شبیه‌سازی سه‌بعدی مونوپایل تحت بار توأم موج و باد در خاک با قابلیت روانگرایی

سیده فاطمه احمدتبار[۱] ، علی عسگری[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، دانشکده‌ی مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران، آدرس پست الکترونیکی (fatemeh.ahmadtabar76@gmail.com)
[۲] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران، آدرس پست الکترونیکی (a.asgari@umz.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷

کلمات کلیدی:
توربین بادی فراساحلی
باد
موج
مونوپایل
اپنسیس

چکیده

با گذشت سال‌ها استفاده از انرژی‌های فسیلی، در حال حاضر استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر رشد روزافزونی دارد. توربین‌های بادی فراساحلی یکی از شیوه‌های بهره‌مندی از انرژی‌های پاک است. این نوشتار به بررسی پاسخ‌های دینامیکی توربین بادی فراساحلی بر روی مونوپایل در خاک ماسه‌ای اشباع تحت بار باد و موج به طور مجزا و توأما می‌پردازد. بار باد با کمک تابع چگالی طیفی و تحت سرعت‌های مختلف محاسبه و به پره و برج توربین اعمال می‌شود. برای شبیه‌سازی امواج تصادفی از طیف پیرسون-موسکوویتز و محاسبه نیروی امواج دریا بر بدنه مونوپایل از تئوری پراش استفاده می‌شود. مدل‌های مورد بررسی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و به کمک زبان برنامه نویسی TCL نوشته شده است و با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اپنسیس، تحلیل می‌شوند. تأثیرات چندین پارامتر بر روی پاسخ‌های دینامیکی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که لازم است ترکیبی از بار باد و موج در طراحی توربین بادی فراساحلی در نظر گرفته شود.

3D simulation of monopile under wave and wind loads in liquefiable soil

Seyedeh Fatemeh Ahmadtabar[1], Ali Asgari[2*]

[1] M.Sc. Student, Department of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran; email address (fatemeh.ahmadtabar76@gmail.com)
[2] Assistant Professor of Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran; email address (a.asgari@umz.ac.ir)

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 11 Aug. 2021
Accepted: 19 Oct. 2021

Keywords:
Offshore wind turbine
Wind
Wave
Monopile
OpenSees

ABSTRACT

After years of using fossil fuels, the use of renewable energy is now growing. Offshore wind turbines are one of the ways to benefit from clean energy. This article studies the dynamic reactions of offshore wind turbine (OWT) supported on monopile foundation in saturated soil under wave and wind loads separately and combined. The wind load was calculated using the power spectral density function with different velocities and applied to the turbine blade and the turbine tower. To modeling the random waves the Pierson-Moskowitz spectrum is used and the force of sea waves on the body of monopile calculation is based on the diffraction theory. The models are simulated in three-dimensional and written with the help of TCL programming language and analyzed with open-source software OpenSees. The effects of several factors on the dynamic responses of the models are investigated. The results are shown that it is essential to examine the combination of wave and wind loads in the analysis and design of OWT.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

۱- مقدمه

فناوری‌های انرژی باد فراساحلی طی ۱۰ سال گذشته توسعه سریعی را تجربه کرده‌اند. در پایان سال ۲۰۲۰، ۲۵۰۱۴ مگاوات با مجموع ۵۴۰۲ توربین بادی در ساحل در حال کار بودند [۱]. بسته به عمق مختلف آب و ظرفیت نصب، می‌توان از انواع مختلف فونداسیون استفاده کرد [۲]. در اعماق کم و متوسط آب می‌توان از توربین با فونداسیون ثابت، شامل مونوپایل‌ها، پایه‌های ثقلی، سکوی سه‌پایه و چهارپایه استفاده کرد. ولی در اعماق آب بیشتر، از توربین با فونداسیون شناور، همانند سیستم‌های نیمه غوطه‌وری، نیمه شناور کابلی و اسپار می‌توان استفاده کرد. مونوپایل‌های مورد استفاده در صنعت باد در ساحل به طور معمول استوانه‌های فولادی توخالی با قطر بزرگتر از ۳ متر هستند. در حال حاضر، مونوپایل‌ها به دلیل سادگی در مراحل طراحی، ساخت و نصب رایج‌ترین نوع پایه مورد استفاده برای توربین‌های بادی فراساحلی هستند [۳].

انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی یکی از بهترین منابع برای مقابله با تغییرات آب و هوایی و کمبود سوخت‌های فسیلی هستند [۴]. انرژی‌های مختلف اقیانوس در حال بررسی است که شامل باد فراساحلی، موج، دامنه جزر و مد، جریان‌های دریایی و ... است [۵]. طبق گزارشات انجام شده توسط اوهلن‌فرست فناوری‌های توربین بادی دریایی شتاب قابل توجهی را در سراسر جهان مشاهده کرده‌اند، به طوری که این بخش در سال ۲۰۱۹ رکورد ۶.۱ گیگاوات را کسب کرده است [۶]. تعداد زیادی توربین بادی با پایه‌های مونوپایل در آب‌های نسبتا کم عمق با عمق کمتر از ۳۰ متر ساخته شده است [۷]. به عنوان یک سازه فراساحلی، مونوپایل‌های توربین بادی دریایی نه تنها تحت بارهای آیرودینامیکی ناشی از باد بلکه به بارهای هیدرودینامیکی ناشی از موج و جریانات نیز مبتلا می‌شوند [۸]. بارهای موج بزرگی که به طور مکرر اتفاق می‌افتند، می‌توانند باعث خستگی و تغییر شکل جانبی المان‌های سازه‌ای و فونداسیون آن شوند [۹]. از این رو، در مونوپایل‌های توربین‌های بادی فراساحلی یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها مربوط به نحوه طراحی آن‌ها است [۱۰]. امروزه استفاده از منابع تجدیدپذیر نظیر انرژی باد اهمیت بسیاری دارد. نصب توربین‌های بادی در اکثر کشورهایی که به دریا دسترسی دارند رشد روزافزونی دارد، این امر به دلیل افزایش سرعت باد در دریاها می‌باشد. چندین کیلومتر مرزهای آبی که در شمال و جنوب کشور ایران وجود دارند، می‌تواند باعث بهره‌بردن آن از این انرژی‌های پاک در دریاها شود [۱۱].

انتقال توربین‌های بادی از خشکی‌ها به دریاها به دلیل افزایش بارهای محیطی نظیر باد، موج، جریان و ... باعث به وجود آمدن مسائل جدیدی در نصب این سازه‌ها می‌شود [۱۲]. لذا بررسی رفتار دینامیکی این توربین‌ها تحت بارگذاری توأم باد و موج بسیار پر اهمیت است. به همین دلیل یکی از معیارهای اصلی طراحی برای بسیاری از جزئیات سازه‌های نگهدارنده توربین‌های بادی دریایی، بررسی اثر بارگذاری ترکیبی باد و موج است [۱۳].

برای بررسی تأثیری که نیروهای آیرودینامیکی باد بر روی سازه نگهدارنده توربین بادی دریایی می‌گذارند مطالعات فراوانی انجام شده است؛ برای مثال در پژوهش انجام شده توسط فیض‌اله زاده و محمودی به بررسی توربین بادی دریایی با سکوی ثابت تک شمعی با نیروی تراست پرداخته‌اند [۱۴]. همچنین در مطالعه جانکمن و بوهل توربین بادی شناور دریایی را به صورت عددی مدل‌سازی کرده‌اند [۱۵]. در نهایت جانکمن و همکاران با کدنویسی در نرم‌افزار متلب، به شبیه‌سازی یک توربین بادی دریایی با پایه مونوپایل تحت بارهای آیرودینامیکی ناشی از باد و هیدرودینامیکی ناشی از موج پرداخته‌اند [۱۶]. پژوهش‌های انجام گرفته یک برنامه متن‌باز به نام فست[1] را ارائه کرد که قابلیت تحلیل دینامیکی توربین‌های بادی دریایی را تحت هر نوع بارگذاری دارد.

