

(مقاله پژوهشی)

تعیین میزان خرابی آستانه فروریزش (CP) توربین بادی دریایی با سکوی شابلونیعلی جعفری^۱، رضا دزواره رسانی^{۲*}rdezvareh@nit.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌های مختلف، تعیین میزان خرابی در سطوح مختلف از جمله سطح مربوط به خرابی آستانه فروریزش سازه می‌باشد. از آنجا که محققین در سال‌های اخیر به بررسی ابعاد گوناگون طراحی سازه توربین بادی دریایی پرداخته‌اند، لیکن کمتر به این معیار خرابی تحت ترکیب بار توام موج و باد اشاره نموده‌اند. در تحقیق حاضر سعی در تعیین میزان خرابی آستانه فروریزش (CP) برای یک توربین بادی دریایی با سکوی شابلونی که از رایج‌ترین سکوه‌های نگهدارنده توربین می‌باشد، شده‌است. برای محاسبه نیروی وارده بر توربین بادی دریایی تحت بارگذاری توام موج و باد تلاش‌هایی از جمله مدل‌های امواج منظم خطی و غیرخطی و امواج نامنظم صورت گرفته‌است. از آنجائیکه مدل‌های منظم تصادفی بودن و نامنظم بودن تراز سطح دریا را در نظر نمی‌گیرند و انرژی موج را در یک فرکانس متمرکز می‌کنند، لذا برای تحلیل‌های دینامیکی مناسب نیستند. از طرفی پرهزینه و وقت گیر بودن محاسبات آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی طولانی مدت امواج نامنظم از نقایص این روش‌ها است. لذا در این تحقیق از آنالیز موج - باد دوام برای این مهم استفاده شده‌است. در این مقاله با تعیین میزان خرابی آستانه فروریزش سازه و همچنین دوره بازگشت تکرار بارگذاری متناظر با آن، مشخص شد که ارتفاع موج حد خرابی CP برای این سازه، حدود ۱۱/۵ متر می‌باشد که متناظر با برش پایه ۲۲ مگانیوتن، جابجایی تقریبی ۳۰ سانتیمتر در تراز عرشه سکو و جابجایی حدود ۷۰ سانتیمتر در تراز ناسل توربین است.

واژگان کلیدی: توربین بادی دریایی، سکوی شابلونی، بارگذاری توام باد و موج، آستانه فروریزش

تاریخ دریافت مقاله : ۹۹/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۹/۱۰/۲۴

۱- مقدمه

طبق آمارهای موجود طی ۳۰ سال گذشته احتیاج کشورهای دنیا به مصرف انرژی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است، از طرفی به دلیل محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌های زیست محیطی، گرمایش جهانی، نرخ رشد جمعیت و مصرف انرژی، اندیشمندان دنیا به فکر استفاده از منابع تجدیدپذیر و انرژی باد افتاده اند، و از آنجاییکه باد در پهنه اقیانوس‌ها و دریاها دارای سرعت و دوام بیشتر است، برخی شرکت‌ها نصب دستگاه توربین بادی فراساحلی را مد نظر قرار داده‌اند. راندمان توربین‌های بادی ۳۰ تا ۴۰ درصد است که از نیروگاه‌های فسیلی بالاتر است، هزینه ساخت یک توربین بادی بسیار ارزانتر از دستگاه‌های مشابه تولید انرژی است و دیگر آنکه هزینه تولید برق از طریق نیروگاه‌های بادی در دو دهه گذشته به طور چشمگیری کاهش یافته است و با توربین‌های بادی جدید این رقم کمتر خواهد شد. لذا روش‌های متفاوتی برای تحلیل و ارزیابی سازه نگهدارنده این توربین‌ها تحت بارهای موج و باد به صورت توأم یا منفرد مورد بحث قرار گرفته است [۱] و [۲] و [۳].

روش‌های گوناگونی برای محاسبه بار امواج وجود دارد، مانند مدل امواج منظم خطی و غیرخطی و امواج نامنظم، از آنجائیکه مدل‌های منظم تصادفی بودن و نامنظم بودن تراز سطح دریا را در نظر نمی‌گیرند و انرژی موج را در یک فرکانس متمرکز می‌کنند، لذا برای تحلیل‌های دینامیکی مناسب نیستند، از طرفی پرهزینه و وقت گیر بودن محاسبات آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی طولانی مدت امواج نامنظم از نقایص این روش‌ها است، لذا تاریخچه‌های زمانی کوتاه مدت تصادفی که دربرگیرنده ارتفاع بیشینه موج مورد نظر بوده و محدوده فرکانسی متنوعی دارد که توسط برخی از محققین پیشنهاد شده است [۴] و [۵].

