

ارزیابی عملکرد سکوی توربین بادی فراساحلی با استفاده از روش موج نو قیدشده

علی جعفری^۱، رضا دزواره رسنانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران. پست الکترونیکی: jafari_nasir@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران، پست الکترونیکی: rdezvareh@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۹

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۹/۸/۲۰

چکیده

هدف از این تحقیق ارائه روشی دقیق‌تر و کاربردی‌تر از روش‌های استاتیکی و طیفی، جهت ارزیابی پاسخ سکوهای توربین بادی، تحت بارگذاری تاریخیچه زمانی توام موج و باد می‌باشد. با افزایش شدت بارگذاری در گام‌های متوالی، سکو تا مرحله خرابی پیش رفته و عملکرد سکو تحت بارگذاری‌های مختلف امواج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق از آنالیز باد - موج افزایشی استفاده شده، که مشابه روش IDA در زلزله است. در خاتمه مشاهده می‌شود پاسخ‌های سازه تحت بارگذاری‌های مختلف امواج اختلاف بسیار کمی خواهند داشت. پاسخ سازه نگهدارنده توربین که از نوع سکوی شابلونی می‌باشد، بیشتر تحت تاثیر امواج است. در حالیکه پاسخ‌های برج توربین بیشتر متاثر از نیروی باد روی پره‌های توربین بادی می‌باشد. ارتفاع موج خرابی برای سازه در نقطه‌ای می‌باشد که به ازای تغییر کمی در تغییر شدت بار وارده، تغییر زیادی در پاسخ سازه مشاهده گردد، که در مورد توربین بادی مورد تحقیق به میزان ۱۰،۵ متر می‌باشد. امواج نامنظم کوتاه مدت در این تحقیق به صورت موج نو مقید شده می‌باشد، که جایگزین بسیار مناسبی برای امواج نامنظم با تاریخیچه زمانی طولانی مدت می‌باشد. همچنین بار باد نیز به صورت وابسته به دیتاهای موج، به سازه وارد می‌شود. کلیه مدل‌سازی‌ها و روابط اندرکنشی موج و سازه و نیروی باد در نرم افزار opensees انجام شده است.

کلمات کلیدی: توربین بادی فراساحلی، ارزیابی بر اساس عملکرد، موج نو مقید، آنالیز دینامیکی.

۱. مقدمه

ترتیب استفاده از توربین‌های بادی فراساحل به منظور تولید انرژی پاک در سال‌های اخیر مورد توجه خاصی قرار گرفته است. به نحوی که در سال ۲۰۰۸ به میزان ۳/۷ گیگاوات برق از این منابع تجدیدپذیر در کشورهای اروپایی تامین شده است [۱]. بدلیل اهمیت توربین‌های بادی جهت استفاده از انرژی باد، باید از بابت عملکرد مناسب توربین و سازه نگهدارنده آن تحت بارهای حدی و نهایی دریایی اطمینان حاصل کرد که این مساله مورد تحقیق در این پژوهش می‌باشد.

از زمانی که اولین سکوها مورد استفاده قرار گرفتند، طراحی و تحلیل دقیق آن‌ها ضرورت زیادی پیدا کرد. تولید انرژی‌های سبز در دنیای امروز به یکی از استراتژیک‌ترین مباحث علمی، اقتصادی و حتی سیاسی جوامع تبدیل شده است. در همین راستا باتوجه به امکان استفاده از منابع پایان‌ناپذیر دریایی، تحقیقات وسیعی در زمینه استحصال انرژی از دریا انجام می‌گیرد. به این

نگهدارنده توربین بادی تحت بارهای حدی انجام می‌گیرد. در این پژوهش دو نوع سازه نگهدارنده توربین بادی (جکت و مونوپایل) در دو منطقه با عمق‌های متفاوت در دریا مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و بارگذاری موج و باد در دو حالت توام با دوره بازگشت یکسان (برای موج و باد) و دوره بازگشت‌های متفاوت انجام شده است. در انتها توصیه به استفاده از روش‌های دینامیکی مبتنی بر تاریخچه زمانی برای بررسی واقعی‌تر پاسخ سکو به بارهای موج و جریان نموده است [۵]. در مقاله دیگری تحت عنوان "آنالیز زمان - دوام اصلاح شده موج براساس تئوری موج نو" که توسط مهاجرنسب و همکارانش در سال ۲۰۱۷ انجام شده، از امواج نوی مقید شده اصلاح شده به عنوان توابع موج فزاینده استفاده نموده اند که به جای در نظر گرفتن زمان ۶۰ ثانیه که موج حداکثر در آن رخ می‌دهد، با توجه به ارتفاع موج مشخصه، میزان زمان مورد نظر در هر گام افزایشی محاسبه می‌شود تا دقت محاسبات بالاتر رود. در نهایت این آنالیز با آنالیز سه ساعته تاریخچه زمانی برای یک سکوی فرضی در خلیج فارس مقایسه شده و نتایج قابل قبولی که حاکی از دقت مناسب آنالیز زمان - دوام موج دارد ارائه می‌گردد [۶]. البته از آنجا که تحقیق فوق مربوط به سکوی نفتی بوده و اثرات توام موج و باد در آن دیده نشده است، در پژوهش حاضر برای بررسی اثر توام این دو پدیده بر روی توربین بادی، از تحقیقات دزواره در سال ۲۰۱۹ استفاده شده است [۷ و ۸]. هدف از پژوهش حاضر ارائه روشی دقیق‌تر از استاتیکی و سریعتر از تحلیل دینامیکی تاریخچه طولانی مدت نامنظم امواج و باد است. بطوریکه متناسب با شرایط محیطی دریا و هندسی سازه، ارزیابی رفتار دینامیکی توربین بادی به صورت مناسبی صورت گیرد. در ادامه به جزئیات رویکرد مورد استفاده در پژوهش پیش رو اشاره می‌گردد و نتایج حاصله، بررسی و مقایسه می‌شود.