اثر مشترک موج و زلزله روی مونوپایل فراساحلی توسط ژنگ و همکاران با استفاده از سیستم شبیه‌سازی مشترک زلزله، موج و جریان مورد مطالعه قرار گرفت. تمرکز این مطالعه بر اثر تلفیقی موج-زلزله در جهت یک خط مستقیم قرار داشته و نتایج مربوط به شتاب اوج ناسل و ضرایب تقویت دینامیکی نشان دادند که چشم‌پوشی از اثر موج در تحلیل لرزه‌ای منجر به تخمین دست پایین پاسخ سازه به ویژه هنگام حساسیت دینامیکی بالای مونوپایل شده و حداکثر شتاب سازه تحریک شده تحت شرایط دریایی متوسط قابل مقایسه با یک زلزله متوسط است [۱۷, ۱۸].

در تحقیقات انجام شده توسط چن و همکارانش به ارائه یک مدل سه بعدی موج-شمع-خاک برای بررسی تغییر شکل مونوپایل تحت جریان یکنواخت و موج مرتبه پنجم استوکس پرداخته شده است. در پژوهش انجام شده برای شبیه‌سازی حرکت نسبی بین مونوپایل و خاک از یک رابط اصطکاکی استفاده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که در شرایط شدید محیطی، مونوپایل در یک محدوده مشخص تاب می‌خورد و حداکثر تغییر مکان در جهت بارگیری ۱.۳ برابر تغییر مکان در جهت معکوس است. تجزیه و تحلیل المان محدود نشان می‌دهد که مؤثرترین راه برای کاهش تغییر شکل سر شمع، افزایش عمق دفن‌شدگی مونوپایل است و هنگامی که عمق دفن‌شدگی محدود شود، افزایش قطر شمع یک روش مؤثرتر برای تقویت پی است تا افزایش ضخامت دیواره [۱۹].

در پژوهش انجام شده توسط ونگ و همکاران [۲۰] پاسخ‌های دینامیکی توربین بادی ساحلی بر روی مونوپایل در خاک رس تحت بار باد، موج و زلزله مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نرم‌افزار متن باز اپنسیس[2]، یک مدل سه‌بعدی از سیستم ایجاد شده است. برج و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

مونوپایل با استفاده از المان‌های دو گرهی تیر ستون ارتجاعی، رفتار رابط شمع-خاک با استفاده از فنر غیرخطی وینکلر و رابط آب-شمع با استفاده از جرم اضافه شده هیدرودینامیکی مدل‌سازی شده‌اند. بار باد، موج و زلزله به عنوان بارگذاری بر روی سیستم اعمال شده است. تأثیرات چندین پارامتر بر روی پاسخ‌های دینامیکی سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که لازم است ترکیبی از بار باد، موج و زلزله در طراحی توربین بادی ساحلی در نظر گرفته شود.

بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که اغلب آن‌ها به مدل‌سازی مقطع معادل مونوپایل و یا به صورت یک‌بعدی پرداخته‌اند، لذا در مطالعه حاضر مقطع مونوپایل و برج به صورت لوله مخروطی شکل واقعی و سه‌بعدی مدل‌سازی شده است. همچنین از آنجا که توربین‌های بادی دریایی موضوع نسبتا جدیدی است، تاکنون تمرکز تحقیقات بر روی ارائه مدل کامل و قابل اعتمادی برای تحلیل این سازه‌ها بوده است و به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف دریا به طور جداگانه بر روی عملکرد توربین پرداخته نشده است، لذا مطالعه حاضر به تحلیل دینامیکی توربین بادی فراساحلی تحت تحریکات توأم ناشی از موج و باد می‌پردازد.