در مقاله‌ای تحت عنوان "مدل جدید برای سینماتیک امواج بلند اقیانوسی" توسط ترومانس و همکاران در سال ۱۹۹۱ تاریخچه زمانی کوتاه مدت مورد بررسی قرار گرفت [۶]. سپس تیلور و همکاران در سال ۱۹۹۵ با تلفیق موج و یک تاریخچه زمانی کاملاً تصادفی از محیط دریا، موج نو را پیشنهاد نمود، بدین صورت که تغییر تراز سطح آب اطراف تاج یک موج تصادفی در دریا استخراج شد [۷]. سپس کاسیدی و همکاران در سال ۲۰۰۱ به مطالعه تحلیل دینامیکی یک سکوی جک اپ با استفاده از این

تئوری پرداخت [۸]. متین نیکو و همکاران نیز در سال ۱۳۹۰ ایده استفاده از تئوری موج قیدشده در ارزیابی رفتار دینامیکی غیر خطی سازه‌های دریایی را مطرح نمودند [۲۰].

مقاله دیگر تحت عنوان "کاربرد روش تحلیل زمان - دوام در طراحی و ارزیابی سازه‌های دریایی در مقابل نیروی امواج تصادفی" می‌باشد که توسط زین الدینی و همکاران در سال ۲۰۱۲ انجام شده است [۹]. در این روش سازه جاکت در معرض ۵ تابع قطار افزایشی موج قرار گرفته و تا مرحله واژگونی کامل مورد مطالعه قرار می‌گیرد، با افزایش عمق آب و انعطاف‌پذیر شدن رفتار سیستم تحلیل تاریخچه زمانی ضرورت یافته است. به کمک موج تراز طراحی اعضای سازه‌ای طراحی می‌شوند و تنش‌های بوجود آمده با مقادیر مجاز آیین‌نامه مقایسه می‌گردد و از موج نهایی برای کنترل مقاومت نهایی و فروریزش سازه استفاده می‌شود.

در سال ۱۳۹۳ متین‌نیکو و همکاران کاربرد روش زمان دوام در طراحی سازه‌های دریایی تحت بارهای تصادفی از جمله موج را بررسی نمودند [۲۱]. همچنین در سال ۱۳۹۴، موحدی‌نیا و همکاران به بررسی سکوی دریایی پایه شابلونی با استفاده از تحلیل موج افزایشی پرداختند [۲۲].

ارتفاع موج - دوام ارتفاع موجی می‌باشد که مقدار خرابی مشاهده شده در سازه تا آن ارتفاع موج، بر اساس شاخص خرابی مدنظر کمتر از حد مجاز باشد. (اگر کمی بیشتر شود وارد مرحله کشسان یا تغییرمکان غیر مجاز می‌گردد) تفاوت روش آنالیز موج-دوام نسبت به تحلیل‌های بلند مدت حوزه زمانی در این است که رفتار سازه از ناحیه کشسان شروع شده و با افزایش تدریجی شدت دامنه بارگذاری و توسعه تغییرشکل‌ها وارد ناحیه غیرخطی می‌شود و تا واژگونی کامل سازه ادامه می‌یابد، اما در روش تاریخچه زمانی سازه در مقابل یک شرایط بارگذاری تصادفی ممکن است عملاً وارد ناحیه غیرخطی نشود یا اینکه بلافاصله غیرخطی شود و رفتار کشسان آن پنهان بماند.

از آنجائیکه مطالعه عملکرد سازه در برابر بار تصادفی امواج با دامنه زمانی طولانی، فرآیند زمانبر و پرهزینه‌ای است و تفسیر نتایج به دلیل حجم بالای داده‌ها دشوار است. لذا تعدادی تاریخچه زمانی کوتاه مدت تصادفی که در

ساخت، تعمیر و نگهداری این سازه‌ها، تعیین معیار آستانه فروریزش از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱۲]. با توجه به مرور ادبیات فنی صورت گرفته، در این تحقیق میزان خرابی آستانه فروریزش (CP) توربین بادی دریایی که تحت بارگذاری تاریخیچه زمانی توام موج و باد می‌باشد، تعیین خواهد شد.

۲- تشریح مسئله

در این تحقیق با استفاده از آنالیز باد - موج دوام به بررسی عملکردی سکو و مقایسه پاسخ‌های سازه پرداخته شده است. به طوریکه از دقت آنالیزهای تاریخیچه زمانی طولانی مدت بدلیل استفاده از موج نو مقید شده برخوردار است و همچنین سرعت تحلیلی بالایی نیز دارد. در این تحقیق نشان داده می‌شود به جای آنالیزهای تاریخیچه زمانی ۳ ساعته امواج شکل کوتاه شده، موج نو مقید شده در بازه ۱۲۰ ثانیه می‌تواند استفاده شود و پاسخ‌های سازه برای هر دو آنالیز بسیار نزدیک به هم می‌باشند. لازم به ذکر است، موج نو مقید شده که شکل کوتاه و مختصری از تاریخیچه زمانی طولانی مدت دریا در وضعیت طوفانی مد نظر است، در این تحقیق مبنای بارگذاری امواج در حوزه زمانی بوده است. در این مقاله سکوی توربین بادی OC4 واقع در دریای شمال، که متکی به سازه جاکت است، مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق از OPENSEES که یک نرم‌افزار المان محدود متن باز است که بوسیله Mc Kenna, Mazzoni, Fenves تهیه شده و همچنان در حال تکمیل است، استفاده شده است. این نرم افزار دارای انواع المان‌ها و ویژگی‌های مصالح و روش‌های مختلف آنالیز استاتیکی و دینامیکی است [۱۳].