۲. مشخصات کلی مسئله

سکوی توربین بادی مدنظر در این پژوهش، سکوی OC4 می‌باشد که توسط رامبکونل در یک پروژه میدان بادی^۲ طراحی شده است. توربینی که روی سازه جاکت سوار شده است، به توربین ۵ مگاواتی NREL که توسط جانکمن و همکاران در سال

لذا روش‌های متفاوتی برای تحلیل و ارزیابی سازه نگهدارنده این توربین‌ها، تحت بارهای موج و باد به صورت توام یا منفرد مورد بحث قرار گرفته است. در مناطقی که بدلیل ارتفاع زیاد امواج و ارتفاع زیاد سازه نیاز به تحلیل دینامیکی باشد، صحت نتایج بدست آمده از مدل‌های منظم که رفتار سازه را بصورت استاتیکی تحلیل می‌کنند، مورد بحث خواهد بود. صحیح‌ترین رویکرد تحقیق رفتار دینامیکی سازه‌های دریایی در مقابل نیروی امواج، استفاده از تاریخچه‌های زمانی بلند مدت و نامنظم تراز سطح آب می‌باشد، که با توجه به زمانبر بودن و پیچیده شدن تفسیر نتایج و حجم بالای داده‌ها، نیاز به روش‌های جایگزین با دقت مناسب ولی کوتاه‌مدت است. براین اساس تعدادی از محققین تاریخچه‌های زمانی نامنظم کوتاه مدت مانند موج نو مقید شده را پیشنهاد نمودند که نتایج بدست آمده از تحقیق پاسخ رفتار سازه مشابه با نتایج بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی‌های بلند مدت است.

از جمله روشی تحت عنوان آنالیز زمانی موج دوام یا 'wet' برای سکویهای نفتی شابلونی توسط جهانمرد و همکارانش انجام شده است [۲]. در این تحقیق عملکرد سکوی شابلونی تحت بارهای بیشینه موج به صورت تحلیل تاریخچه زمانی و تولید توابع موج مورد بررسی قرار می‌گیرد و با نتایج رکوردهای تصادفی سه ساعته امواج مقایسه می‌شود و نتیجه‌گیری می‌شود که روش wet از نظر محاسباتی برای تخمین پاسخ‌های سازه‌ای دقت خوبی دارد. همچنین در تحقیق دیگری توسط موحدی‌نیا و همکارانش روش تحلیلی موج افزایشی تشریح شده و برای سکوی مورد تحقیق با استفاده از روش آنالیز موج افزایشی، حد گسیختگی نهایی، موج فروپاشی و منحنی ظرفیت محاسبه شده است. رویکرد مورد استفاده در این تحقیق، تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) بوده است [۳]. پژوهش دیگری توسط زین-الدینی و همکارانش در زمینه آنالیز تاریخچه زمانی موج - دوام انجام گرفته است که در آن سازه جاکت در معرض ۵ نوع از توابع قطار افزایشی موج قرار می‌گیرد و بررسی خرابی سکو تحت معیار cp (شیب منحنی جابه جایی نیرو برابر ۲۰ درصد شیب بخش کشسان منحنی باشد) انجام پذیرفته است [۴]. موضوع مورد تحقیق بعدی توسط وی و همکارانش انجام شده است که در این تحقیق آنالیز باد موج افزایشی روی ظرفیت سازه‌های سکوی

² Wind farm

¹ Wave Endurance Time

$$\zeta_s = 1\% \quad \delta_s = 6\% \quad (2)$$

در نهایت به منظور صحت سنجی، مدل ساخته شده در opensees با مدل sap بصورت زیر مقایسه شده است.

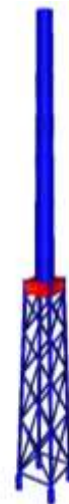
جدول ۱: مقایسه پریود طبیعی سازه در Sap و Opensees

شماره مدل	پریود مدل sap	پریود مدل opensees	اختلاف مدل Sap با opensees (به درصد)
۱	۳/۳۰۶۷	۳/۳۶۴۶	۱/۷۲
۲	۳/۳۰۶۷	۳/۳۶۴۶	۱/۷۲
۳	-/۸۹۰۹	-/۸۹۲۷	-/۲۰
۴	-/۸۹۰۹	-/۸۹۲۷	-/۲۰
۵	-/۳۸۷۷	-/۳۸۹۵	-/۴۶
۶	-/۲۹۸۳	-/۲۹۷۰	-/۴۳

۳. معادلات حاکم

تئوری موج نو بصورت مشخص و قطعی اولین بار توسط ترومانس ارائه گردید [۱۰]. این موج، حاصل ترکیب طیفی گاوسی از شرایط محیطی دریاست که ارتفاع حداکثر امواج یا به عبارتی تراز حداکثر آب نسبت به تراز سطح متوسط آب دریا در شرایط طوفانی مورد نظر متناسب با دوره بازگشت امواج مورد بررسی قابل تعیین است. از طرفی محتمل ترین ارتفاع امواج حدود این تراز حداکثر، قابل محاسبه است و پوش این ترازهای حداکثر ثابت می شود که از یک توزیع نرمال تبعیت می کند. حاصل این محاسبات و پروفیل بدست آمده از سطح آب موج نو نامیده می شود. این پروفیل با مقید شدن به یک موج نامنظم تصادفی (که متناظر با H_s شرایط طوفانی مورد بررسی هست) به صورت یک پروفیل نامنظم و تصادفی به جای یک پروفیل سه-ساعته قابل استفاده است. کاسیدی و همکاران در تحقیق دیگری تحت عنوان "آنالیز دینامیکی سکوی مونوپاد به کمک موج نو مقید شده" با محاسبه ضرایب دینامیکی DAF در هر دو حالت موج نو مقید شده و امواج نامنظم تصادفی صحت و دقت موج نوری مقید شده را اثبات نمودند [۱۱]. از آنجائیکه موج نو مقید شده به ارتفاع حداکثر در شرایط محیطی دریا مقید می شود، لذا می تواند به عنوان یک پروفیل جایگزین از بدترین شرایط دریایی به جای پروفیل های طولانی مدت تاریخیچه زمانی نامنظم برای استخراج حداکثر پاسخ دینامیکی سازه استفاده گردد. تراز ارتفاعی