۲- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش از برنامه‌ی المان محدود اپنسیس استفاده شده است که یک برنامه جامع برای مدل‌سازی پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی می‌باشد، که توسط اعضای مؤسسه‌ی پیبر[3] توسعه داده شده است. این برنامه دارای محدوده وسیعی از المان‌های مختلف، الگوریتم‌هایی برای حل مسئله و همچنین مدل‌های رفتاری متنوعی برای مصالح بوده و در نتیجه دارای قابلیت‌های پیشرفته‌ای برای مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی آنالیزهای دینامیکی همبسته محیط متخلخل اشباع و تحلیل پاسخ غیر خطی سیستم‌ها است [۲۱, ۲۲].

۲-۱- مدل‌سازی خاک

در روش‌های عددی، رفتار مصالح با استفاده از مدل‌های رفتاری بر حسب تنش-کرنش مشخص می‌شوند. به طوری که مدل‌های رفتاری هسته‌ی اصلی روش‌های عددی را تشکیل می‌دهند. مصالح خاکی منتخب در این پژوهش، ماسه نسبتا متراکم و اشباع است که انتخاب مدل رفتاری مناسب برای آن از اهمیت زیادی برخوردار است و مدل‌هایی که مشخصه‌های بیشتری از ماسه را در بر دارند معمولاً قادر به پیش‌بینی نتایج دقیق‌تر در مدل‌سازی عددی هستند. مدل رفتاری در نظر گرفته شده در این پژوهش برای خاک بر پایه‌ی کارهای انجام شده توسط پریوست [۲۳] می‌باشد که در آن از یک رویکرد چند صفحه‌ای برای شبیه‌سازی رفتار سیکلی و رفت و برگشتی خاک استفاده شده است که پارامترهای مدل رفتاری خاک، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی خاک ماسه‌ای نیمه متراکم

پارامتر	مقادیر
جرم مخصوص ماسه	۱۹۰۰ kg/m³
مدول برشی مرجع	۷۵ MPa
زاویه اصطکاک داخلی خاک	۳۱.۴°
کرنش تسلیم روانگرایی	٪۱
پارامتر انقباضی	۰.۳
زاویه فاز انتقال	۲۶.۵°
مدول بالک خاک	۲۰۰ kPa
ضریب فشار جانبی	۰.۵
فشار مرجع	۸۰ kPa
پارامتر اولیه روانگرایی	۱۰
پارامتر ثانویه روانگرایی	۰.۰۱
پارامتر سوم روانگرایی	۱

در این مقاله جهت مدل‌سازی خاک به صورت سه‌بعدی از ۹۱۲ المان‌های آجری هشت گرهی[4] استفاده شده است، که در این المان‌ها هر گره دارای ۴ درجه آزادی(سه درجه مربوط به جابجایی و یک درجه مربوط به فشار آب حفره‌ای) می‌باشد. این المان‌ها قادر به شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی همبسته بر مبنای تئوری محیط متخلخل بیوت می‌باشند [۲۴, ۲۵].

۲-۲- مدل‌سازی سیستم شمع-برج

در پژوهش حاضر مونوپایل و برج فولادی مدور به کمک المان‌های چهار گرهی ورق ارتجاعی[5] با ۶ درجه آزادی مدل‌سازی شده‌اند.

در این مطالعه، مونوپایل دارای قطر خارجی یکنواخت ۷.۵ متر و ضخامت بدنه یکنواخت ۰.۰۹ متر است، همچنین برج به کار گرفته شده دارای قطر خارجی ۵.۳ متر در بالاترین و ۷.۵ متر در پایین‌ترین نقطه‌ی خود و ضخامت بدنه یکنواخت ۰.۰۳ متر است. سایر مشخصات مونوپایل و برج به کار گرفته در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. در این مدل‌سازی، وزن شمع و برج به صورت بارهای منفرد در خلاف جهت محور z به گره‌های آن‌ها وارد شده است و همچنین یک جرم متمرکز ۳۵۰ تنی در سر برج به عنوان روسازه لحاظ شده که معادل وزن مجموعه روتور، ناسل و پره‌ها در توربین بادی ۵ مگاواتی آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر ملی می‌باشد [۱۶].

