J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 50, 2026. (46-58)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Parametric assessment of offshore wind turbine jacket geometry and bracing using nonlinear pushover analysis

Farzin Farzadidokht[1*], Mohammad Reza Tabeshpou[2]

[1] *Master graduated, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran; farzinfarzadi76@gmail.com*

[2] *Faculty member, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran; tabeshpour@sharif.edu*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 2 Aug 2026
Last modification: 5 Nov 2026
Accepted: 7 Nov 2026
Available online: 8 Nov 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Jacket
Offshore wind turbine
Parametric assessment
Offshore renewable energy
Nonlinear static analysis

ABSTRACT

Jacket foundations for offshore wind turbines are typically designed according to standards for oil rig jackets, which makes them relatively conservative. Therefore, optimizing these structures to reduce costs and material usage is logical. Moreover, more important than saving material is identifying an appropriate geometry and optimal arrangement of members to ensure improved performance under applied loads. This paper addresses the parametric assessment of the geometry of a jacket foundation for an offshore wind turbine, considering wave and current forces. The objective function is defined as the simultaneous improvement of structural stiffness and redundancy while maintaining constant weight. The design variables include the slope of the jacket's base and the arrangement of braces. The design criteria are established according to relevant standards. Finally, using Abaqus software and nonlinear static analysis, various parameters—including strength, ductility, normalized energy, redundancy coefficients, and normalized redundancy degrees—are investigated, and 24 design models with equal weight are compared. The results indicate that an increased jacket slope enhances strength, ductility, normalized energy, and redundancy. Additionally, the most effective brace arrangements are identified based on the aforementioned criteria.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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 2026-11-08]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۵۰، ۱۴۰۵، (۵۸-۴۶)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

ارزیابی پارامتریک هندسه و مهاربندی جکت پایه توربین بادی فراساحلی با استفاده از تحلیل غیرخطی پوش-اور

فرزین فرزادی‌دخت[1*]، محمدرضا تابش‌پور[2]

[1] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، farzinfarzadi76@gmail.com

[2] هیئت علمی دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، tabeshpour@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۱۶

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۱۷

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

جکت

توربین بادی فراساحلی

ارزیابی پارامتریک

انرژی تجدیدپذیر فراساحلی

تحلیل استاتیکی غیرخطی

چکیده

جکت‌های پایه توربین بادی فراساحلی بر مبنای آیین‌نامه‌های سکوهای نفتی طراحی می‌شوند، در نتیجه تا حدی محافظه‌کارانه هستند. بنابراین، بهینه‌سازی این سازه‌ها برای کاهش هزینه‌ها و مصالح منطقی می‌باشد. علاوه بر این، مهم‌تر از صرفه‌جویی در مصالح، یافتن هندسه مناسب و چیدمان بهینه اعضا به منظور عملکرد بهتر تحت بارهای وارده است. در این مقاله، به ارزیابی پارامتریک هندسه یک جکت پایه توربین بادی فراساحلی با در نظر گرفتن نیروهای موج و جریان پرداخته شده است. تابع هدف، بهبود هم‌زمان سختی و درجه افزونگی سازه با حفظ وزن ثابت است و متغیرهای طراحی شامل شیب پایه‌های جکت و چیدمان مهاربندها می‌باشند. معیارهای طراحی نیز بر اساس آیین‌نامه‌ها تعریف شده‌اند. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و تحلیل استاتیکی غیرخطی، و با بررسی پارامترهای مختلفی از جمله مقاومت، شکل‌پذیری، انرژی نرمالیزه، ضرایب درجه افزونگی و درجه افزونگی نرمالیزه، به مقایسه ۲۴ مدل طراحی‌شده با معیار وزن یکسان پرداخته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که افزایش شیب جکت باعث افزایش مقاومت، شکل‌پذیری، انرژی نرمالیزه و درجه افزونگی می‌شود. همچنین، از میان چیدمان‌های مختلف مهاربندی، بهترین چیدمان‌ها بر اساس معیارهای ذکرشده شناسایی شده‌اند.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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 2026-11-08]

۱ - مقدمه

با تشدید پدیده گرمایش جهانی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و محدودیت منابع انرژی فسیلی، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر به یکی از اولویت‌های اصلی صنعت انرژی در جهان تبدیل شده است. در این میان، انرژی باد به دلیل پاک بودن، دسترسی گسترده و قابلیت توسعه در مقیاس بزرگ، سهم قابل توجهی در تولید برق ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، به دلیل سرعت بیشتر و پایداری جریان باد در مناطق دریایی، کاهش محدودیت‌های ناشی از آلودگی صوتی و بصری و همچنین امکان نصب توربین‌های با ظرفیت بالا، توجه صنعت انرژی به سمت توسعه نیروگاه‌های بادی فراساحلی معطوف شده است. با افزایش ظرفیت نامی توربین‌ها و حرکت به سمت نصب آن‌ها در اعماق بیشتر، طراحی زیرسازه‌های نگهدارنده به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مهندسی تبدیل شده است.

زیرسازه‌های توربین بادی فراساحلی شامل انواع مختلفی نظیر سازه‌های ثقلی، مونوپایل، سه‌پایه، جکت، اسپار، پایه کششی و سکوهای نیمه‌شناور هستند. انتخاب نوع زیرسازه تابعی از عمق آب، شرایط محیطی، ظرفیت توربین و ملاحظات اقتصادی است. بر اساس گزارش آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم استفاده از سازه‌های جکت به طور پیوسته در حال افزایش است [۱]. این سازه‌ها به دلیل نسبت مناسب سختی به وزن، مقاومت مطلوب در برابر بارهای ترکیبی باد، موج و جریان و همچنین سهولت ساخت و نصب، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای آب‌های با عمق متوسط و زیاد محسوب می‌شوند. با این وجود، کاهش وزن سازه بدون کاهش ایمنی و قابلیت اطمینان همچنان یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی این نوع زیرسازه‌ها است.

به همین دلیل، طی دو دهه اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه طراحی و بهینه‌سازی جکت‌های فراساحلی انجام شده است که می‌توان آن‌ها را به چهار گروه اصلی شامل بهینه‌سازی ابعادی، بهینه‌سازی توپولوژی، بهینه‌سازی هندسی و توسعه روش‌های عددی و هوشمند تقسیم‌بندی کرد.

مطالعات اولیه عمدتا بر بهینه‌سازی ابعاد اعضا با هدف کاهش وزن و هزینه ساخت متمرکز بودند. ناصری و همکاران با در نظر گرفتن قطر خارجی و ضخامت اعضای لوله‌ای به عنوان متغیرهای طراحی، بهینه‌سازی یک سکوی جکت موجود در خلیج فارس را تحت اثر بارهای محیطی انجام دادند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و در نظر گرفتن محدودیت‌هایی نظیر تنش، کمانش اعضا و تغییرمکان سازه بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی فراساحلی، موفق شدند کاهش قابل توجهی در ابعاد و وزن اعضای مختلف سازه ایجاد کنند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند بدون نقض الزامات طراحی، منجر به کاهش محسوس وزن سازه شود [۲].

در همین راستا، شفرت و همکاران فرآیند طراحی بهینه جکت توربین بادی فراساحلی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسعه دادند. در این پژوهش، به دلیل ماهیت غیرخطی پاسخ سازه و وابستگی آن به تاریخچه زمانی بارگذاری، تحلیل‌های حوزه زمان مبنای ارزیابی عملکرد قرار گرفت. آن‌ها با تلفیق تحلیل مجدد سازه و الگوریتم ژنتیک، زمان محاسبات را به میزان قابل توجهی کاهش داده و نشان دادند که این روش ضمن حفظ دقت، تعداد تحلیل‌های مورد نیاز برای رسیدن به طرح بهینه را کاهش می‌دهد. این پژوهش یکی از نخستین مطالعاتی بود که قابلیت استفاده از روش‌های تکاملی را در طراحی خودکار جکت‌های توربین بادی به اثبات رساند [۳].