۲۰۰۹ تعریف شده، مشهور است [۹]. سازه نگهدارنده توربین در عمق ۵۰ متری آب قرار گرفته است. این جاکت چهارپایه، دارای ۴ تراز اعضای ضربدری و همچنین اعضای افقی در تراز نزدیک به بستر است. همچنین ۴ شمع مرکزی از طریق ۴ پایه در بستر تا عمق ۴۵ متری کوبیده شده اند. عرشه سکوی (TP) حد فاصل بین جاکت و برج توربین بادی است و در حقیقت یک بلوک بتنی می باشد که پایه های جاکت در بالاترین قسمت آن را در بر گرفته است. (شکل ۱)



شکل ۱: اسکلت سازه مدل شده oc4

لازم به ذکر است طراحی جاکت شامل اعضای اتصال دهنده ویژه در اعضای ضربدری مطابق با ضوابط آیین نامه ای و ملحقاتی چون آنودها، Jtube و Boat landing می باشد، به طوریکه وزن کل سازه معادل ۳۴۶ تن خواهد شد. در این بخش مدل عددی از سازه نگهدارنده توربین ۵ مگاواتی توصیف شده- است. چگالی فولاد مصرفی، مدول یانگ و ضریب پواسون برای کل سازه از قرار زیر است:

$$\rho_s = 7850 \frac{kg}{m^3} \quad E_s = 2.1E11 \frac{N}{m^2} \quad \nu_s = 0.3 \quad (1)$$

همچنین ضریب دمپینگ بحرانی سازه ای ζ_s و ضریب کاهشی لگاریتمی متناظر با آن δ_s برای تمام مدهای سازه (بدون در نظر گرفتن وزن مجموعه روتور و ناسل توربین) به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۶]:

1 Transition piece

لازم به ذکر است $S_{\eta}(\omega)$ مقدار متناظر طیف موج در تواتر ω ، طیف چگالی انرژی هست که در این تحقیق طیف جانسواپ از لحاظ بهترین تطابق با داده‌های دریای شمال انتخاب شده است و همانطور که مشخص است، انحراف معیار σ در بازه صفر تا بی نهایت از دامنه فرکانسی به صورت رابطه (۷) قابل محاسبه است.

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega) d\omega \quad (7)$$

به عبارتی می‌توان گفت واریانس داده‌های مربوط به ترازهای ارتفاعی در بین دو فرکانس مشخص از تابع طیف، برابر مساحت زیر نمودار مابین آن دو فرکانس است. بنابراین در یک تحلیل گسسته آماری بر حسب N موج ایبری می‌توان تابع موج نو را به صورت رابطه (۶) فرموله نمود.

$$\eta(X, \tau) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \sum_{n=1}^N S_{\eta}(\omega) \Delta\omega \cos(k_n X - \omega_n \tau) \quad (8)$$

ω_n و k_n به ترتیب مقادیر تواتر و عدد موج n ام ایبری هستند که بصورت فوق، تجمیع می‌شوند. لازم به ذکر است در این جا برای آنکه بتوان سینماتیک موج نو را که شامل سرعت و شتاب ذرات آب می‌شود براحتی محاسبه نمود، از تئوری امواج نو خطی که حاصل جمع خطی N موج خطی ایبری است، استفاده گردید. همانطور که پیشتر توضیح داده شد موج نو به تنهایی نمی‌تواند شرایط دریایی مورد نظر را توصیف کند (از نظر تصادفی بودن). لذا با قید کردن آن به یک ارتفاع حداکثر و یک پروفیل نامنظم مجزا این مشکل حل می‌شود. در نهایت موج نو مقید شده نسبت به موج نامنظم غیر قابل تشخیص است، قیود مورد نظر را می‌توان برای یک موج نامنظم دلخواه به صورت رابطه (۹) تعریف نمود. مشاهده می‌شود که در نهایت تابع موج نو مقید شده حاصل می‌شود [۱۳].

$$\eta_c(X, \tau) = \eta_r(X, \tau) + \rho(\tau)(a - \eta_r(0,0)) + \frac{\dot{\rho}(\tau)}{\lambda^2} \eta_r(0,0) \quad (9)$$

مقدار λ^2 از رابطه (۱۰) تعیین می‌شود.

$$m_2 = \lambda^2 \sigma^2 = \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega) \omega^2 d\omega \quad (10)$$

رابطه فوق فرمول نهایی موج نو مقید شده می‌باشد.

یا پروفیل سطح آب در موج نو مقید شده به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$\eta(X, \tau) = \alpha \rho(X, \tau) + g(X, \tau) \quad (3)$$

که $t_c, x_c, \tau = t - t_c, X = x - x_c$ به ترتیب موقعیت مکانی و زمانی تراز حداکثر موج است، ترم اول در معادله فوق محتمل‌ترین تراز ارتفاعی امواج یا همان موج نو مشخصه است و ترم دوم همان قید نامنظم و تصادفی از سطح دریاست. α بیانگر تراز حداکثر سطح دریاست که متناظر با ارتفاع مشخصه امواج دوره بازگشت مورد بررسی یا طوفان مورد نظر است و با استفاده از طیف جانسواپ از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\alpha = 0.58 h_{max} \quad (4)$$

$$h_{max} = \left(\frac{\sqrt{\ln N}}{2} + \frac{0.577}{\sqrt{8 \ln N}} \right) h_s \quad (5)$$

لازم به ذکر است $\rho(X, \tau)$ تابع خود همبستگی از تراز سطح آب است در حالتی که $\alpha=1$ باشد، تابع خود همبستگی همان موج نو واحد خواهد بود. به عبارتی موج نو با ضریب α تابع خود همبستگی را مقیاس می‌کند، تابع خود همبستگی از تراز سطح آب متناسب با تبدیل معکوس فوریه از تابع طیف چگالی انرژی است و به عبارتی نرمال شده آن است.