بر اساس آنالیز حساسیت و آئین‌نامه‌های طراحی، شمع خاک اطرافش را تا فاصله ۸ برابر قطر شمع از محور خود تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا برای حذف اثر مرزها روی پاسخ شمع در تمامی مدل‌ها طول و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

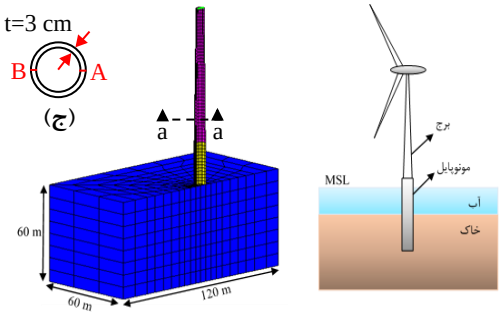
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

عرض مدل ۱۲۰ متر و عمق مدل ۶۰ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد المان‌ها با دور شدن از محور مونوپایل افزایش می‌یابد.

جدول ۲ - پارامترهای هندسی شمع و برج

پارامتر	مقادیر
قطر روتور	۱۲۶ m
ارتفاع هاب از سطح آب	۹۰ m
ارتفاع برج	۸۴ m
طول کل شمع	۵۶ m
طول شمع بالای سطح زمین	۲۶ m
عمق آب	۲۶ m
جرم مخصوص شمع و برج	۷۸۵۰ kg/m³
ضریب پواسون	۰.۳
مدول الاستیسیته	۲۱۰ GPa

همچنین به دلیل تقارن مدل ناشی از شرایط بارگذاری جانبی یکطرفه، تنها نیمی از برج، شمع و خاک اطرافش (برای کاهش زمان تحلیل) شبیه‌سازی شده‌اند. مشابه این روند در مطالعات الجمال و لو و عسگری و همکاران انجام شده است [۲۶, ۲۷]. در شکل ۱ نمونه‌ای از مدل بررسی شده را مشاهده می‌کنید که از ۱۹۷۳ گره و ۱۶۲۰ المان تشکیل شده است.



شکل ۱ - نحوه‌ی مش‌بندی مدل اجزا محدود خاک-مونوپایل-برج: (الف) نمای جانبی (ب) نمای سه بعدی (ج) برش مقطع برج (a-a) با المان ارتجاعی ورق

۲-۳- شرایط مرزی

خاک مدل شده در این پژوهش دارای شرایط مرزی ثابت می‌باشد، به این صورت که کلیه نقاط واقع بر کف مدل مهار شده‌اند، و گره‌های واقع بر مرزهای جانبی از حرکت انتقالی در راستاهای X و Y منع شده‌اند. همچنین نقاط واقع بر صفحه تقارن در برابر جابجایی عمود بر آن صفحه مهار شده‌اند ولی برای حرکت روی صفحه تقارن آزادند. شرایط زهکشی به صورتی می‌باشد که فقط امکان زهکشی در سطح زمین وجود دارد. و بقیه مرزها کاملا نفوذناپذیر در نظرگرفته شده‌اند.

کلیه نقاط واقع بر صفحه تقارن مونوپایل و برج در برابر جابجایی عمود بر آن صفحه (حرکت در راستای Y، دوران حول محور X و دوران حول محور Z) مهار شده‌اند ولی برای حرکت روی صفحه تقارن آزادند. همچنین نقاط متناظر در المان‌های خاک و شمع با دستور درجه آزادی یکسان[۶] در هر سه درجه آزادی انتقالی به یکدیگر بسته شده‌اند.