با افزایش ظرفیت توربین‌های بادی و پیچیده‌تر شدن شرایط بارگذاری، توجه پژوهشگران به لحاظ نمودن هم‌زمان قیود خستگی، مقاومت نهایی و الزامات دینامیکی در فرآیند بهینه‌سازی معطوف شد. اوست و همکاران یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی گرادیانی برای طراحی جکت توربین بادی پنج مگاواتی NREL ارائه کردند که در آن قطر و ضخامت اعضا به عنوان متغیر طراحی انتخاب شد. در این مطالعه، علاوه بر محدودیت‌های مقاومت نهایی، قید خستگی و محدودیت فرکانس طبیعی نیز در مدل وارد شد. برای محاسبه بارهای هیدرودینامیکی از معادله موریسون و برای بارهای آیرودینامیکی از نرم‌افزار HAWC2 استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از تحلیل خستگی و بارگذاری‌های واقعی حوزه زمان می‌تواند به طراحی‌هایی اقتصادی‌تر و ایمن‌تر منجر شود [۴].

در ادامه، هافل و همکاران با توسعه مدل‌های دقیق‌تر تحلیل و بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته، عملکرد انواع مختلف جکت را از نظر وزن، هزینه و الزامات آیین‌نامه‌ای مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها برای کاهش هزینه محاسباتی از مدل‌های جانشین مبتنی بر رگرسیون فرآیند گوسی استفاده کردند و دو الگوریتم SQP و Interior Point را برای حل مسئله بهینه‌سازی به کار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که نوع آرایش هندسی جکت تاثیر مستقیمی بر عملکرد سازه و هزینه نهایی آن دارد و در شرایط مورد بررسی، جکت سه‌پایه نسبت به جکت چهارپایه عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد [۵].

با توسعه روش‌های بهینه‌سازی سازه، تمرکز پژوهشگران از بهینه‌سازی صرف ابعاد اعضا به سمت بهینه‌سازی توپولوژی و هندسه سازه تغییر یافت. در این رویکرد، علاوه بر تعیین ابعاد مقاطع، آرایش اعضا، موقعیت گره‌ها و مسیر انتقال بار نیز به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. این تغییر نگرش موجب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

شد امکان دستیابی به سازه‌هایی با جرم کمتر، سختی بیشتر و توزیع مناسب‌تر تنش فراهم شود.

در همین راستا، تیان و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی توپولوژی برای طراحی سکوی جکت ارائه کردند. در این پژوهش، کل فضای طراحی به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته شد و بیشینه‌سازی سختی سازه تحت قیود تنش، تغییرمکان و ارتعاشات به عنوان مسئله بهینه‌سازی تعریف گردید. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که سازه بهینه علاوه بر کاهش وزن، عملکرد استاتیکی و دینامیکی مطلوب‌تری نسبت به طرح اولیه دارد و ظرفیت نهایی آن نیز افزایش یافته است. این پژوهش نشان داد که روش‌های توپولوژی می‌توانند مرحله طراحی مفهومی جکت را به طور قابل توجهی بهبود بخشند [۶].

در ادامه، تابش‌پور و فاطمی با رویکردی ساده، تاثیر آرایش مهاربندها را بر رفتار غیرخطی جکت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با ثابت نگه داشتن وزن، سختی یا پریود سازه، پیکربندی‌های مختلف مهاربندی را مقایسه کردند و شاخصی تحت عنوان انرژی نرمالیزه را به عنوان معیاری برای ارزیابی همزمان مقاومت و شکل‌پذیری معرفی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییر هندسه مهاربندها تاثیر بسیار بیشتری نسبت به تغییر ابعاد اعضا بر عملکرد نهایی سازه دارد و انتخاب آرایش مناسب مهاربندها می‌تواند ظرفیت باربری و شکل‌پذیری جکت را به طور همزمان افزایش دهد [۷].

در سال ۲۰۲۱، عسگری‌مطلق و همکاران با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و SACS و الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی جکت‌های فراساحلی را در دو سناریوی مختلف انجام دادند. در سناریوی نخست تنها قیود مقاومت، کمانش، تغییرمکان و کنترل اتصالات لحاظ شد، در حالی که در سناریوی دوم محدودیت‌های مربوط به خرابی خستگی نیز به مدل اضافه گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که در نظر گرفتن اثر خستگی اگرچه موجب افزایش وزن نهایی سازه می‌شود، اما قابلیت اطمینان و عمر بهره‌برداری آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۸].

همزمان با پیشرفت روش‌های هوشمند، استفاده از مدل‌های جانشین[1] نیز در طراحی بهینه جکت گسترش یافت. پراستیانتو و همکاران با استفاده از مدل‌های جانشین و برنامه‌ریزی غیرخطی، بهینه‌سازی یک جکت در آب‌های اندونزی را با هدف کمینه کردن هزینه و وزن سازه انجام دادند. متغیرهای طراحی شامل قطر و ضخامت اعضای اصلی و مهاربندها بود و قیود طراحی مطابق استاندارد API تعریف شد. نتایج پژوهش نشان داد که مدل‌های جانشین می‌توانند ضمن کاهش چشمگیر زمان تحلیل، دقت مناسبی در فرآیند بهینه‌سازی حفظ کنند [۹].

یکی از مهم‌ترین مطالعات سال‌های اخیر توسط تیان و همکاران انجام شد. آن‌ها با ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی، بهینه‌سازی اندازه و بهینه‌سازی شکل، فرآیند جامعی برای طراحی جکت پایه توربین بادی ارائه کردند. در این مطالعه اثر همزمان بارهای باد، موج، جریان و بارهای ناشی از عملکرد توربین در نظر گرفته شد و قیود مقاومت، سختی، پایداری، فرکانس طبیعی و ظرفیت نهایی نیز در مدل اعمال گردید. نتایج نشان داد که سازه نهایی حدود ۳۸ درصد کاهش وزن داشته و علاوه بر آن، تمرکز تنش در بسیاری از نواحی بحرانی کاهش یافته است. این پژوهش یکی از نخستین مطالعاتی بود که سه سطح مختلف بهینه‌سازی را به صورت همزمان در طراحی جکت به کار گرفت [۱۰].

در همان سال، ژانگ و همکاران نیز روشی برای بهینه‌سازی توپولوژی جکت در مرحله طراحی مفهومی ارائه کردند. آن‌ها پس از استخراج توپولوژی بهینه، رفتار سازه را تحت بارگذاری‌های مختلف با استفاده از تحلیل اجزای محدود بررسی کردند. مقایسه نتایج نشان داد که اگرچه افزایش فرکانس طبیعی سازه محدود است، اما حداکثر جابه‌جایی و تنش فون‌مایزز به میزان قابل توجهی کاهش یافته و مسیر انتقال نیرو در سازه یکنواخت‌تر شده است [۱].

در سال‌های اخیر، دامنه پژوهش‌ها به سمت بهینه‌سازی پارامتریک و طراحی مفهومی نیز توسعه یافته است. وانگ و همکاران با توسعه یک مدل اجزای محدود پارامتریک و تلفیق آن با الگوریتم ژنتیک، ابزار سریعی برای طراحی بهینه جکت ارائه کردند. در این مطالعه اثر برهم‌کنش خاک و شمع، بارهای واقعی باد و موج و شرایط مرزی واقعی نیز در مدل لحاظ شد و نشان داده شد که روش پیشنهادی ضمن کاهش هزینه محاسباتی، کاهش جرم سازه را بدون افت عملکرد امکان‌پذیر می‌سازد [۱۱].