برای اینکه در $X=0, \tau=0$ تراز سطح آب برابر α شود، لازم است برای ترم دوم در معادله ۳ شرطی تعیین شود. در یک فرآیند گاوسی، انحراف معیار که از صفر در زیر تاج موج تا مقدار σ در فاصله نسبتاً دوری از تاج موج متغیر است، مشخص می‌شود. بنابراین زمانی که تراز تاج موج افزایش می‌یابد، ترم ۱ تعیین کننده‌تر است و می‌تواند به صورت تنهایی در استخراج تراز سطح آب استفاده شود در حالی که در فاصله نسبتاً دوری از تراز حداکثر موج پروفیل سطح آب به ترم ۲ متمایل می‌شود. به عبارتی زمانی که $X \gg x_c$ یا $t \gg t_c$ مقادیر تابع موج نو به سمت صفر متمایل می‌شوند، در حالیکه ترم ۲ مقادیر تصادفی خودش را به تراز سطح آب تحمیل می‌کند. تابع اتوکورولیشن^۱ نیز به صورت رابطه (۶) تعریف می‌گردد.

$$\rho(\tau) = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (6)$$

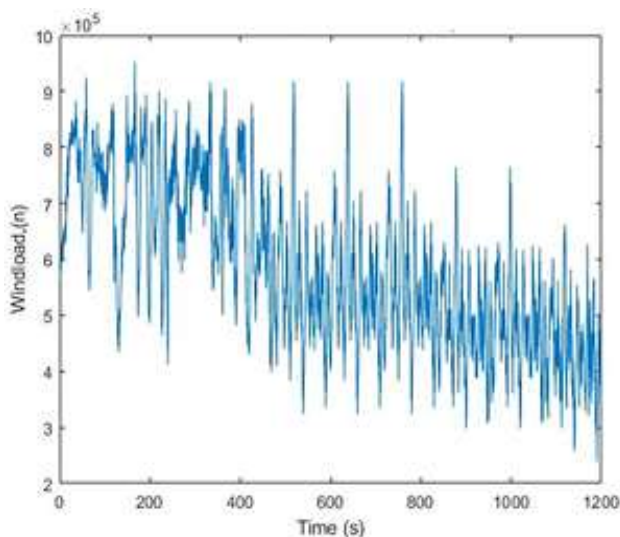
¹ Autocorrelation Function

۴. نتایج و بحث

Fast در حالت دریایی متناظر استفاده شده است. بدین صورت که برای سرعت متوسط ۱۲ متر بر ثانیه در تراز ۱۰ متری، بیشترین نیروی باد بر پره‌های توربین اعمال می‌شود.

برای رسم پروفیل باد از داده‌های موج و باد مرتبط در دریای شمال در منطقه‌ای که سکو نصب شده استفاده شده است. در این حالت ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع موج نیروی باد روی پره‌های توربین کم می‌شوند که حاکی از طراحی صحیح توربین بادی می‌باشد، که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است برای اعمال بار باد به سازه در هر ۱۲۰ ثانیه بخش مربوطه به صورت مجزا در کنار پروفیل موج که در ادامه توضیح داده می‌شود به سازه اعمال می‌گردد. پروفیل قطار افزایشی موج $Icnw1^2$ (موج مقید افزایشی دلخواه) به صورت شکل ۳ می‌باشد.

برای محاسبه سینماتیک امواج در هر ۱۲۰ ثانیه که شامل خروجی پروفیل و سرعت و شتاب لحظه‌ای امواج است، از برنامه متلب استفاده شده است. بدین صورت که تحت تاثیر یک ارتفاع مشخصه که از ارتفاع ۲ متر شروع شده و به ارتفاع ۱۴٫۵ متر خاتمه می‌یابد پروفیل‌های امواج در هر ۱۲۰ ثانیه به صورت جدا از هم به سازه اعمال می‌گردد. به همین ترتیب با تغییر بخش نامنظم، موج نوی مقید شده $Icnw2$ و $Icnw3$ بدست می‌آید.



شکل ۲: پروفیل نیروی باد متناظر با ارتفاع مشخصه افزایشی امواج

روند ارزیابی عملکرد سکوه‌های موجود به کمک روش معرفی شده در این پژوهش با عنوان موج نو مقید شده افزایشی، به شرح زیر می‌باشد:

(۱) انتخاب مدل سکو و تعیین مشخصات اولیه و بارهای ثقلی و سایر اطلاعات لازم.

(۲) مدل سازی سکو در نرم افزار Opensees با استفاده از المان های تیر- ستون غیرخطی و مقاطع فایبر.

(۳) انجام آنالیز مودال جهت بدست آوردن پریود ارتعاشی مد اول.

(۴) انجام آنالیز موج نوی مقید شده و باد افزایشی برای محاسبه تغییر مکان ها و برش پایه

(۵) استخراج خروجی‌های مورد نیاز از هر آنالیز دینامیکی غیر خطی شامل (a) ماکزیمم مطلق تغییر مکان عرشه و توربین (b) ماکزیمم مطلق برش پایه

(۶) رسم منحنی $IWWA^1$ برای مدل (هر کدام از بارگذاری- های فوق تا مرحله فروریزش سازه ادامه می‌یابد و منحنی پاسخ سازه بر حسب برش پایه- تغییر مکان بالای عرشه و برج توربین بادی رسم می‌گردد)

(۷) مقایسه نمودارهای فوق و نتیجه‌گیری

برای محاسبات اندرکنش موج و سازه، از معادله مورین اصلاح شده استفاده شده است. همچنین با این کار به صورت غیرمستقیم میرایی هیدرودینامیکی آب نیز لحاظ شده است، زیرا در زمانی که حتی موج وجود ندارد، این کد نویسی قابلیت دیدن محیط آبی را داراست، زیرا در هرگام زمانی انجام محاسبات سرعت و شتاب نسبی موج و سازه را در معادله مورین اعمال می‌کند. با فرض عدم حضور موج و حضور صرفاً نیروی باد، فقط سرعت و شتاب سازه بر معادله به صورت یک نیروی مقاوم اثر می‌گذارند، که این همان اثر هیدرودینامیکی آب بر روی سازه است. البته اثر جرم افزوده ناشی از وجود المان‌ها در آب نیز بر معادله مورین و مدل‌سازی اولیه سکو که پریود سازه را محاسبه می‌نمود، دیده شده است.