۲-۴- مدل‌سازی میرایی

میرایی خاصیتی است که باعث کاهش دامنه نوسان در سیستم‌های نوسانی می‌شود و تأثیر به سزایی در برآورد پاسخ سازه‌ها دارد. در این پژوهش از دو میرایی هیسترزیس و رایلی استفاده شده است. به نسبت انرژی تلف شده در هر دوره به انرژی کل در یک سیستم میرایی هیسترزیس می‌گویند. میرایی هیسترزیس با توجه به پاسخ سیکلی سیستم در مدل رفتاری دراکر-پراگر چند صفحه‌ای به طور خودکار توسط کد متن‌باز اپنسیس محاسبه و اعمال می‌گردد. در مطالعه حاضر علاوه بر میرایی هیسترزیس از میرایی رایلی هم استفاده شده است که عمدتا در مسائل حوزه زمان به کار می‌رود. با استفاده از رابطه زیر می‌توان به محاسبه میرایی رایلی در نرم‌افزار اپنسیس پرداخت [۲۸]:

$$[C]=\alpha_m[M]+\alpha_k[K] \qquad (۱)$$

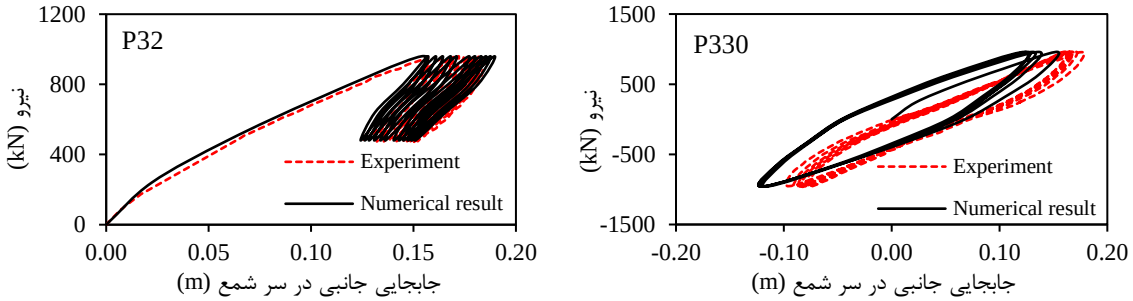
در رابطه (۱)، $[C]$ ماتریس میرایی، $[M]$ ماتریس جرم و $[K]$ ماتریس سختی است. α_m و α_k به ترتیب ضرایب ماتریس جرم و سختی می‌باشند، که با استفاده از فرکانس مودهای ارتعاشی اول و دوم و ضریب میرایی تعیین می‌شوند. ضریب میرایی در نظر گرفته شده در این مطالعه ۷ درصد [۲۹] می‌باشد.

۳- صحت سنجی

به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی سیستم خاک-شمع-برج به صورت سه‌بعدی و برای حصول اطمینان از درستی مدل‌سازی، نتایج عددی با نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی سانتریفیوژ روسکو و همکارانش [۳۰] روی شمع مدفون در ماسه متراکم تحت بار افقی سیکلی سنجیده شد. نمونه‌های سانتریفیوژ در مقیاس ۱:۴۰ تحت بارگذاری سر شمع با دو تاریخچه زمانی مختلف P32 و P330 قرار گرفتند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]



شکل ۲ - مقایسه منحنی بار-جابجایی افقی در سر شمع تحت بارگذاری یک‌طرفه P32 و دوطرفه P330

نمودارهای نیرو-جابجایی افقی در سر شمع حاصل از آزمایشات روسکو و شبیه‌سازی آن‌ها مبنی بر چارچوب توسعه یافته در پژوهش حاضر، تحت الگوهای بار جانبی P32 و P330 در شکل ۲ آورده شده‌اند. مقایسه پیش‌بینی‌های مدل عددی ساخته شده با نتایج آزمایشگاهی، حاکی از توانمندی این مدل در احتساب انباشتگی جابجایی جانبی مونوپایل‌های مدفون در ماسه متراکم تحت بار جانبی سیکلی است.

مشهود است که اولین سیکل نسبت به سیکل‌های بعدی جابجایی قابل توجهی ایجاد نموده و جابجایی سیکلی انباشته شده با افزایش تعداد سیکل‌ها افزایش می‌یابد.

۴- بارهای وارد بر سازه

۴-۱- بار باد

بار بادی که به توربین بادی اعمال می‌شود را می‌توان متشکل از دو قسمت دانست، قسمت اول بار بادی که روی برج توربین وارد می‌شود و قسمت دوم بار بادی که به پره‌های آن وارد می‌شود.