برای مدلسازی توربین بادی دریایی در این نرم افزار و انجام آنالیز غیرخطی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

• مدلسازی اعضای افقی و پایه‌ها

برای مدلسازی اعضای افقی هر تراز و پایه‌های سکو مانند اعضای قطری از المان تیر ستون غیر خطی استفاده شده است. مقطع بکار رفته برای اعضاء تیر و ستون، مقطع الیافی می‌باشد. این المان‌ها برای مدلسازی المان‌های با ویژگی تیر و ستون و فرض غیرخطی بودن بکار می‌روند. هر چه تعداد تقسیمات المان در طول المان بیشتر

برگیرنده ارتفاع بیشینه موج مورد انتظار نیز است نظیر موج نو مقید شده پیشنهاد می‌گردد.

شایان ذکر است که عمدتاً مفهوم تحلیلی زمان - دوام صرفاً جهت مطالعه لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه بوده است و کاربرد آن در بحث نیروی امواج و سازه‌های در معرض آن کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق با تولید تاریخیچه‌های زمانی کوتاه مدت، افزایشی متناسب با طیف امواج محل، مفهوم تحلیل به روش زمان - دوام به حوزه مسائل مرتبط با نیروی موج، باد و پاسخ دینامیکی متناظر سکوه‌های نوع جاکت بسط داده می‌شود و روشی سریع با عنوان تحلیل دینامیکی غیرخطی به کمک موج نو مقید شده افزایشی معرفی می‌گردد. در این تحقیق صرفاً اثر موج بر روی سکوی انتخاب شده بررسی گردید و با توجه به نوع سکوی تحقیق مورد نظر اثر باد در پاسخ‌های دینامیکی سازه بررسی نگردید.

با کمک این آنالیز از لحظه تسلیم اولیه سازه سکو و ورود به فاز پلاستیک، مقادیر ارتفاع موج و سرعت باد افزایش یافته تا جایی که با اعمال مقدار کمی بیشتر از مرحله قبل، سکو دچار تغییر مکان زیادی گردد به عبارتی در سطح عملکردی مد نظر خرابی، شیب تغییرات برش پایه در برابر تغییر مکان عرشه سکو به میزان بیشتر از ۱۵ درصد تغییر یابد که در این حالت از سطح عملکردی آسیب دیدگی به حالت آستانه خرابی نزدیک می‌گردد. بدیهی است در حالت قبل تسلیم اولیه یا آسیب دیدگی در محدوده عملکردی الاستیک و خطی بدون خرابی خواهد بود [۱۰] و [۱۱].

بطور کلی برای در نظر گرفتن حالات خرابی سازه‌های دریایی، سه سطح عملکردی زیر تعریف می‌شود:

❖ حالت خطی و الاستیک

- ❖ تسلیم‌های موضعی در برخی المان‌های سکو
- ❖ حالت پلاستیک طوری که مقدار کمی افزایش نیرو تغییر مکان‌های زیادی اعمال می‌کند (نزدیک به فروریزش)

هدف از محاسبه و ترسیم منحنی‌های شکست، احتمال رسیدن سازه توربین بادی به هریک از حالات خرابی فوق (تسلیم اولیه و حالت پلاستیک)، بر اساس تابعی از میانگین دوره بازگشت سالانه برای بارهای باد و موج می‌باشد. در این بین در طراحی سازه‌های خاص دریایی مانند توربین بادی فراساحلی، با توجه به هزینه‌های بالای

$$F_D = 0.5\rho_w C_D A (v - \dot{u}) |v - \dot{u}| \quad (2)$$

$$F_I = \rho_w B (C_M \dot{v} - (C_M - 1)\ddot{u}) \quad (3)$$

همچنین برای محاسبه بار باد و نیروهای آیرودینامیکی ناشی از برخورد باد به توربین، از تئوری حرکت المان پره (Blade Element Momentum)، مطابق معادلات (۴) و (۵) استفاده شده است [۱۶].

$$F_{LIFT} = 0.5\rho_{air} V_{rel}^2 C_{Cl} \quad (4)$$

$$F_{DRAG} = 0.5\rho_{air} V_{rel}^2 C_{Cd} \quad (5)$$

با توجه به معادلات فوق، جریان باد بر روی ایرفویل پرها نیروهای آیرودینامیکی Lift و Drag را ایجاد می‌کند. این نیروهای آیرودینامیکی روی پره‌ها و توربین به سه گروه تقسیم می‌شوند. نیروهای آیرودینامیکی ثابت که در اثر سرعت باد ایجاد می‌شوند، نیروهای آیرودینامیکی پریودیک که در اثر برش باد، چرخش روتور و اثر سایه برج توربین ایجاد می‌شوند و نیروهای آیرودینامیکی با نوسانات نامنظم که ناشی از اثرات طوفان و آشفتگی دینامیکی است. برای محاسبه نیروی باد ناشی از این سه گروه از کد FAST و TURBSIM استفاده شده است.

