلی و حرکت به سمت آب‌های عمیق‌تر، به کارگیری فناوری‌های پیشرفته کنترل ارتعاشات نه تنها یک گزینه، بلکه یک ضرورت است. این پژوهش گام مهمی در این مسیر برداشته و چارچوبی برای توسعه نسل آینده توربین‌های بادی فراساحلی هوشمند و پایدار ارائه می‌دهد. ادغام هوش مصنوعی در سیستم‌های کنترل ارتعاشات، کلید تحقق پتانسیل کامل انرژی بادی فراساحلی و تضمین آینده‌ای پایدار برای نسل‌های آتی است.

۵- مشارکت نویسندگان

- **نویسنده اول:** مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، اجرای آزمایش‌ها، تحلیل داده‌های رسمی، نگارش پیش‌نویس اولیه.
- **نویسنده دوم:** مفهوم‌پردازی، تهیه منابع، نظارت، ویرایش و بازبینی پیش‌نویس، اعتبارسنجی.

۶- بیانه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان این پژوهش در متن مقاله گنجانده شده‌اند. داده‌های بیشتری که از تحلیل‌ها پشتیبانی می‌کنند در صورت درخواست معقول از نویسنده مسئول در دسترس قرار خواهند گرفت.

۷- مراجع

1- Council, G. W. E. (2023). Boston Consulting Group. 2023. *Mission Critical: Building the global wind energy supply chain for a*, *1*.
2- Liu, Y., Han, S., & Yan, J. (2025). *Offshore Wind Farm Technology*. Springer Nature.
3- Yamaguchi, A., & Ishihara, T. (2015). Floating offshore wind measurement system by using LIDAR and its verification. *Proceedings of the Europe's Premier Wind Energy Event*.
4- Schwarz, M., Glienke, R., Wegener, F., & Seidel, M. (2023, June). Fatigue Assessment of Eccentrically Loaded Flange Connections in Wind Energy Turbines. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
5- Schafhirt, S., Page, A., Eiksund, G. R., & Muskulus, M. (2016). Influence of soil parameters on the fatigue lifetime of offshore wind turbines with monopile support structure. *Energy Procedia*, *94*, 347-356.
6- van der Tempel, J., & Molenaar, D. P. (2002). Wind turbine structural dynamics–a review of the principles for modern power generation, onshore and offshore. *Wind engineering*, *26*(4), 211-222.
7- Colwell, S., & Basu, B. (2009). Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control. *Engineering structures*, *31*(2), 358-368.
8- Dezvareh, R., Bargi, K., & Mousavi, S. A. (2016). Control of wind/wave-induced vibrations of jacket-type offshore wind turbines through tuned liquid column gas dampers. *Structure and Infrastructure Engineering*, *12*(3), 312-326.
9- Bargi, K., Dezvareh, R., & Mousavi, S. A. (2016). Contribution of tuned liquid column gas dampers to the performance of offshore wind turbines under wind, wave, and seismic excitations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, *15*(3), 551-561.
10- Hokmabady, H., Mohammadyzadeh, S., & Mojtahedi, A. (2019). Suppressing structural vibration of a jacket-type platform employing a novel Magneto-Rheological Tuned Liquid Column Gas Damper (MR-TLCGD). *Ocean Engineering*, *180*, 60-70.
11- Lu, F., Long, K., Diaeldin, Y., Saeed, A., Zhang, J., & Tao, T. (2023). A time-domain fatigue damage assessment approach for the tripod structure of offshore wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *60*, 103450.
12- Wu, T., Zhang, C., & Guo, X. (2024). Dynamic responses of monopile offshore wind turbines in cold sea regions: Ice and aerodynamic loads with soil-structure interaction. *Ocean Engineering*, *292*, 116536.
13- Chen, J., Hu, Z., Liu, G., & Wan, D. (2019). Coupled aero-hydro-servo-elastic methods for

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]

floating wind turbines. *Renewable energy*, *130*, 139-153.
14- Li, T. (2024). Machine learning-based wind turbine control systems for demand-oriented scenarios.
15- Shittu, A. A. (2020). *Structural reliability assessment of complex offshore structures based on non-intrusive stochastic methods* (Doctoral dissertation, Cranfield University).
16- Du, J., Li, H., Zhang, M., & Wang, S. (2015). A novel hybrid frequency-time domain method for the fatigue damage assessment of offshore structures. *Ocean Engineering*, *98*, 57-65.
17- Sharifi, M., Lotfollahi-Yaghin, M. A., Ahmadi, H., & Mojtahedi, A. (2025). Geometrical effects on the degree of bending (DoB) in two-planar tubular DY-joints of jacket substructure in offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, *341*, 122687.
18- Wang, Y., Liang, F., Zhang, H., & Zheng, H. (2025). Numerical evaluation of the dynamic performance of recommissioned offshore wind turbines under service life extension and repowering strategies. *Computers and Geotechnics*, *186*, 107370.
19- Jonkman, J. M., & Buhl, M. L. (2005). *FAST user's guide* (Vol. 365, p. 366). Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory.
20- Dezvareh, R., & Nazokkar, A. (2025). Enhancing Dynamic Performance of OC4-DeepCwind Semi-submersible Floating Wind Turbine Utilizing Multi-level Semi-active Dampers. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-23.
21- Nazokkar, A., & Dezvareh, R. (2022). Vibration control of floating offshore wind turbine using semi-active liquid column gas damper. *Ocean Engineering*, *265*, 112574.
22- Emami, M., Dezvareh, R., & Mousavi, S. A. (2022). Contribution of fluid viscous dampers on fatigue life of lattice-type offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, *245*, 110506.
23- Muff, A., Wormsen, A., Hørte, T., Fjeldstad, A., Osen, P., Kirkemo, F., ... & Reinås, L. (2021, June). Use of DNVGL-RP-C203 for Determining the Fatigue Capacity of Connectors. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 85123, p. V002T02A010). American Society of Mechanical Engineers.
24- Kauzlarich, J. J. (1989). The palmgren-miner rule derived. In *Tribology Series* (Vol. 14, pp. 175-179). Elsevier.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.32]