به بار باد وارد شده روی برج توربین، نیروی توزیع شده گفته می‌شود که با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌شود [۳۱].

$$F_{sh}(z)=0.5\rho_a C_D D(V+v)^2 \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، F_{sh} بار باد وارد بر برج بر حسب نیوتن بر متر، ρ_a چگالی هوا است که در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر ۱.۲۲۵ فرض می‌شود. D قطر برج، C_D ضریب درگ، $V(z)$ و $v(z,t)$ سرعت متوسط باد هستند.

به طور کلی، ضریب درگ به عدد رینولدز و زبری سطح بستگی دارد [۳۲]. این مطالعه از $C_D=1.2$ در تمام موارد استفاده می‌کند. با حذف ترم v^2 معادله (۲) به صورت زیر می‌شود [۳۳].

$$F_{sh}(z)=0.5\rho_a C_D D V^2(1+2v/V) \qquad (۳)$$

پروفیل سرعت باد $V(z)$ در ارتفاع برج با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود [۳۲].

$$V_z=V_{ref}(z/z_{ref})^{\beta} \qquad (۴)$$

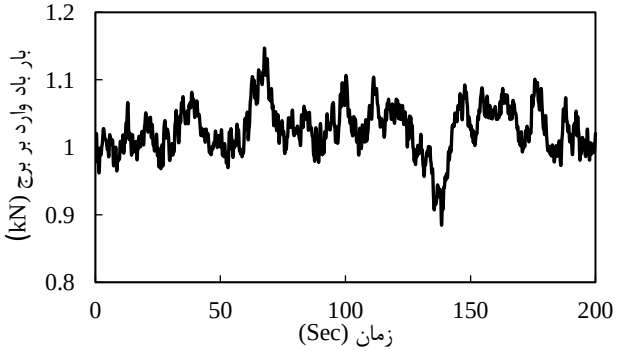
در رابطه‌ی (۴)، z ارتفاع برج بر حسب متر، z_{ref} ارتفاع مرجع باد، V_{ref} سرعت باد در ارتفاع z_{ref} و β پارامتر ناهمواری زمین است که برابر با ۰.۱۲ در دریای آزاد همراه با امواج است.

در این پژوهش $v(z,t)$، با استفاده از تابع چگالی طیفی تعریف شده است. تابع چگالی طیفی در نظر گرفته شده در این مقاله با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود، که روند دقیق آن را می‌توان در مقاله انجام شده توسط دئوداتیس یافت [۳۴].

$$\frac{nS_v(z,n)}{v_*^2}=\frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، n فرکانس، $f=\frac{nz}{v}$ یک پارامتر بدون بعد و v^* میانگین سرعت باد در ارتفاع $z_{ref}=10m$ است.

بار باد وارد بر برج برای تمام ارتفاعات برج محاسبه و به هر قسمت نیرو باد مخصوص به خود وارد گردید. نیرو باد محاسبه شده در بالاترین قسمت برج در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳ - بار باد وارد شده به بالاترین قسمت برج $(V_s=11.4m/s)$

به بار باد وارد شده روی پره‌های توربین نیروی رانش گفته می‌شود. به دلیل کاهش ناگهانی فشار هوا و چرخش پره‌های توربین بادی، ناحیه‌ای دایره‌ای در بالای برج تشکیل می‌شود. فشار ناگهانی نزولی باعث ایجاد نیروی رانش در جهت باد می‌شود. بار باد وارد شده به پره با استفاده از معادله برنولی، به صورت زیر بیان می‌شود [۳۵].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