علاوه بر این، پژوهش‌های جدیدتر در سال‌های اخیر نشان می‌دهند که روند تحقیقات به سمت بهینه‌سازی همزمان توپولوژی، خستگی، قابلیت اطمینان و هزینه چرخه عمر در حال حرکت است. همچنین استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، مدل‌های جانشین و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای کاهش هزینه محاسباتی فرآیند طراحی به سرعت در حال گسترش است. با این وجود، تقریبا تمامی این مطالعات عملکرد سازه را بر اساس معیارهایی نظیر جرم، تنش، فرکانس طبیعی، پاسخ دینامیکی، خستگی یا ظرفیت کمانش ارزیابی کرده‌اند و توجه کمتری به رفتار غیرخطی واقعی سازه پس از تسلیم داشته‌اند.

مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تحقیقات مرتبط با بهینه‌سازی جکت‌های توربین بادی فراساحلی طی دو دهه گذشته روند تکاملی مشخصی را طی کرده است. در ابتدا، پژوهش‌ها عمدتا بر بهینه‌سازی ابعاد اعضا با هدف کاهش وزن و هزینه ساخت

[1] Surrogate Models

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

متمرکز بودند. با پیشرفت روش‌های محاسباتی، به‌ویژه توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری و روش‌های مبتنی بر گرادیان، امکان در نظر گرفتن هم‌زمان قیود متعددی نظیر مقاومت، کمانش، تغییرمکان، فرکانس طبیعی و خستگی فراهم شد [۳،۴،۸]. در ادامه، استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی موجب شد علاوه بر ابعاد اعضا، آرایش کلی سازه و مسیر انتقال نیرو نیز در فرآیند طراحی مورد توجه قرار گیرد و مطالعات متعددی کارایی این رویکرد را در کاهش وزن و افزایش سختی سازه نشان دادند [۱۲،۱۳،۱۴].

از سوی دیگر، توسعه ابزارهای طراحی و مطالعات مربوط به تحلیل حساسیت پاسخ دینامیکی موجب افزایش دقت مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد جکت‌های فراساحلی شد [۱۵،۱۶،۱۷]. همچنین در سال‌های اخیر، به‌کارگیری مدل‌های جانشین، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های هوشمند، هزینه محاسباتی طراحی بهینه را کاهش داده و امکان بررسی تعداد بیشتری از گزینه‌های طراحی را فراهم کرده است [۱۸،۱۹].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه بهینه‌سازی جکت‌های توربین بادی فراساحلی، بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها بر کاهش وزن سازه، بهینه‌سازی ابعاد اعضا، بهینه‌سازی توپولوژی، کنترل تنش، افزایش عمر خستگی، بهبود پاسخ دینامیکی یا کاهش هزینه ساخت متمرکز بوده‌اند. در این مطالعات، عملکرد سازه عمدتا بر اساس شاخص‌هایی نظیر جرم، تنش، تغییرمکان، فرکانس طبیعی و قیود آیین‌نامه‌ای ارزیابی شده است، در حالی که رفتار غیرخطی و ظرفیت واقعی سازه پس از ورود به محدوده پلاستیک، کمتر به عنوان مبنای تصمیم‌گیری در فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

از سوی دیگر، اگرچه تحلیل پوش‌اور یکی از روش‌های شناخته‌شده برای ارزیابی ظرفیت لرزه‌ای و رفتار غیرخطی سازه‌ها محسوب می‌شود، کاربرد آن به عنوان ابزار هدایت‌کننده فرآیند بهینه‌سازی هندسه جکت‌های توربین بادی فراساحلی تاکنون به‌صورت جامع گزارش نشده است. همچنین، اغلب پژوهش‌های مرتبط با تغییر هندسه جکت، صرفا به بررسی تثیر هندسه بر پاسخ سازه پرداخته‌اند و کمتر تلاش شده است که شاخص‌های عملکردی استخراج‌شده از تحلیل پوش‌اور به عنوان معیار انتخاب هندسه بهینه مورد استفاده قرار گیرند.

بر این اساس، نوآوری اصلی پژوهش حاضر ارائه یک چارچوب ارزیابی پارامتریک هندسی مبتنی بر عملکرد، برای جکت پایه توربین بادی فراساحلی است. در این چارچوب، تابع هدف، بهبود هم‌زمان سختی و درجه افزونگی سازه با حفظ وزن ثابت تعریف شده است. هندسه‌های مختلف جکت با وزن یکسان تولید شده و عملکرد آن‌ها از طریق تحلیل پوش‌اور غیرخطی ارزیابی می‌شود. سپس، شاخص‌هایی نظیر ظرفیت نهایی باربری، سختی اولیه، شکل‌پذیری، انرژی جذب‌شده، ضریب اضافه‌مقاومت، افزونگی سازه و مکانیزم تشکیل مفاصل پلاستیک به عنوان معیارهای اصلی انتخاب طرح برتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این رویکرد، ارزیابی سازه را از معیارهای متداول مبتنی بر مقاومت خطی فراتر برده و امکان انتخاب هندسه‌ای را فراهم می‌کند که علاوه بر کاهش وزن، از دیدگاه عملکرد غیرخطی و ایمنی سازه نیز بهینه باشد. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش زمینه توسعه روش‌های طراحی مبتنی بر عملکرد برای زیرسازه‌های توربین‌های بادی فراساحلی را فراهم کند.

۲ – رویکرد بهینه‌سازی

سازه‌های جکت بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی مختلف طراحی و ساخته می‌شوند و لازم است توجه داشت که این آیین‌نامه‌ها محافظه‌کارانه هستند [۵]. درنتیجه طراحی سازه‌های دریایی به صورت محافظه‌کارانه (اوردیزاین[۲]) انجام می‌شوند و بنابراین بهینه-سازی سازه در فاز طراحی اهمیت بسیار بالایی دارد، زیرا این امر منجر به کمینه‌سازی هزینه تولید می‌گردد [۹]. با بزرگتر شدن روز به روز توربین‌های بادی فراساحلی مقاومت و سختی بالاتر برای زیرسازه امری ضروری است [۱۱]. بنابراین بهینه‌سازی زیرسازه با معیار وزن ثابت ولی سختی بیشتر امری ضروری می-باشد.

در مسائل بهینه‌سازی، سه مولفه اصلی وجود دارد که عبارت هستند از تابع هدف، متغیرهای طراحی و محدودیت‌های طراحی [۱۲]؛ در این مقاله، تابع هدف، بهبود هم‌زمان سختی و درجه افزونگی سازه با حفظ وزن ثابت است و متغیرهای طراحی، شیب سازه و نحوه مهاربندی سازه می‌باشند. همچنین معیارهای زیر به عنوان معیارهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که از آنجا که وزن تمامی مدل‌ها یکسان نگه داشته شده است، مقایسه مدل‌ها بر مبنای شاخص‌های عملکردی غیرخطی شامل مقاومت، شکل‌پذیری، انرژی نرمالیزه و درجه افزونگی نرمالیزه انجام می‌شود. این رویکرد امکان شناسایی هندسه‌هایی را فراهم می‌کند که بدون افزایش وزن، عملکرد سازه‌ای بهتری از خود نشان می‌دهند.