لازم به ذکر است جهت محاسبه بار دینامیکی باد از نرم افزار

² Incremental new wave

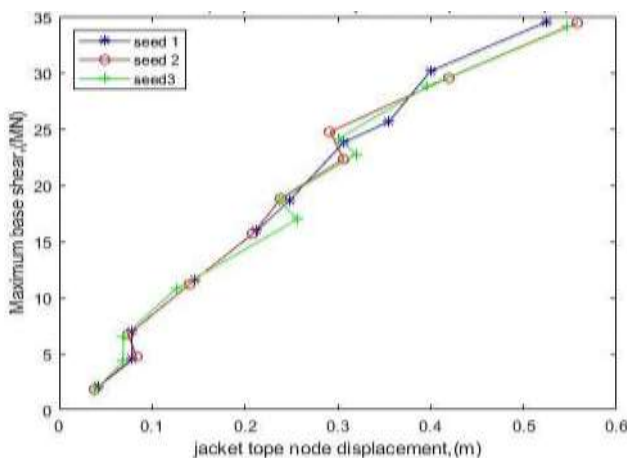
¹ Incremental wave-wind analysis

صورت مجزا به سازه اعمال می‌شود. با اعمال بارهای فوق به سکو پاسخ‌های حداکثر، در هر گام زمانی ۱۲۰ ثانیه استخراج می‌گردد. توجه گردد نمودار شکل ۳ قطار به هم پیوسته‌ای از بارهای وارد بر سکو در هر ۱۲۰ ثانیه است که می‌بایست به صورت مجزا در فواصل زمانی ۱۲۰ ثانیه ای به سکو وارد شود. هر ۱۲۰ ثانیه متناظر با یک ارتفاع مشخصه می‌باشد. بدین صورت که کلیه مراحل آنالیز برای ارتفاع مشخصه‌های موج جدول ۲، تکرار شده و پاسخ‌ها در برابر ترکیب تصادفی و همزمان بار موج و باد سازگار شده استخراج شده‌اند. با توجه به ۱۰ ارتفاع مشخصه در تکرارهای فوق می‌بایست قطار امواج به هم پیوسته و پروفیل باد در ۱۲۰۰ ثانیه به منظور نمایش کلی بارگذاری‌های سازه ترسیم گردد. لیکن در هر مرحله از بارگذاری، داده‌های مربوط به یک ۱۲۰ ثانیه از موج مشخصه و نیروی باد به سازه اعمال می‌گردد.

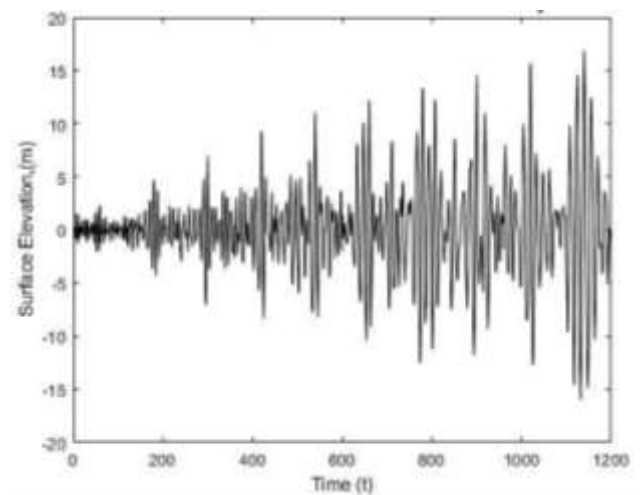
جدول ۲: حداکثر ارتفاع امواج و پریود موج متناظر بر حسب دوره بازگشت بارگذاری

T_r (yr)	H_s (m)	V_w ($\frac{m}{s}$)	TWave (s)
۱۹۳۳۶۸	۱۴/۵	۲۲	۲۵
۳۷۸۰۶	۱۳/۵	۲۰	۲۲
۷۳۹۲	۱۲/۵	۲۰	۲۰
۱۴۴۵	۱۱/۵	۱۸	۱۷
۲۸۳	۱۰/۵	۱۸	۱۶
۵۵	۹/۵	۱۸	۱۶
۵	۸	۱۶	۱۵
۰/۱۸۲۶	۶	۱۴	۱۴
۰/۰۰۷۰	۴	۱۲	۱۲
۰/۰۰۰۳	۲	۱۰	۸

در ادامه، مقادیر حداکثر پاسخ تغییر مکان و برش پایه بر اساس بارهای موج باد سازگار شده می‌بایست استخراج گردد و پوش تغییر مکان و برش پایه بصورت شکل‌های ۵ تا ۸ ترسیم می‌گردد.

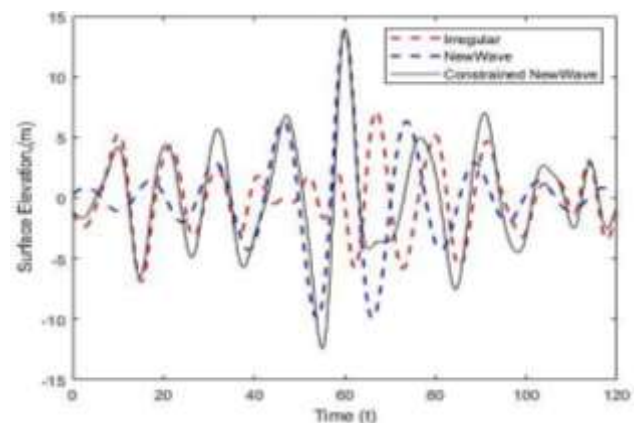


شکل ۵: نمودار برش پایه در برابر تغییر مکان عرشه



شکل ۳: پروفیل افزایشی سطح آب Icnw1

لازم به ذکر است از آنجائیکه انجام آنالیزهای افزایشی موج نامنظم بسیار وقت گیر است، از پروفیل موج نو مقید شده به جای پروفیل تاریخیچه زمانی ۳ ساعته استفاده می‌شود. پروفیل موج‌های نو مقید شده برای ارتفاع‌های افزایشی مشخصه موج و سرعت باد در هر ۱۲۰ ثانیه انجام می‌شود، که ویژگی اصلی این آنالیز، کوتاه مدت بودن آن است و محاسبات بیانگر آن است. بعد از ۶۰ ثانیه از وقوع حداکثر ارتفاع موج، اثر موج نو به شدت کاهش یافته و به سمت صفر میل می‌کند و موج نو مقید شده برای زمان بیشتر از ۶۰ ثانیه، اطراف ارتفاع ماکزیمم تابع موج نامنظمی خواهد بود که بدان مقید شده است (شکل ۴).