همانطور که پیش‌تر بیان شد، یکی از روش‌هایی که بیشترین میزان دقت را نسبت به روش‌های مشابه تاریخچه‌های زمانی کوتاه مدت دارد، روش زمان-دوام می‌باشد. از آنجائیکه انجام آنالیزهای افزایشی موج نامنظم بسیار وقت‌گیر است لذا از پروفیل موج نو مقید شده به جای پروفیل تاریخچه زمانی ۳ ساعته استفاده می‌شود، پروفیل موج‌های نو مقید شده برای ارتفاع‌های افزایشی مشخصه موج و سرعت باد انجام می‌شود، که ویژگی اصلی این آنالیز، کوتاه مدت بودن آن است و محاسبات بیانگر آن است که بعد از ۶۰ ثانیه اثر موج نو به شدت کاهش یافته و به سمت صفر میل می‌کند و موج نو مقید شده برای زمان بیشتر از ۶۰ ثانیه حدود ارتفاع ماکزیمم تابع موج نامنظمی خواهد بود که بدان مقید شده است. در پروفیل موج نو مقید شده، مقادیر سرعت و شتاب مشابه سینماتیک امواج نامنظم به صورت روابط (۶) و (۷) قابل استخراج است.

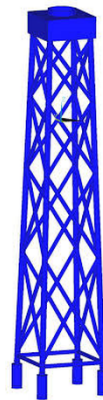
$$F_n(z) = \frac{\cosh k_n(d+z)}{\sinh k_n d} \quad (6)$$

باشد دقت محاسبات بالاتر می‌رود. همچنین شیب ناحیه غیر خطی کرنش سخت شوندگی سه درصد و برای ماکزیمم مقدار شکل پذیری هر عضو نیز عدد بیست لحاظ شده است. در این تحقیق برای مدلسازی کل اعضای سازه از این المان استفاده شده است.

• مدلسازی اعضای قطری

برای مدلسازی اعضای قطری از المان تیر ستون غیر خطی همانند سایر اعضا استفاده شده است، مقطع بکار رفته برای هر عضو بادبند نیز مقطع فایبر می‌باشد، همچنین برای مدل کردن رفتار کمانشی بادبندها یک نقص اولیه معادل با یک هزارم طول المان بادبند بین نقطه تقاطع بادبندها و محل پایه‌ها، اعمال شده است. سایر مفروضات مورد نظر برای این اعضا مانند اعضای افقی و پایه‌های سکو می‌باشد.

لازم به ذکر است جهت دقت بیشتر سختی پیچشی نیز بصورت جداگانه با دستور Section Aggregator به ویژگی‌های مقطع اضافه شده است. همچنین مقاومت تسلیم فولاد ۳۴۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ تصویر مدل ساخته شده به همراه مشخصات هندسه آن، نشان داده شده است.



سازه نگهدارنده توربین	سکوی شابلونی
بادی فراساحلی	
ارتفاع سکو	۶۰ متر
عمق آب	۴۵ متر
قطر خارجی پایه‌ها	۱/۸ متر
ضخامت پایه‌ها	۳۰ میلی‌متر
قطر خارجی مهارها	۰/۸ متر
ضخامت مهارها	۲۰ میلی‌متر

شکل (۱) مدل ساخته شده به همراه مشخصات هندسی آن

همانطور که پیش‌تر بیان شد، رفتار توربین بادی دریایی تحت بارهای دینامیکی ناشی از باد و موج به صورت توام می‌باشد. برای محاسبه نیروی ناشی از موج از معادله اصلاح شده موریسون با توجه به معادلات (۱)، (۲) و (۳) که اثر حرکت‌های نسبی سازه‌ها را در برابر آب در نظر می‌گیرد، استفاده شده است [۱۵].

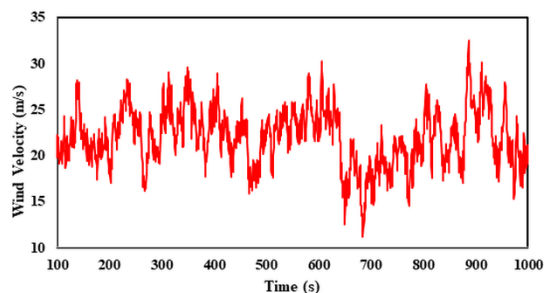
$$F_{hydro} = F_{Morison} = F_D + F_I \quad (1)$$

از آنجائیکه میزان نیروی باد وارده به برج در مقایسه با نیروی باد روی توربین و بار موج بسیار ناچیز است (تقریباً ۰/۰۰۱ نیروی باد روی پره‌های توربین) لذا از اعمال آن در مدل صرفنظر می‌شود.