بر اساس محدودیت مشخص شده در API-RP-2AWSD [۲]:

$$2 < D/t < 300 \qquad (۱)$$

β و τ و γ به صورت زیر تعریف می‌شوند و باید در بازه‌ی تعریف شده در (۵) قرار داشته باشند [۹].

$$\beta = \frac{d}{D} \qquad (۲)$$

[۲] Overdesign

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

$$\tau = \frac{t}{T} \quad (۳)$$

$$\gamma = \frac{D}{2 \times T} \quad (۴)$$

$$0.3 \le \beta \le 0.5$$
$$0.4 \le \tau \le 1$$
$$10 \le \gamma \le 24 \quad (۵)$$

در روابط فوق d قطر مهاربند، D قطر پایه جکت، t ضخامت مهاربند و T ضخامت پایه جکت می‌باشد.

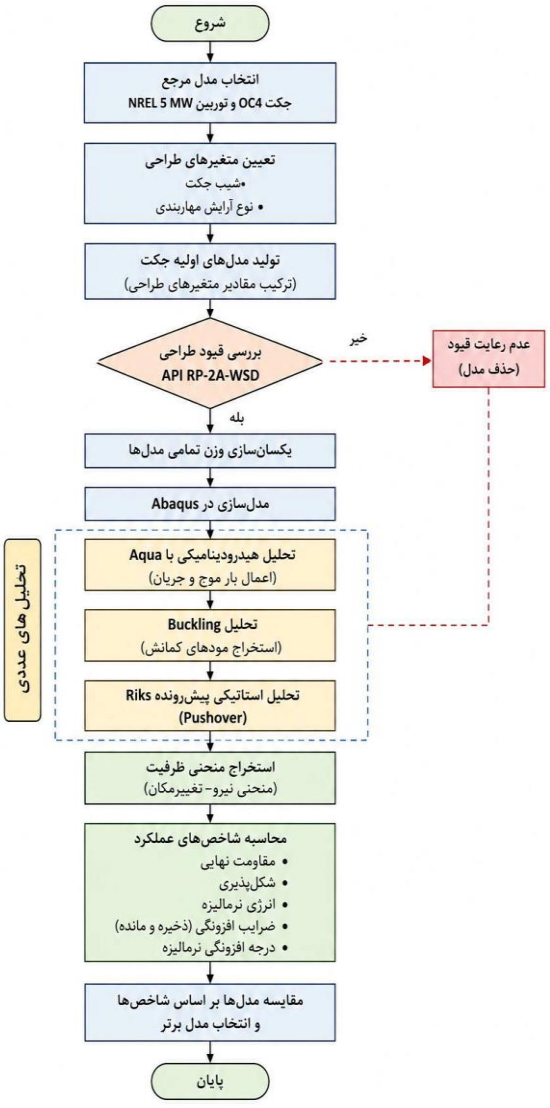
همچنین باید روابط زیر نیز رعایت گردند [۱۳].

$$\frac{D_{X brace}}{t_{X brace}} \ge 31 \quad (۶)$$

$$A_{brace} \ge 0.1 A_{leg} \quad (۷)$$

$$D_{X brace} \ge 0.3 D_{leg} \quad (۸)$$

در شکل ۱ فرآیند کار به صورت فلوچارت نمایش داده شده‌است.



شکل ۱ – فلوچارت فرآیند ارزیابی مدل‌ها

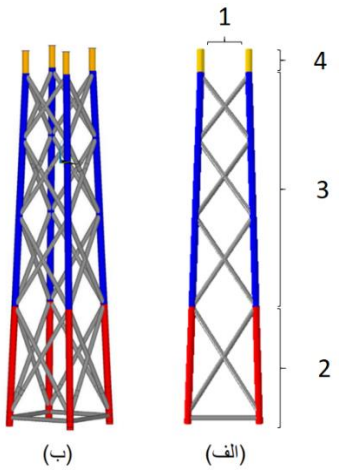
۳ – سازه‌ی مورد مطالعه

جکت مورد استفاده در این مقاله، همان جکتی است که به عنوان زیرسازه توربین‌های بادی فراساحلی فاز اول پروژه OC4 مورد استفاده قرار گرفته است. این جکت در سال ۲۰۱۰ توسط ومولا[۳] و همکارانش طراحی شد. همچنین توربین بادی معروف ۵ مگاواتی آزمایشگاه NREL که در سال ۲۰۰۹ توسط جانکمن[۴] و همکارانش طراحی شده است که توربینی سه پره در جهت باد می‌باشد نیز بر روی این جکت نصب شده است. لازم به ذکر است که این جکت توربین بادی در پروژه‌های تحقیقاتی و علمی متعددی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۳]. برای ساده‌سازی، از مدل‌سازی عرشه صرفه نظر شد ولی وزن تمامی ملحقات عرشه که در جدول ۱ آورده شده‌است، به گره بالایی جکت اعمال شده‌است.

جدول ۱- جدول وزنی اعضای عرشه[۱۴]

عضو	وزن (تن)
روتور	۱۱۰
ناسل	۲۴۰
برج	۳۴۷/۴۶
پره‌ها	۸۰

بنابراین مجموع وزن‌های فوق را بر ۴ تقسیم می‌کنیم تا نیروی وارد بر هر پایه محاسبه شود، که در این صورت ۱۹۴۳۶۵ کیلوگرم بر هر پایه وارد می‌شود. این نیرو در مدل‌سازی به نوک هر پایه اعمال شده است. شکل ۲ نمای کلی جکت مورد استفاده در این پروژه را نشان می‌دهد و جدول ۲، ابعاد هر یک از اعضای جکت را بر اساس شکل مذکور ارائه می‌کند.



شکل ۲- تصویر دو بعدی و سه بعدی از مدل طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس

[۳] Vemula
[۴] Jonkman

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

جدول ۲- ابعاد اعضای جکت [۱]

عضو	رنگ و شماره عضو در شکل ۲	قطر خارجی (m)	ضخامت (mm)
X and Mud braces	طوسی (۱)	۰/۸	۲۰
Leg at lowest level	قرمز (۲)	۱/۲	۵۰
Leg in other level	آبی (۳)	۱/۲	۳۵
Leg crossing TP	نارنجی (۴)	۱/۲	۴۰
Pile	نشان داده نشده است	۲/۰۸۲	۶۰

۱-۳- مدل‌های طراحی شده

در این پژوهش، ۲۴ مدل جکت بر اساس دو متغیر طراحی شامل شیب سازه و آرایش مهاربندها ایجاد شد. در مراحل اولیه، پیکربندی‌های دیگری نیز بررسی شدند، اما به دلیل عدم تامین قیود طراحی از فرآیند تحلیل حذف شدند. همچنین، با استفاده از رابطه‌ی ۹ تمامی مدل‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که جرم کل سازه در تمامی پیکربندی‌ها ثابت باقی بماند [۱۵].

$$W_{jacket} = \sum_{i=1}^{N} \rho_i \ell_i A_i \qquad (۹)$$

که در آن: ρ_i چگالی المان، ℓ_i طول المان و A_i سطح مقطع المان می‌باشند. که چگالی فلز مشخص و طول هر المان نیز با توجه به هندسه هر مدل به‌دست می‌آید؛ و سطح مقطع نیز برای هر المان از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود [۱۵].

$$A_i = \frac{\pi({D_{oi}}^2 - (D_{oi} - 2t_i)^2)}{4} \qquad (۱۰)$$

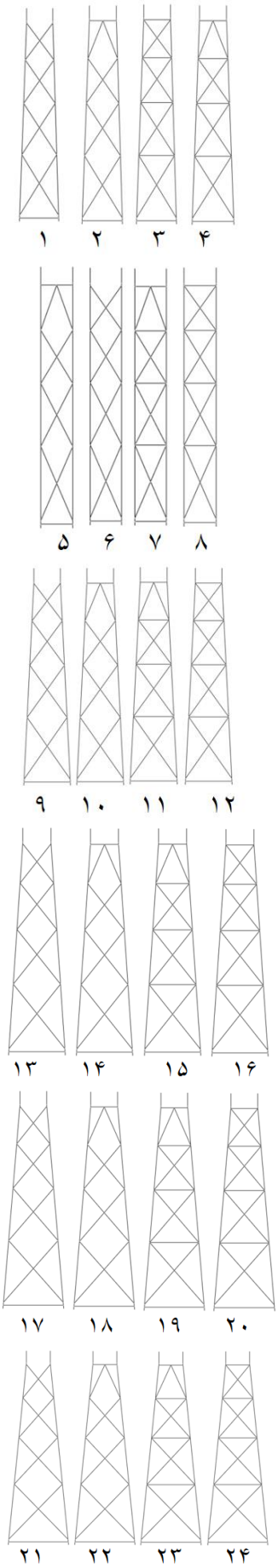
که در آن: D_{oi} قطر خارجی عضو، t_i ضخامت عضو می‌باشند.