شکل ۴: مدل موج نو، موج نامنظم و موج نامنظم مقید شده

لذا انجام آنالیز بعد از این زمان حائز اهمیت نخواهد بود. برای آنالیز باد - موج افزایشی که موضوع اصلی این تحقیق است نیز پروفیل‌های افزایشی امواج و باد در مدت زمان‌های ۱۲۰ ثانیه به

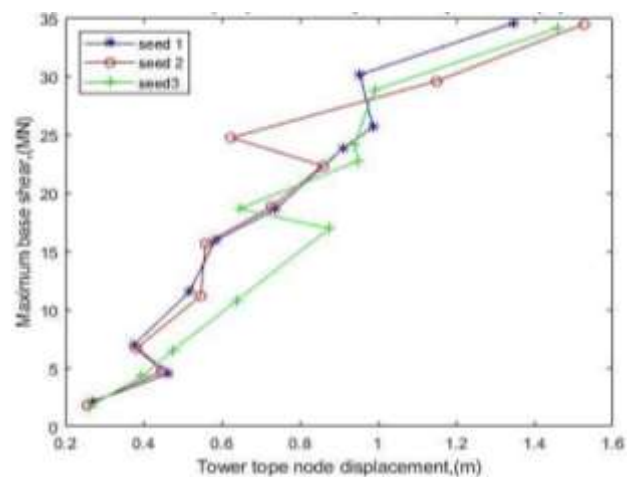
Seed به این صورت است که ترکیب تصادفی فاز موج های منفرد در تولید موج نامنظم به یک فرمت خاص است. به نحوی زمانی که در برنامه متلب Seed=۱ جایگذاری شود، در هر زمان که خروجی سرعت و شتابها استخراج گردد، یک نوع خروجی و یک نوع پروفیل موج رویت می شود. لیکن شکل این پروفیل و مقادیر سرعت شتاب برای Seed=۲ متفاوت است.

توجه گردد seed1 اشاره به بخش نامنظم و تصادفی از موج نوی مقید شده دارد، که تولید کننده Icnw1 می باشد. نمودارهای ۵ الی ۸ پوش برش پایه و ارتفاع مشخص موج در برابر تغییر مکان بالای عرشه و توربین می باشد. از آنجاییکه سازه نگهدارنده یا جاکت مجزا از سازه برج توربین است، لذا نمودارهای آنها جداگانه ترسیم گردید، تا تاثیر نیروی موج و باد رو هر دو سازه بهتر تحقیق گردد. ملاحظه می شود پاسخ های تغییر مکان عرشه و برش پایه طبق شکل ۵ برای سکوی مورد نظر در تمام حالات امواج اعمال شده به سکو بسیار نزدیک به هم می باشد. اما تغییر مکان پایه توربین طبق شکل ۶ چندان نزدیک بهم نیست.

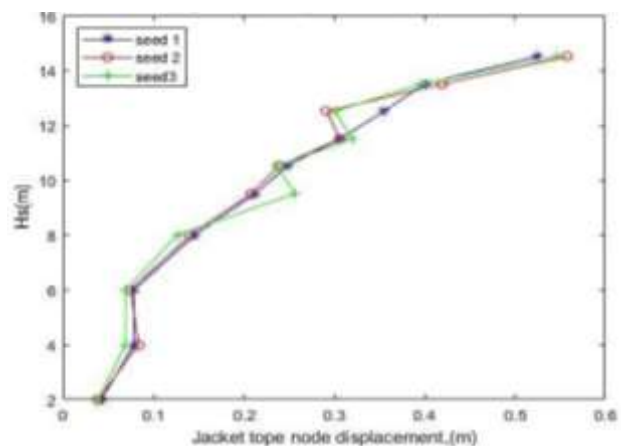
دلیل این مساله آن است که برج توربین، سازه حساس تری نسبت به سکوی نگهدارنده تحت تاثیر امواج است. پاسخ های مربوط به سه موج افزایشی دلخواه Icnw1, Icnw2, Icnw3 که حالات تصادفی متفاوتی از امواج نامنظم را با موج نو مقید می کند، با توجه به معیار خرابی CP سازه جاکت و توربین با ارتفاع موج تقریبی ۱۰،۵ متر در آستانه خرابی قرار می گیرد. شایان ذکر است اولین بار حد خرابی CP برای سکوی دریایی توسط گل فشانی و همکاران مطرح گردید که معادل قسمتی از منحنی است که شیب ثانویه نمودار بیست درصد شیب اولیه نمودار گردد [۱۳].

تاریخچه زمانی پاسخ های سازه برای هر کدام از ترکیب بارهای فوق (Seed 1, Seed 2, Seed 3)، در مقادیر پاسخ حداکثر، بسیار نزدیک به یکدیگر می باشد و در سایر لحظات مقادیر کمتر اما متفاوت وابسته به نوع ترکیب بار به خود می گیرد. (شکل های ۹ الی ۱۴).

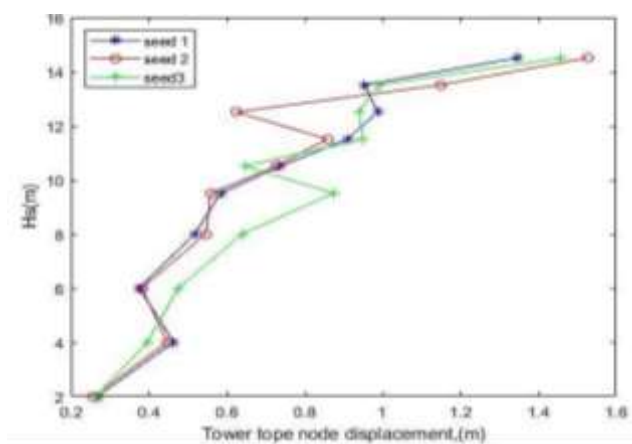
همانطور که ملاحظه می شود پاسخ های سازه برای Seed های ۱ و ۲ بسیار شبیه به هم می باشد (مخصوصا در نقاط حداکثر برای هر بازه زمانی)، نمودارهای مربوط به seed3 از آنجا که مشابه نمودارهای ۹ الی ۱۴ می باشد جهت اختصار آورده نمی شود.