جدول (۱) حالات مختلف دریایی [۱۸]

وضعیت دریایی	توصیف امواج	سرعت باد (متر بر ثانیه)	ارتفاع موج مشخصه (متر)	پربود امواج (ثانیه)
۱	موجک های ریز	۵-۳	۰/۴-۰	۵-۰/۵
۲	موجک های درشت	۷-۵	۰/۹-۰/۴	۷/۵-۱
۳	موج های ریز	۹-۷	۱/۸-۰/۹	۸/۸-۱/۴
۴	امواج ریز تا متوسط	۱۰-۹	۲/۱-۱/۸	۱۰/۶-۲/۵
۵	امواج متوسط	۱۲-۱۰	۴-۲/۱	۱۳/۵-۲/۸
۶	امواج بزرگ	۱۵-۱۲	۶/۷-۴	۱۵/۵-۳/۸
۷	طوفان متوسط	۲۱-۱۵	۱۳/۷-۶/۷	۲۱-۴/۷
۸	طوفان قوی	۲۸-۲۱	۲۱/۳-۱۳/۷	۲۵-۶/۵
۹	طوفان خیلی شدید	۳۶-۲۸	۳۵-۲۱/۳	۳۰-۱۰

تاریخچه زمانی سرعت باد در تراز ۱۰ متری از سطح دریا که با توجه به داده‌های ترکیب شده باد و موج طبق جدول (۱) متناظر با ارتفاع موج ۱۴/۵ متر است، به صورت شکل (۳) می‌باشد. که برای محاسبه نیروی باد روی برج و همچنین نیروی وارد بر پره‌ها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است مطابق آنچه در مرجع [۱۶] آورده شده است، خروجی‌های تاریخچه زمانی در نرم‌افزار FAST و TURBSIM در بخش اول خود، دارای نتایج غیرواقعی می‌باشند که ناشی از شوک اولیه‌ای است که به سازه وارد می‌شود. فلذا می‌بایست تاریخچه زمانی نیروهای وارد بر توربین بادی و به تبع آن پاسخ سازه را پس از رسیدن به یک شرایط پایدار در نظر گرفت. در این تحقیق نیز از ۱۰۰ ثانیه اول بدلیل شوک وارد شده به سیستم که پاسخ‌های بزرگی بوجود می‌آورد صرفنظر می‌شود.



شکل (۳) تاریخچه زمانی سرعت باد متناظر با ارتفاع موج ۱۴/۵

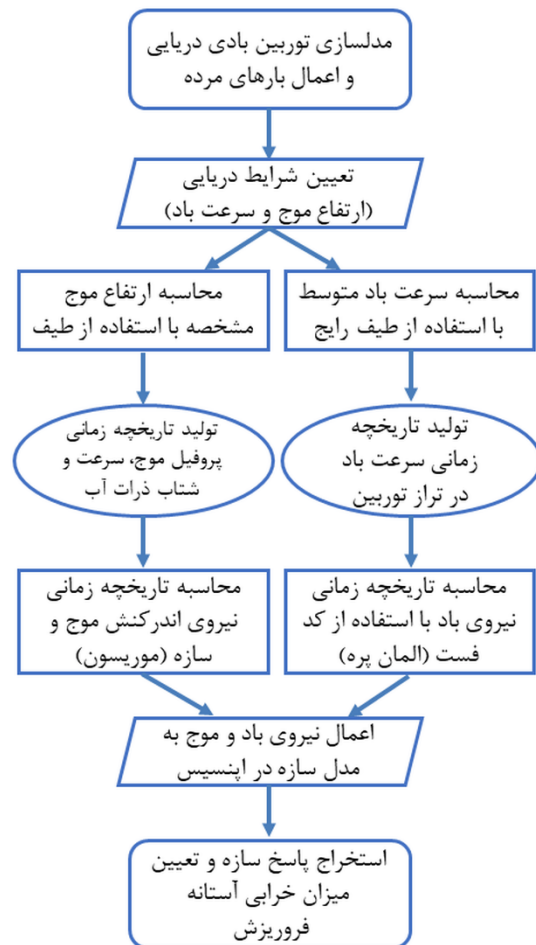
$$G_n(z) = \frac{\sinh k_n(d+z)}{\sinh k_n d} \quad (۷)$$

در روابط فوق، $G_n(z)$ و $F_n(z)$ پارامترهای مقیاس سرعت و شتاب افقی و قائم در عمق z می‌باشند و d مقدار عمق آب است.

با توجه به آنچه در این بخش بیان شد، روندنمای این تحقیق بطور خلاصه در شکل ۲ آمده است.

۳- شرایط اقلیمی

سرعت متوسط باد در تراز ۱۰ متری از سطح دریا و ارتفاع موج مشخصه به صورت جدول (۱) در ارتباط هستند. همچنین نیروی باد روی برج توربین به سرعت متوسط باد در تراز ۱۰ متری از سطح دریا و ارتفاع تا سطح آب بستگی دارد و بصورت استاتیکی به سازه وارد می‌شود و ماهیت دینامیکی ندارد، لذا صرفاً نیروی باد روی توربین در بالاترین تراز آن (تراز ناسل)، به صورت دینامیکی به سازه اعمال خواهد شد [۱۷].