۲۴ مدل طراحی‌شده در این پژوهش بر اساس ۶ شیب متفاوت و ۴ الگوی مهاربندی مختلف ایجاد شدند. شیب‌های در نظر گرفته‌شده شامل شیب‌های بدون بتر، شیب سازه اصلی (۱/۳۲)، ۱/۲۰، ۱/۱۵، ۱/۱۲ و ۱/۱۰ می‌باشند.

از طرف دیگر، چهار نوع مهاربندی مختلف مورد استفاده عبارت‌اند از:

۱) مهاربند Xشکل در تمامی ترازها.
۲) مهاربند هشتی در بالاترین تراز و Xشکل در سایر ترازها.
۳) حالت اول همراه با وجود مهاربند افقی.
۴) حالت دوم همراه با وجود مهاربند افقی.

شکل ۳ تمامی ۲۴ مدل طراحی‌شده را نمایش می‌دهند.



شکل ۳- تصویر ۲۴ مدل طراحی شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

۲-۳- مدل‌سازی اجزای محدود

مدل‌سازی اجزای محدود جکت در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Abaqus (نسخه ۶.۱۴-۴) انجام شد. اعضای سازه‌ای شامل پایه‌ها و مهاربندها با المان‌های لوله‌ای مدل‌سازی شدند. خواص مواد فولاد سازه‌ای به صورت مدول یانگ ۲۱۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعریف گردید. برای رفتار پلاستیک ماده، تنش تسلیم ۳۵۵ مگاپاسکال و تنش نهایی ۵۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. مش‌بندی مدل با اندازه مناسب انجام شد و مطالعه همگرایی مش برای اطمینان از استقلال نتایج از اندازه مش صورت گرفت. برای لحاظ کردن نقص‌های هندسی اولیه، از مودهای کمانشی استفاده شد و دامنه نقص اولیه معادل L/1000 در نظر گرفته شد. این مقدار یک فرض متداول و محافظه‌کارانه در تحلیل غیرخطی اعضای لوله‌ای سازه‌های فراساحلی محسوب می‌شود. شرایط مرزی در پایین جکت به صورت گیردار اعمال گردید. لازم به ذکر است که در این مطالعه، شمع و اندرکنش خاک-شمع به صورت صریح مدل‌سازی نشده و پایین جکت به صورت گیردار فرض شده است. این ساده‌سازی ممکن است بر سختی اولیه و ظرفیت نهایی سازه تاثیر بگذارد که در بخش محدودیت‌ها به آن پرداخته شده است.

در مورد بارهای توربین، تنها وزن اجزای توربین شامل روتور، ناسل، برج و پره‌ها مطابق جدول ۱ به گره بالایی جکت اعمال شده است. بارهای آیرودینامیکی، بارهای عملیاتی و پارک‌شده توربین و بارهای اینرسی روتور-ناسل در این مطالعه لحاظ نشده‌اند. این ساده‌سازی بر این فرض استوار است که هدف اصلی پژوهش، مقایسه نسبی عملکرد هندسه‌های مختلف جکت تحت بارهای هیدرودینامیکی یکسان است و اثر بارهای آیرودینامیکی بر رتبه‌بندی مدل‌ها حداقل می‌باشد. با این حال، این محدودیت در بخش محدودیت‌های مقاله ذکر شده است.

۳-۳- تحلیل مدل‌ها

برای ارزیابی رفتار غیرخطی مدل‌ها از تحلیل پوش-اور[۵]، به عنوان یک روش تحلیل استاتیکی غیرخطی افزاینده، استفاده شد. جهت انجام تحلیل پوش‌اور سکوی جکت در نرم‌افزار آباکوس سه مرحله تحلیل مورد نیاز است:

۱) تحلیل آکوآ[۶]:

در این مرحله بارگذاری موج و جریان بر روی مدل اعمال می‌شود به منظور محاسبه بارهای هیدرودینامیکی ناشی از موج و جریان و اعمال آن‌ها بر سازه. در این پژوهش ارتفاع موج صد ساله برابر m ۱۵، پریودs ۱۲ و سرعت جریان برابر m/s ۰/۷ در نظر گرفته شد [۱۰]. بر اساس این مقادیر، بارگذاری موج صد ساله بر روی سازه اعمال گردید.

۲) تحلیل کمانش[7]:

در این مرحله حالت‌های[۸] کمانشی سازه محاسبه می‌شوند. با در نظر گرفتن این حالت‌ها می‌توان نقص اولیه اعضا را تعریف کرد؛ وجود نقص اولیه موجب وقوع کمانش در اعضا و در نهایت دستیابی به یک منحنی ظرفیت واقع‌بینانه می‌شود.

۳) تحلیل ریکس[9]:

در این مرحله داده‌های حاصل از دو تحلیل قبلی به کار گرفته می‌شوند. بدین صورت که بارگذاری به‌دست‌آمده از تحلیل آکوآ به عنوان جابجایی ترازها بر مدل اعمال می‌شود و مدهای کمانشی حاصل از تحلیل کمانش نیز در بخش کیورد[۱۰] مدل وارد می‌گردند. در نهایت با اجرای تحلیل ریکس، منحنی ظرفیت سازه با کنترل جابه‌جایی به‌دست می‌آید.

۴-۳- فرضیات بارگذاری موج و جریان

بارگذاری هیدرودینامیکی موج و جریان بر اساس مشخصات محیطی پروژه مرجع OC4 و با استفاده از تئوری موج خطی آیری[۱۱] و معادله موریسون انجام شده است. عمق آب ۵۰ متر و توزیع جریان به صورت یکنواخت فرض شده است. از ضرایب هیدرودینامیکی متعارف مطابق رویه‌های استاندارد طراحی سازه‌های فراساحلی استفاده گردید. ارتفاع موج، پریود و سرعت جریان بر اساس شرایط محیطی مرجع پروژه OC4 انتخاب شده‌اند. مشخصات کامل این پارامترها به همراه مراحل تحلیل در جدول ۳ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که اثر رسوبات دریایی[۱۲] در این مطالعه لحاظ نشده است. دلیل این انتخاب آن است که این پژوهش در فاز طراحی مفهومی انجام شده و در این مرحله، سازه هنوز در محیط دریا قرار نگرفته و فرض می‌شود سطح اعضا فاقد هرگونه رسوب بیولوژیکی است. بنابراین، در نظر گرفتن رسوبات دریایی در این فاز از طراحی منطقی نبوده و بارگذاری صرفاً بر اساس مشخصات هندسی اولیه اعضا انجام شده است.