شکل ۶: نمودار برش پایه در برابر تغییر مکان بالای برج توربین

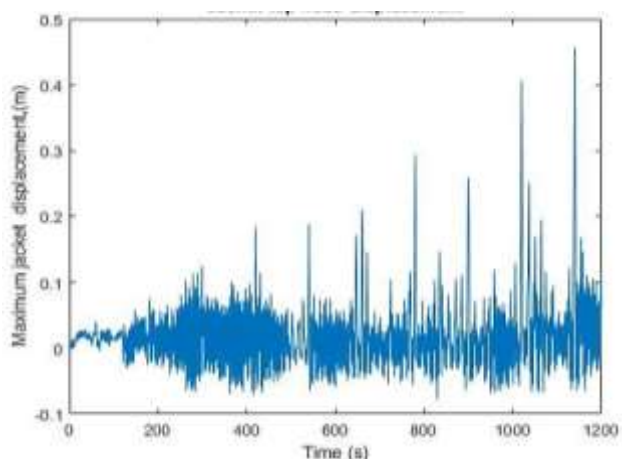


شکل ۷: نمودار ارتفاع مشخصه موج در برابر تغییر مکان عرشه

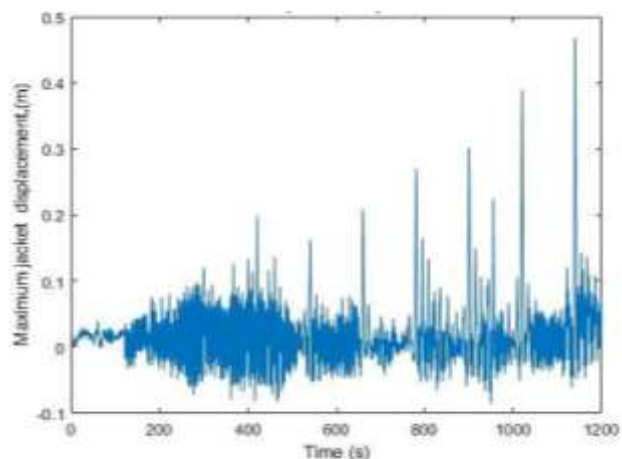


شکل ۸: نمودار ارتفاع مشخصه موج در برابر تغییر مکان بالای برج توربین بادی

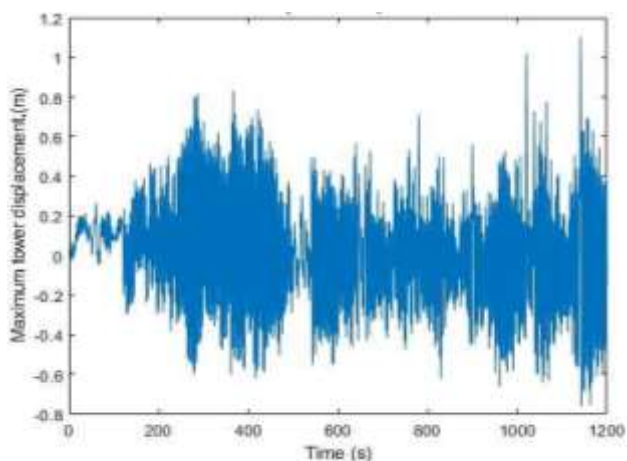
با استفاده از برنامه نویسی انجام شده در متلب هر ۳ مورد پروفیل های افزایشی در این پژوهش ترسیم شده است. عملکرد هر



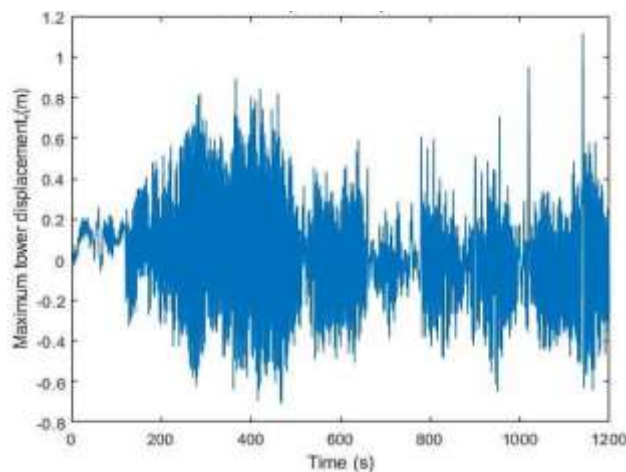
شکل ۱۲: تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه جاکت برای آنالیز یاد-موج افزایشی Seed 2



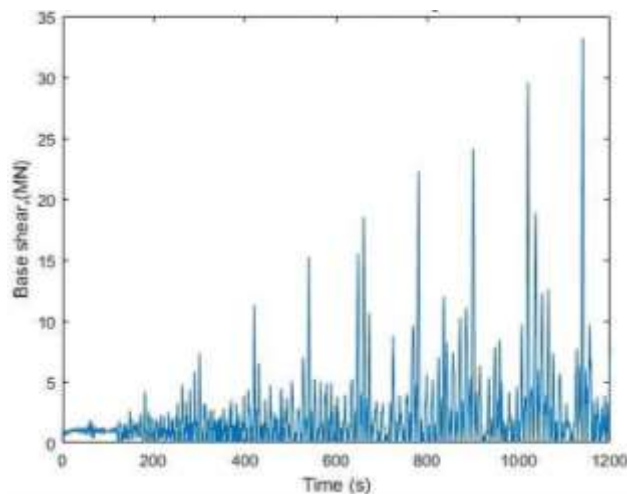
شکل ۹: تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه جاکت برای آنالیز باد - موج افزایشی Seed 1