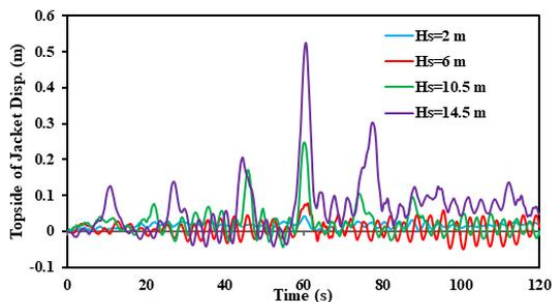


شکل (۲) روندنمای (فلوجارت) تحقیق

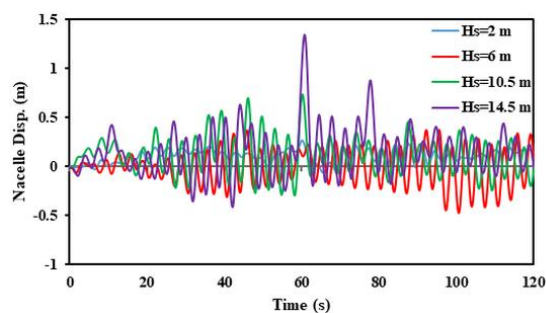
و سکو ترسیم می‌گردد و معیار خرابی CP برای هر دو بخش جاکت و پایه توربین بررسی می‌شود.

شکل‌های (۶) الی (۸) مربوط به تاریخچه زمانی پاسخ‌های سازه برای آنالیز باد - موج می‌باشد، که در ۴ ارتفاع موج مشخصه انتخابی به صورت مقایسه‌ای ترسیم شده است. البته لازم به ذکر است، کلیه مراحل آنالیز برای ارتفاع مشخصه‌های موج تکرار شده و پاسخ‌ها در برابر ترکیب رندم و همزمان بار موج و باد مقیاس شده استخراج شده‌اند.

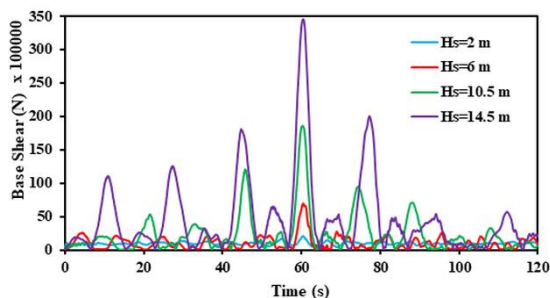
لازم به ذکر است این آنالیز برای مختصات سه نقطه $x_c=+4.5$ ، $x_c=-4.5$ و $x_c=0.0$ انجام شده است. لیکن برای اختصار، نمودارهای مربوط به نقطه $x_c=-4.5$ ارائه می‌شود و در نهایت پاسخ‌های حداکثر تغییر مکان و برش پایه در نقاط فوق در جدول (۲) ارائه خواهد شد.



شکل (۶) تغییر مکان تراز بالای سکوی نگهدارنده

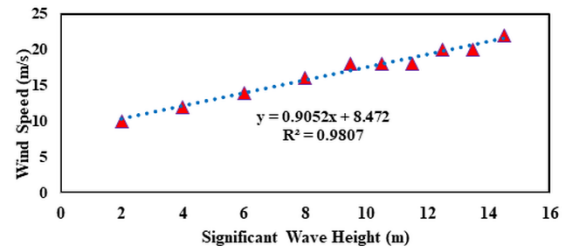


شکل (۷) تغییر مکان تراز ناسل توربین



شکل (۸) برش پایه سازه توربین بادی دریایی

با توجه به جدول (۱) و درونیایی خطی مقادیر متناظر سرعت باد و ارتفاع موج برای بارگذاری مرحله به مرحله بصورت افزایشی بدست می‌آید. شکل (۴) نشان می‌دهد که ارتفاع موج با سرعت باد تقریباً به صورت خطی تغییر می‌کند.

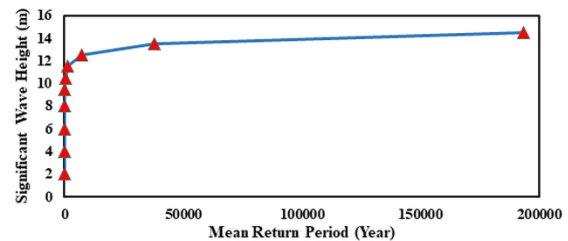


شکل (۴) رابطه بین ارتفاع موج مشخصه و سرعت متوسط باد

همچنین تابع توزیع ارتفاع مشخصه بر حسب دوره بازگشت از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۹].

$$H_s(T_r) = 0.6127 * \ln(T_r) + 7.0 \quad (۸)$$

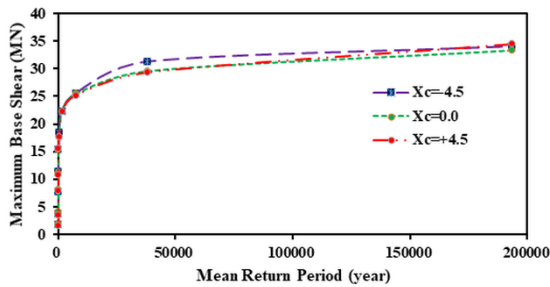
که در این رابطه، مقدار ارتفاع مشخصه موج در دوره بازگشت مورد نظر است و T_r دوره بازگشت بارگذاری بر حسب سال می‌باشد. شکل (۵)، نحوه تغییر ارتفاع مشخصه موج بر حسب دوره بازگشت بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل (۵) دوره بازگشت ارتفاع موج‌های مختلف