جدول ۳ - مشخصات بارگذاری و تحلیل

پارامتر	مقدار
ارتفاع موج	m ۱۵

---

[۵] Pushover Analysis
[۶] Aqua
[7] Buckling
[۸] Mode
[9] Riks
[۱۰] Keyword
[۱۱] Airy
[۱۲] Marine growth

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

پریود موج	۱۲ s
سرعت جریان	۰/۷ m/s
پروفیل جریان	یکنواخت
ضریب درگ	۰/۶
ضریب اینرسی	۱/۶
نوع تحلیل	Aqua
تحلیل کمانش	Eigen Buckling
تحلیل نهایی	Static Riks

۵-۳- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی اجزای محدود، فرکانس‌های طبیعی مدل جکت با مقادیر گزارش‌شده در پروژه مرجع [۱۷] OC4 مقایسه شده است. در این پروژه، فرکانس طبیعی مود اول جکت OC4 با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع در محدوده ۰/۳۱ تا ۰/۳۲ هرتز گزارش شده است. همچنین، در مطالعات مشابه، فرکانس طبیعی مود اول جکت‌های چهارپایه سنتی در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۳۱ هرتز ذکر شده است.

در مدل حاضر، فرکانس طبیعی مود اول جکت ۰/۳۴ هرتز به دست آمد که با مقادیر مرجع اختلافی در حدود ۷ درصد دارد. این همخوانی مناسب، صحت مدل‌سازی اجزای محدود، خواص مواد، شرایط مرزی و توزیع جرم را تأیید می‌کند. همچنین، مودهای بالاتر (مودهای خمشی جانبی و پیچشی) نیز با نتایج مرجع مقایسه شدند و تطابق قابل قبولی مشاهده گردید. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، به دلیل فرض گیردار بودن پای جکت (عدم مدل‌سازی شمع و اندرکنش خاک-شمع)، فرکانس طبیعی به‌دست‌آمده ممکن است کمی بالاتر از مقادیر مرجع باشد. این موضوع با توجه به اینکه هدف اصلی مطالعه، مقایسه نسبی هندسه‌ها است، تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد.

۴ – روش مقایسه مدل‌ها

برای ارزیابی و مقایسه مدل‌ها، پارامترهایی شامل مقاومت مدل‌ها، مقاومت نرمالیزه، شکل‌پذیری، شکل‌پذیری نرمالیزه، ضریب افزونگی ذخیره[۱۳]، ضریب افزونگی مانده[۱۴]، درجه افزونگی نرمالیزه[۱۵] و در نهایت انرژی نرمالیزه مورد بررسی قرار گرفتند.

مقاومت و شکل‌پذیری هر مدل از منحنی ظرفیت آن مدل استخراج شد. مقاومت نرمالیزه نیز از نسبت مقاومت هر مدل به مقاومت مدل اصلی به دست آمد. همچنین:

- درجه افزونگی ذخیره بر اساس رابطه ۱۱ محاسبه شد.
- درجه افزونگی مانده از رابطه ۱۲ به دست آمد.
- شکل‌پذیری نرمالیزه از نسبت شکل‌پذیری هر مدل به شکل‌پذیری مدل اصلی محاسبه گردید.
- درجه افزونگی نرمالیزه نیز بر اساس رابطه ۱۳ تعیین شد.

درجه افزونگی ذخیره به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$R_2 = \frac{L_{intact}}{L_{design}} \quad (11)$$

درجه افزونگی مانده، به صورت زیر تعریف می‌شود[۱۶]:

$$R_3 = \frac{L_{damaged}}{L_{intact}} \quad (12)$$

$$Normalize - redundancy = \frac{(ductility \times R_2 \times R_3)_{Each-Model}}{(ductility \times R_2 \times R_3)_{Main-Model}} \quad (13)$$

۵- نتایج

در این بخش، نتایج تحلیل غیرخطی ۲۴ مدل ارائه و مقایسه می‌شود. جدول ۴ مقادیر کمی شاخص‌های عملکردی را برای همه مدل‌ها نشان می‌دهد. این شاخص‌ها شامل مقاومت ، شکل‌پذیری، انرژی نرمالیزه، درجه افزونگی ذخیره (R_2)، درجه افزونگی مانده (R_3) و درجه افزونگی نرمالیزه است. در شکل ۴، نمودار پوش اور تمامی مدل‌ها نیز نشان داده شده‌است.

[۱۳] Reserve redundant factor
[۱۴] Residual redundant factor
[۱۵] Normalize redundancy

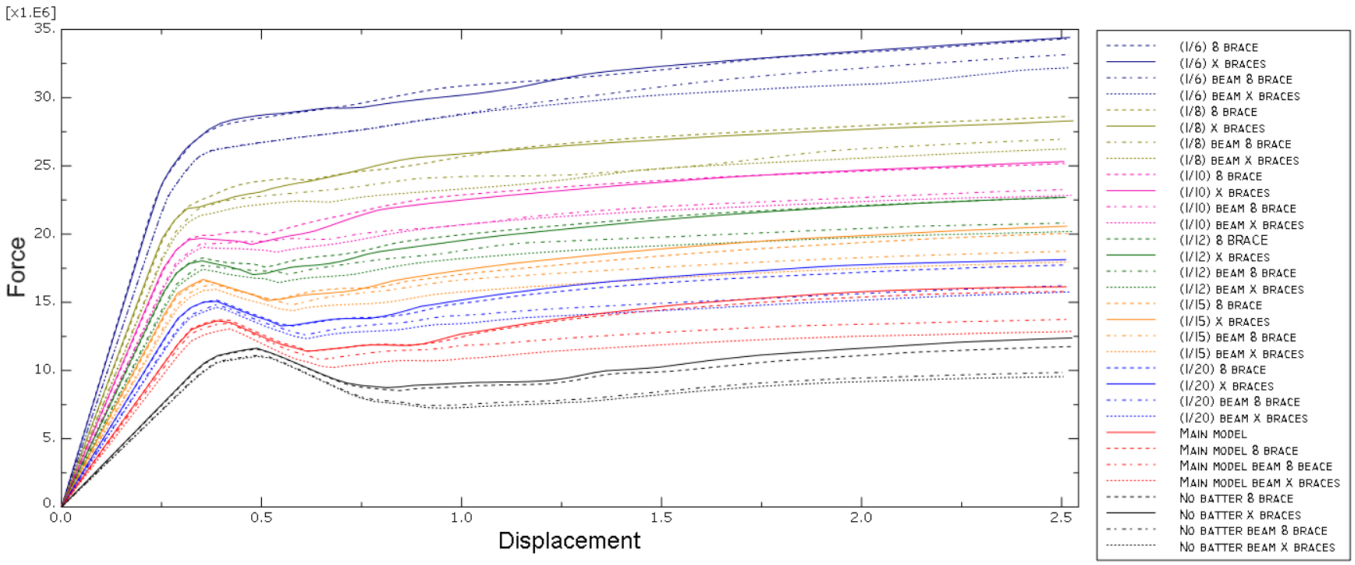
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