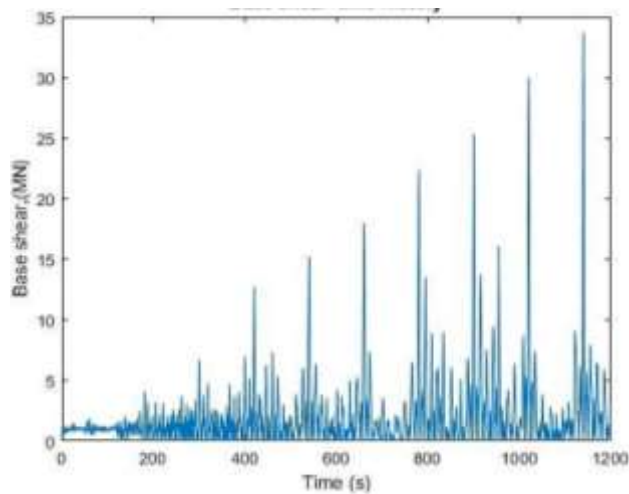
شکل ۱۳: تاریخچه زمانی تغییر مکان بالای توربین بادی برای آنالیز یاد-موج افزایشی Seed 2



شکل ۱۰: تاریخچه زمانی تغییر مکان بالای توربین بادی برای آنالیز باد - موج افزایشی Seed 1



شکل ۱۴: تاریخچه زمانی برش پایه سکو برای آنالیز یاد-موج افزایشی Seed2



شکل ۱۱: تاریخچه زمانی برش پایه سکو برای آنالیز باد - موج افزایشی Seed1

۵. نتیجه گیری کلی

منابع

- Marino, Enzo. An integrated nonlinear wind-waves model for offshore wind turbines. Vol. 22. Firenze University Press, 2011.
- Jahanmard, Vahidreza, Mohammad Ali Dastan Diznab, Hamid Mehdigholi, Mohammad Reza Tabeshpour, and Mohammad Saeed Seif. "Performance-based assessment of steel jacket platforms by wave endurance time method." *Ships and Offshore Structures* 12, no. 1 (2017): 32-42.
- Movahedini, R. E. Z. A., M. A. Mehrdad, and S. A. I. E. D. Pourzeinali. "Assessment of flexed jacket platform using incremental wave analysis." *Journal of Marine Science and Technology* 14, no. 4 (2014): 98-107.
- Zeinodini, 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.
- Wei, Kai, Sanjay R. Arwade, and Andrew T. Myers. "Incremental wind-wave analysis of the structural capacity of offshore wind turbine support structures under extreme loading." *Engineering Structures* 79 (2014): 58-69.
- Mohajernassab, Saeed, Mohammad Ali Dastan Diznab, Hamid Mehdigholi, Mohammad Saeed Seif, and Mohammad Reza Tabeshpour. "Modification of endurance wave analysis based on New-wave theory." *Ships and Offshore Structures* 12, no. 3 (2017): 330-340.
- 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, no. 4 (2019): 704-716.
- Dezvareh, Reza. "Application of Soft Computing in the Design and Optimization of Tuned Liquid Column-Gas Damper for Use in Offshore Wind

تأثیر بخش نامنظم موج نو مقید شده که در این پژوهش با Seed نشان داده شده است، تا زمانیکه سازه، غیرخطی نشده، ناچیز می باشد و پاسخ های سازه بیشتر تحت تاثیر ارتفاع حداکثر موج نو مقید شده می باشد. دلیل این مهم آن است که در هر بازه زمانی ۱۲۰ ثانیه که بار موج نوی مقید شده به سازه وارد می شود، حداکثر ارتفاع موج در زمان $t=60s$ اعمال شده و موج نوی مقید شده در اطراف این ارتفاع موج بیشتر تابع موج نوی منفرد است تا بخش نامنظم آن. لیکن هر چه از این ارتفاع حداکثر، دورتر گردد موج نو به سمت صفر میل می کند و موج نوی مقید شده بیشتر تابع موج نامنظم که بدان مقید شده می گردد (مراجعه گردد به شکل ۴). لذا از آنجاییکه پاسخ حداکثر در هر بازه زمانی ۱۲۰ ثانیه تابع ارتفاع حداکثر موج است و در وسط بازه زمانی رخ می دهد، تاثیر بخش نامنظم امواج نومقید شده یا همان seed ها ناچیز خواهد بود. همچنین با مقایسه شکل ۹ و ۱۰ اینگونه برداشت می شود، سازه نگهدارنده در اینجا که از نوع شابلونی می باشد، حساسیت کمتری نسبت به بارهای وارده دارد، اما سازه برج توربین که به صورت یک استوانه مجزا می باشد، تحت تاثیر متقابل باد و امواج وارده قرار دارد. زیرا با بررسی شکل ۱۰ که شباهت زیادی به شکل ۳ دارد می توان دریافت که پاسخ سازه جاکت بیشتر تحت تاثیر امواج وارده به سازه می باشد. همینطور با بررسی شکل ۱۰ می توان به این نتیجه رسید پاسخ پایه توربین بادی به دلیل مشابهت بیشتر به شکل ۲ تحت تاثیر همزمان نیروی باد و موج خواهد بود. لازم به ذکر است ارتفاع موج خرابی سازه توربین بادی تحت اثر همزمان باد و موج به میزان ۱۰،۵ متر می باشد که تابع میزان حداکثر ارتفاع موج و نیروی باد در هر بازه زمانی ۱۲۰ ثانیه متوالی است که به سکو اعمال می گردد و فازهای تصادفی امواج وارده بر سازه تاثیر محسوسی در این ارتفاع موج ندارند. همانطور که نشان داده شده است خرابی جاکت بیشتر تحت تاثیر امواج است و قبل از خرابی برج توربین که بیشتر تحت تاثیر باد است، اتفاق می افتد.

۶. سپاسگزاری

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

- Pinna, Rodney, and Mark Cassidy. "Dynamic analysis of a monopod platform using constrained NewWave." In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 37440, pp. 141-148. 2004.
- 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.
- Golafshani, A. A., V. Bagheri, Hs Ebrahimian, and Tore Holmas. "Incremental wave analysis and its application to performance-based assessment of jacket platforms." Journal of Constructional Steel Research 67, no. 10 (2011): 1649-1657.
- Chakrabarti, Subrata. Handbook of Offshore Engineering (2-volume set). Elsevier, 2005.
- Turbines." International Journal of Coastal and Offshore Engineering 2, no. 4 (2019): 47-57.
- Jonkman, Jason, Sandy Butterfield, Walter Musial, and George Scott. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. No. NREL/TP-500-38060. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- Tromans, Peter S., Ali R. Anaturk, and Paul Hagemeyer. "A new model for the kinematics of large ocean waves-application as a design wave." In The First International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1991.