۴- نتایج و تفسیر

برای تعیین میزان خرابی آستانه فروریزش توربین بادی دریایی، تاریخچه زمانی تغییر مکان بالای سکو (عرشه سکو) و بالای توربین (تراز ناسل) بر اساس ارتفاع موج اعمال شده و نیروی باد مرتبط می‌بایست بررسی شود. همچنین تاریخچه زمانی نیروی برش پایه سکو در پاسخ به ارتفاع موج مشخصه مورد نظر و نیروی باد مرتبط ترسیم می‌گردد. سپس به کمک رکوردهای تغییر مکان و برش پایه، نمودار پوش برش - تغییر مکان ماکزیمم، برج توربین



شکل (۹) تغییرات برش پایه حداکثر با دوره بازگشت بارگذاری

همانطور که مشاهده می‌شود پاسخ برش پایه سازه در برابر دوره بازگشت بارگذاری‌ها در مختصات‌های مختلف تقریباً مقادیر مشابهی دارد و از برش پایه ۲۲ مگانیوتن به بعد افت زیادی در شیب نمودار مشاهده می‌شود، که با مراجعه به شکل (۸) متناظر با ارتفاع موج حدود ۱۱/۵ متر است، که طبق ارتفاع حد خرابی تعیین شده برای توربین، در این حالت سازه وارد معیار خرابی CP شده است.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله به منظور تعیین میزان خرابی آستانه فروریزش یک توربین بادی دریایی با سکوی نگهدارنده شابلونی، در ابتدا سازه در نرم‌افزار Opensees مدل شد. سپس با استفاده از آنالیز دینامیکی موج- باد دوام مقادیر حداکثر تغییر مکان ناسل توربین، تغییر مکان عرشه سکوی شابلونی و حداکثر برش پای سازه برای ترکیب بارهای مختلف توام باد و موج بدست آمد. با بررسی مختصات مختلف روی سازه مشخص شد، با توجه به ابعاد سازه نسبت به مشخصات بارهای وارده، پاسخ سازه در نقاط مختلف مکانی در جهت انتشار موج و اعمال نیروی باد، تفاوت چندانی ندارد. در نهایت با تعیین میزان خرابی آستانه فروریزش سازه و همچنین دوره بازگشت تکرار بارگذاری متناظر با آن، مشخص شد که ارتفاع موج حد خرابی CP برای این توربین بادی دریایی با سکوی نگهدارنده شابلونی حدود ۱۱/۵ متر می‌باشد که متناظر با برش پایه ۲۲ مگانیوتن، جابجایی تقریبی ۳۰ سانتیمتر در تراز عرشه سکو و جابجایی حدود ۷۰ سانتیمتر در تراز ناسل توربین است.

لازم به ذکر است از آنجائیکه حداکثر ارتفاع موج نو مقیدشده در ثانیه $t=60$ ثانیه رخ می‌دهد، لذا در هر کدام از پروفیل‌های تاریخچه زمانی فوق در ارتفاع‌های امواج معین، حداکثر پاسخ سازه نیز حدود همین زمان اتفاق خواهد افتاد. داده‌های مربوط به نیروی باد در هر ارتفاع موج مطابق به آنچه در بخش قبل بیان شد، در نظر گرفته شده است.

به عنوان اولین نتیجه‌گیری از آنالیزهای فوق می‌بایست بررسی کرد؛ کدام نقطه از محل اعمال موج حداکثر در هر آنالیز باد-موج دوام بحرانی‌تر می‌باشد. به این منظور در هر ترکیب بار می‌باید بحرانی‌ترین میزان تغییر مکان بالای برج توربین‌بادی، تراز عرشه سکو و همچنین برش پایه در هر سه نقطه $x_c=+4.5$ ، $x_c=-4.5$ و $x_c=0.0$ با توجه به جدول (۲) با هم مقایسه گردد.

جدول (۲) مقایسه مقادیر حداکثر در نقاط مختلف

مختصات نقاط	حداکثر برش پایه (مگانیوتن)	حداکثر تغییر مکان ناسل توربین (متر)	حداکثر تغییر مکان تراز عرشه سکو (متر)
$x_c=-4.5$	۳۴/۵۴	۱/۵۳	۰/۵۶
$x_c=0.0$	۳۴/۰۳	۱/۴۳	۰/۵۳
$x_c=+4.5$	۳۳/۸۸	۱/۲۳	۰/۴۷

همانطور که مشاهده می‌شود، محل اعمال پروفیل‌های سطح آب ($x_c=+4.5$ ، $x_c=-4.5$ و $x_c=0.0$) تاثیر چندانی روی پاسخ‌های سازه ندارد، زیرا فاصله بین پایه‌های سکوی توربین‌بادی که بطور متوسط ۹ متر فرض شده است، نسبت به طول موج ریز موج‌های امواج نو مقید شده به سازه (حدود ۱۰۰ الی ۱۵۰ متر) بسیار کم است. لذا تاثیر فاز مکانی روی پاسخ سازه ناچیز است. در نهایت، برای تعیین میزان خرابی آستانه فروریزش، بررسی‌های فوق را می‌توان از منظر دوره بازگشت بارگذاری برای مختصات سه نقطه $x_c=+4.5$ ، $x_c=-4.5$ و $x_c=0.0$ به صورت شکل (۹) انجام داد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مطابق طرح پژوهانه به شماره / BNUT 394097/99 قدردانی می‌نماید.