جدول ۴ - مقایسه کمی شاخص‌های عملکردی ۲۴ مدل

مدل	مقاومت	شکل پذیری	انرژی نرمالیزه	درجه افزونگی ذخیره	درجه افزونگی مانده	درجه افزونگی نرمالیزه
مدل ۱ (اصلی)	۱۶/۱۳۷	۷/۷۴۵	۱	۳/۲۵۰	۰/۸۷۸	۱
مدل ۲	۱۵/۷۸۵	۷/۷۲۹	۰/۹۹۷	۳/۲۶۰	۰/۸۷۵	۰/۹۹۷
مدل ۳	۱۳/۷۵۱	۷/۷۹۱	۰/۸۵۶	۳/۲۷۷	۰/۸۵۱	۰/۹۸۳
مدل ۴	۱۳/۰۵۹	۷/۷۸۹	۰/۸۱۳	۳/۲۷۹	۰/۸۴۰	۰/۹۷۰
مدل ۵	۱۲/۳۸۹	۷/۰۵۰	۰/۶۹۸	۳/۶۱۱	۰/۸۲۶	۰/۹۵۱
مدل ۶	۱۱/۷۶۰	۷/۰۴۷	۰/۶۶۲	۳/۶۱۴	۰/۸۱۱	۰/۹۳۴
مدل ۷	۱۱/۱۰۵	۷/۵۴۴	۰/۶۷۱	۳/۶۲۲	۰/۷۴۰	۰/۹۱۴
مدل ۸	۱۱/۰۲۹	۷/۶۳۴	۰/۶۷۳	۳/۶۲۲	۰/۷۲۶	۰/۹۰۸
مدل ۹	۱۸/۱۲۸	۸/۶۳۴	۱/۲۵۱	۲/۹۷۱	۰/۹۶۰	۱/۱۱۴
مدل ۱۰	۱۷/۷۳۳	۸/۶۳۱	۱/۲۲۴	۲/۹۷۵	۰/۹۶۵	۱/۱۲۱
مدل ۱۱	۱۶/۲۱۷	۸/۶۵۸	۱/۱۲۲	۲/۹۸۵	۰/۹۶۵	۱/۱۳۰
مدل ۱۱	۱۵/۷۵۹	۸/۶۶۳	۱/۰۹۱	۲/۹۸۴	۰/۹۵۴	۱/۱۱۵
مدل ۱۳	۲۰/۵۷۴	۸/۶۸۰	۱/۴۲۸	۲/۹۵۳	۰/۹۶۶	۱/۱۲۰
مدل ۱۴	۲۰/۰۴۷	۸/۶۷۷	۱/۳۹۱	۲/۹۵۸	۰/۹۸۳	۱/۱۴۱
مدل ۱۵	۱۸/۷۴۵	۷/۸۴۹	۱/۱۷۶	۳/۱۵۶	۰/۹۴۳	۱/۰۵۶
مدل ۱۶	۱۷/۹۵۵	۷/۸۰۱	۱/۱۱۹	۳/۱۴۰	۰/۹۳۴	۱/۰۳۵
مدل ۱۷	۲۲/۶۹۱	۸/۷۱۴	۱/۵۸۱	۲/۸۹۳	۰/۹۹۳	۱/۱۳۲
مدل ۱۸	۲۲/۷۰۵	۸/۷۲۵	۱/۵۸۴	۲/۹۱۹	۰/۹۹۹	۱/۱۵۱
مدل ۱۹	۲۰/۸۱۵	۸/۷۳۷	۱/۴۵۵	۲/۹۶۳	۰/۹۹۹	۱/۱۷۰
مدل ۲۰	۲۰/۱۸۹	۸/۷۴۵	۱/۴۱۲	۲/۹۶۰	۰/۹۹۹	۱/۱۷۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

مدل ۲۱	۲۵/۳۱۲	۸/۷۵۷	۱/۷۷۱	۲/۸۵۸	۰/۹۹۹	۱/۱۳۱
مدل ۲۲	۲۵/۱۶۳	۸/۷۴۷	۱/۷۶۱	۲/۸۸۶	۰/۹۹۹	۱/۱۴۱
مدل ۲۳	۲۳/۲۵۵	۸/۸۰۵	۱/۶۳۶	۲/۹۴۹	۰/۹۹۹	۱/۱۷۳
مدل ۲۴	۲۲/۸۳۱	۸/۷۷۷	۱/۶۰۲	۲/۹۳۷	۰/۹۹۹	۱/۱۶۵



شکل ۴- منحنی ظرفیت تمامی مدل‌ها

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی پارامتریک هندسه و مهاربندی جکت پایه توربین بادی فراساحلی انجام شد. برخلاف رویکردهای متداول که عملکرد سازه را بر مبنای معیارهای خطی نظیر جرم، تنش یا فرکانس طبیعی ارزیابی می‌کنند، در این مطالعه رفتار غیرخطی سازه پس از تسلیم مبنای تصمیم‌گیری قرار گرفت. برای این منظور، ۲۴ مدل با وزن یکسان و با هدف بهبود هم‌زمان سختی و درجه افزونگی سازه تحت تحلیل پوش‌اور غیرخطی بررسی شدند. جمع‌بندی یافته‌های اصلی به شرح زیر است:

اثر شیب جکت: نتایج نشان داد که افزایش شیب جکت، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و انرژی نرمالیزه را به‌طور پیوسته افزایش می‌دهد. تحلیل مکانیسم این رفتار نشان می‌دهد که با افزایش شیب، بار جانبی موج و جریان به‌جای ایجاد لنگر خمشی بزرگ در پای جکت، به‌صورت محوری در پایه‌ها توزیع می‌شود. این تغییر مسیر انتقال بار، سختی جانبی و ظرفیت باربری سازه را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش طول مهاربندها با افزایش شیب، احتمال کمانش موضعی را کاهش داده و امکان تشکیل مفاصل پلاستیک با شکل‌پذیری بیشتر را فراهم می‌آورد. این یافته با نتایج تابش‌پور و فاطمی [۷] که نشان دادند تغییر هندسه مهاربندها تأثیر بیشتری از تغییر ابعاد اعضا بر عملکرد نهایی سازه دارد، همخوانی دارد.

اثر آرایش مهاربندی: در بررسی نحوه مهاربندی مشخص شد که برای شیب‌های یکسان، سازه‌های دارای عضو افقی، انرژی نرمالیزه کمتری دارند. مقایسه بین مهاربندی X و مهاربندی هشتی نشان داد که عملکرد هر یک بسته به شیب متفاوت است و نمی‌توان یک حالت برتر مطلق معرفی کرد. با این حال، در مجموع، مدل‌های با مهاربند X در شیب‌های پایین‌تر و مدل‌های با ترکیب X و عضو افقی در شیب‌های بالاتر عملکرد بهتری از خود نشان دادند. این نتیجه‌گیری با یافته‌های تیان و همکاران [۱۰] که نشان دادند آرایش بهینه مهاربندی می‌تواند ظرفیت باربری و شکل‌پذیری را هم‌زمان افزایش دهد، سازگار است.

شاخص‌های افزونگی: با افزایش شیب جکت، ضریب افزونگی ذخیره کاهش یافته در حالی که ضریب افزونگی مانده افزایش می‌یابد و پس از یک مقدار مشخص به حالت اشباع می‌رسد. این رفتار نشان می‌دهد که در شیب‌های بالاتر، سازه حتی در صورت حذف یک عضو بحرانی، توانایی حفظ پایداری خود را دارد. درجه افزونگی نرمالیزه نیز با افزایش شیب رشد می‌کند و به‌عنوان معیار اصلی انتخاب طرح برتر مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

مدل ۲۱ با شیب ۸/۱ و آرایش مهاربندی X به‌عنوان طرح برتر انتخاب می‌شود که ضمن حفظ وزن یکسان با سایر مدل‌ها، بالاترین درجه افزونگی نرمالیزه را به دست آورده است.