۶- منابع

- support structures under extreme loading." *Engineering Structures* 79 (2014): 58-69.
- [12] Wei, K., S. R. Arwade, A. T. Myers, S. Hallowell, J. F. Hajjar, and E. M. Hines. "Performance Levels and Fragility for Offshore Wind Turbine Support Structures during Extreme Events." In *Structures Congress 2015*, pp. 1891-1902.
- [13] Mazzoni, Silvia, et al. "OpenSees command language manual. Pacific Earthquake Engineering Research Center." University of California, Berkeley (2007).
- [14] Kaveh, A. Sabeti, S.; "Optimal design Of Jacket Supporting Structures For Offshore Wind Turbines Using Enhanced Colliding Bodies Optimization Algorithm", *International Journal Of Optimization In Civil Engineering*, Vol.9, No.1, p.p. 129-145, 2019.
- [15] Bargi, Khosrow, Reza Dezvareh, and Seyed Amin Mousavi. "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 (2016): 551-561.
- [16] Dezvareh, Reza. "Evaluation of turbulence on the dynamics of monopile offshore wind turbine under the wave and wind excitations." *Journal of Applied and Computational Mechanics* 5.4 (2019): 704-716.
- [17] Veritas, Det Norske. "Design of Offshore Wind Turbine Structure." *Offshore Standard DNV-OS-J101* (2004).
- [18] Doerry, Armin W. "Performance Limits for Maritime Wide-Area Search (MWAS) Radar." (2020).
- [19] Fischer, T., W. E. De Vries, and B. Schmidt. "UpWind design basis (WP4: Offshore foundations and support structures)." (2010).
- [۲۰] متین نیکو، حمید؛ زین الدینی، مصطفی؛ اندرامی، سید مهدی؛ "ارزیابی رفتار دینامیکی غیرخطی سکوه‌های دریایی با به کارگیری تئوری موج نو مقیدشده و روش تحلیلی زمان - دوام"، چهارمین همایش ملی صنایع فراساحل (OIC2011)، ۱۳۹۰.
- [۲۱] متین نیکو، حمید؛ زین الدینی، مصطفی؛ استکانچی، همایون؛ اندرامی، سید مهدی؛ "کاربرد
- [1] Vestergaard, Jens, Lotte Brandstrup, and Robert D. Goddard. "A brief history of the wind turbine industries in Denmark and the United States." *Academy of international business (Southeast USA Chapter) Conference proceedings*. Vol. 2. Academy of International Business, 2004.
- [2] Gaudiosi G and Twidell J (2009), *Offshore Wind Power*, Brentwood: Multi-SciencePub., Essex, UK, Chap. 2.
- [3] Musial, Walter, Sandy Butterfield, and Bonnie Ram. *Energy from offshore wind*. No. NREL/CP-500-39450. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2006.
- [4] Veritas, Norske. *Environmental conditions and environmental loads*. Det Norske Veritas, 2000.
- [5] Dezvareh, R. "Dynamic analysis of tripod offshore wind turbine under wind and wave loads considering water-structure interaction." (2019): 74-82.
- [6] Tromans, Peter S., Ali R. Anaturk, and Paul Hagemeyer. "A new model for the kinematics of large ocean waves-application as a design wave." *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1991.
- [7] Taylor, Paul H., Philip Jonathan, and Léon A. Harland. "Time domain simulation of jack-up dynamics with the extremes of a Gaussian process." (1997): 624-628.
- [8] Cassidy, M. J., R. Eatock Taylor, and G. T. Houlsby. "Analysis of jack-up units using a constrained NewWave methodology." *Applied Ocean Research* 23.4 (2001): 221-234.
- [9] Zeinoddini, M., H. Matin Nikoo, and H. Estekanchi. "Endurance Wave Analysis (EWA) and its application for assessment of offshore structures under extreme waves." *Applied Ocean Research* 37 (2012): 98-110.
- [10] Pinna, Rodney, and Mark Cassidy. "Dynamic analysis of a monopod platform using constrained NewWave." *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Vol. 37440. 2004.
- [11] Wei, Kai, Sanjay R. Arwade, and Andrew T. Myers. "Incremental wind-wave analysis of the structural capacity of offshore wind turbine

روش زمان دوام در طراحی و ارزیابی سازه های دریایی در مقابل نیروی امواج تصادفی" یادداشت فنی، دوره ۳۰۰۲، شماره ۱، صفحه ۱۰۹-۱۱۸، ۱۳۹۳.

[۲۲] موحدی نیا، رضا؛ مهرداد، میر عبدالحمید؛ پورزینلی، سعید؛ "ارزیابی سکوهای دریایی نوع جکت به روش آنالیز موج افزایشی"، مجله علوم و فنون دریایی، دوره ۱۴، شماره ۴، صفحه ۹۸-۱۰۷، ۱۳۹۴.