در این مقاله، هدف، بهبود هم‌زمان سختی و درجه افزونگی سازه با حفظ وزن ثابت بود. از آنجا که وزن تمامی مدل‌ها یکسان نگه داشته شده است، انتخاب هندسه برتر بر مبنای شاخص‌های عملکردی غیرخطی انجام شد. این رویکرد تضمین می‌کند که در صورت آسیب یا تسلیم یک عضو، سازه همچنان پایداری خود را حفظ کند و فروریزش کلی رخ ندهد. به عبارت دیگر، مستقل از سختی و مقاومت سیستم، سازه باید به‌گونه‌ای طراحی شود که تسلیم یا شکست اعضا با تأخیر رخ دهد (شکل‌پذیری بیشتر) و در صورت وقوع، منجر به فروریزش سازه نگردد (افزونگی مناسب). نتایج این پژوهش زمینه توسعه روش‌های طراحی مبتنی بر عملکرد برای زیرسازه‌های توربین‌های بادی فراساحلی را فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مطالعات آینده در زمینه بهینه‌سازی چندمعیاره این سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۷- محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش با چند محدودیت همراه است که دامنه تفسیر نتایج را مشخص می‌کند:

۱. شرایط مرزی و اندرکنش خاک-شمع: در این مطالعه، پایین جکت به صورت گیردار فرض شده است. این فرض، یک ساده‌سازی متداول در فاز طراحی مفهومی است که امکان مقایسه نسبی هندسه‌ها را بدون پیچیدگی مدل‌سازی شمع فراهم می‌کند. با این حال، در واقعیت، انعطاف‌پذیری شمع و خاک می‌تواند سختی اولیه و توزیع لنگر در پای جکت را تغییر دهد. از آنجا که همه مدل‌ها تحت شرایط مرزی یکسان تحلیل شده‌اند، انتظار می‌رود رتبه‌بندی نسبی مدل‌ها حفظ شود.

۲. بارهای توربین: تنها وزن اجزای توربین به گره بالایی اعمال شده و بارهای آیرودینامیکی ((thrust، بارهای عملیاتی/پارک‌شده و اینرسی روتور-ناسل لحاظ نشده‌اند. این انتخاب بر این فرض استوار است که بارهای هیدرودینامیکی، بار غالب برای جکت در آب‌های متوسط و عمیق هستند و هدف مطالعه، مقایسه عملکرد هندسه‌ها تحت بار موج و جریان است. با این حال، در مطالعات آینده می‌توان اثر این بارها را نیز بررسی کرد.

۳. رسوبات دریایی: از آنجا که این پژوهش در فاز طراحی مفهومی انجام شده، اثر رسوبات دریایی لحاظ نشده است. در فاز بهره‌برداری، این عامل می‌تواند قطر مؤثر و جرم افزوده را افزایش دهد و بر پاسخ دینامیکی اثر بگذارد.

۴. شرایط بارگذاری و تعداد مدل‌ها: در این مطالعه، بارگذاری موج و جریان در چند جهت مختلف بررسی شده و جهت بحرانی برای مقایسه نهایی مدل‌ها انتخاب شده است. این رویکرد استاندارد، امکان مقایسه منصفانه هندسه‌ها را تحت شدیدترین شرایط بارگذاری فراهم می‌کند. با این حال، شرایط محیطی (ارتفاع موج ۱۵ متر، پریود ۱۲ ثانیه و سرعت جریان ۰.۷ m/s) تنها در یک سطح شدت در نظر گرفته شده و حساسیت نتایج به تغییر این پارامترها بررسی نشده است. همچنین، تعداد ۲۴ مدل هندسی محدود به شیب‌ها و آرایش‌های انتخابی است، اما این تعداد برای استخراج روندهای اصلی و مقایسه الگوهای مهاربندی کافی به نظر می‌رسد.

۸ - مراجع

1- Zhang, C., Long, K., Zhang, J., Lu, F., Bai, X. and Jia, J., (2022), *A topology optimization methodology for the offshore wind turbine jacket structure in the concept phase*, Ocean Engineering, Vol.266, p.112974. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112974

2- Nasseri, T., Shabakhty, N. and Afshar, M.H., (2014), *Study of fixed jacket offshore platform in the optimization design process under environmental loads*, International Journal of Maritime Technology, Vol.2, p.75-84.

3- Schafhirt, S., Zwick, D. and Muskulus, M., (2014), *Reanalysis of jacket support structure for computer-aided optimization of offshore wind turbines with a genetic algorithm*, Journal of Ocean and Wind Energy, Vol.1, p.209-216.

4- Oest, J., Sørensen, R., Overgaard, L. and Lund, E., (2017), *Structural optimization with fatigue and ultimate limit constraints of jacket structures for large offshore wind turbines*, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.55, p.779-793. https://doi.org/10.1007/s00158-016-1527-x

5- Häfele, J., Gebhardt, C.G. and Rolfes, R., (2019), *A comparison study on jacket substructures for offshore wind turbines based on optimization*, Wind Energy Science, Vol.4, p.23-40. https://doi.org/10.5194/wes-4-23-2019

6- Tian, X., Wang, Q., Liu, G., Liu, Y., Xie, Y. and Deng, W., (2019), *Topology optimization design for offshore platform jacket structure*, Applied Ocean Research, Vol.84, p.38-50. https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.003

7- Tabeshpour, M.R. and Fatemi, M., (2020), *Optimum arrangement of braces in jacket platform based on strength and ductility*, Marine Structures, Vol.71, p.102734. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102734

8- Asgari Motlagh, A., Shabakhty, N. and Kaveh, A., (2021), *Design optimization of jacket offshore platform considering fatigue damage using Genetic*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]

Algorithm, Ocean Engineering, Vol.227, p.108869. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108869

9- Prastianto, R., Syalsabila, F., Rosyid, D.M., Mulyadi, Y. and Sambodho, K., (2022), *Surrogate model-based optimization of offshore jacket structure to develop minimum structure*, Proceedings of ICSEDTI 2022, p.17-27.

10- Tian, X., Sun, X., Liu, G., Deng, W., Wang, H. and Li, Z., (2022), *Optimization design of the jacket support structure for offshore wind turbine using topology optimization method*, Ocean Engineering, Vol.243, p.110084. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110084

11- Wang, Z., Mantey, S.K. and Zhang, X., (2023), *A numerical tool for efficient analysis and optimization of offshore wind turbine jacket substructure considering realistic boundary and loading conditions*, arXiv Preprint, arXiv:2310.19388.

12- Marjan, A. and Huang, L., (2023), *Topology optimisation of offshore wind turbine jacket foundation for fatigue life and mass reduction*, Ocean Engineering, Vol.289, p.116228. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116228

13- Tian, X., Liu, G., Deng, W., Xie, Y. and Wang, H., (2024), *Fatigue constrained topology optimization for the jacket support structure of offshore wind turbine under dynamic load*, Applied Ocean Research, Vol.142, p.103812. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103812

14- Zhang, J., Du, J., Long, K., Yao, X., Lu, F. and Geng, R., (2024), *Topology optimization method on jacket structure of offshore wind turbine by varying leg distances*, Acta Energiae Solaris Sinica, Vol.45, p.427-432. https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1055

15- Partovi-Mehr, N., Branlard, E., Song, M., Moaveni, B., Hines, E. and Robertson, A., (2023), *Sensitivity analysis of modal parameters of a jacket offshore wind turbine to operational conditions*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.11, p.1524. https://doi.org/10.3390/jmse11081524

16- Damiani, R., (2016), *JacketSE: An offshore wind turbine jacket sizing tool - theory manual and sample usage with preliminary validation*, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5000-65417. https://doi.org/10.2172/1238573

17- Popko, W., Vorpahl, F., Zuga, A., Kohlmeier, M., Jonkman, J., Robertson, A. et al., (2012), *Offshore code comparison collaboration continuation (OC4), Phase I—Results of coupled simulations of an offshore wind turbine with jacket support structure*, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, p.337-346.

18- He, B., Lv, N. and Shi, R., (2024), *Design optimization of jacket substructure of offshore wind turbine*, Proceedings of the 10th International Conference on Civil Engineering (ICCE 2023), Springer.

19- Du, Y.M., Kong, D.Q., Wang, S.L. et al., (2023), *Fatigue analysis of jacket foundations for offshore wind turbines*, Rock and Soil Mechanics, Vol.44, p.3639-3652. https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.6709

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-08]