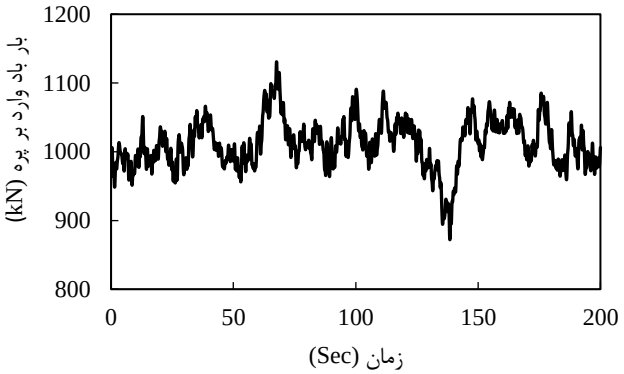
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

$$F_T = 0.5\rho_a \pi R_T^2 V_s^2 (1+2v_s/V_s) C_T \qquad (۶)$$

F_T در رابطه (۶) معرف بار باد وارد به پره‌ها بر حسب نیوتن، V_s و v_s میانگین سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، R_T شعاع روتور بر حسب متر C_T ضریب رانش است که به شرح زیر بدست می‌آید.

$$C_T = 4a_0(1-a_0) \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، a_0 فاکتور القایی در محدوده [۱-۰] است، که در این مطالعه از $a_0 = 0.5$ استفاده می‌کند مگر اینکه خلاف آن مشخص شود. نیروی رانش F_T به عنوان بار جانبی در بالای برج اعمال می‌شود. در شکل ۴ نمودار تاریخچه زمانی بار باد وارد بر پره آورده شده است.



شکل ۴ - بار باد وارد شده به پره‌های توربین $(V_s = 11.4\,m/s)$

۴-۲- بار موج

در این پژوهش از نیروی موج تصادفی روی استوانه مدور استفاده شده است. محاسبه نیروی موج برای یک ساختار بزرگ دریایی در مقیاس بزرگ هنگامی که حضور این سازه بر موج تأثیر بگذارد، بر اساس تئوری پراش استوار است [۳۶]. در این مطالعه برای شبیه‌سازی امواج تصادفی که بر روی سازه‌ها عمل می‌کنند، از طیف پیرسون-موسکوویتز استفاده می‌شود [۳۷].

$$S_{PM}(f) = 0.312 H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp(-1.25(T_s f)^{-4}) \qquad (۸)$$

در رابطه بالا H_s ارتفاع موج بر حسب متر، T_s پریود موج بر حسب ثانیه و f فرکانس بر حسب هرتز است. همچنین طیف سرعت و شتاب را می‌توان با استفاده از روابط زیر به دست آورد.

$$S_{PM_u}(f) = 2\pi f\, S_{PM_d}(f) \qquad (۹)$$

$$S_{PM_a}(f) = 2\pi f\, S_{PM_u}(f) \qquad (۱۰)$$

در روابط (۹) و (۱۰) S_{PM_d} تابع چگالی طیفی ارتفاع موج، S_{PM_u} تابع چگالی طیفی سرعت موج و S_{PM_a} تابع چگالی طیفی شتاب موج است. طیف‌های محاسبه شده در شکل ۵ آورده شده است.

جابجایی سطح آزاد موج در دریاهای تصادفی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$\eta(x,t) = \sum_{i=1}^{N} A_i \sin(k_i x + 2\pi f_i t + \phi_i) \qquad (۱۱)$$

که در آن A_i و f_i نشان دهنده دامنه و فرکانس تابع چگالی طیفی و k_i عدد موج است. ϕ_i به طور تصادفی در محدود $[-\pi,\pi]$ تولید می‌شود. با استفاده از رابطه زیر می‌توان A_i را محاسبه کرد.

$$A_i = \sum_{i=1}^{N} \sqrt{S_{PM}(f_i)\Delta f} \qquad (۱۲)$$

بر اساس تئوری موج پراش خطی، نیروی موج خطی روی استوانه دایره‌ای را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد [۳۶]:

$$F(t) = \rho_w g k \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cosh kz}{\cosh kh_w} C_M(kD)\eta(t) \qquad (۱۳)$$

$$\eta(t) = \frac{H_s}{2}\sin 2\pi ft \qquad (۱۴)$$

$$C_M(kD) = \frac{16}{\pi k^2 D^2 \sqrt{J_1'(0.5kD)^2 + Y_1'(0.5kD)^2}} \qquad (۱۵)$$

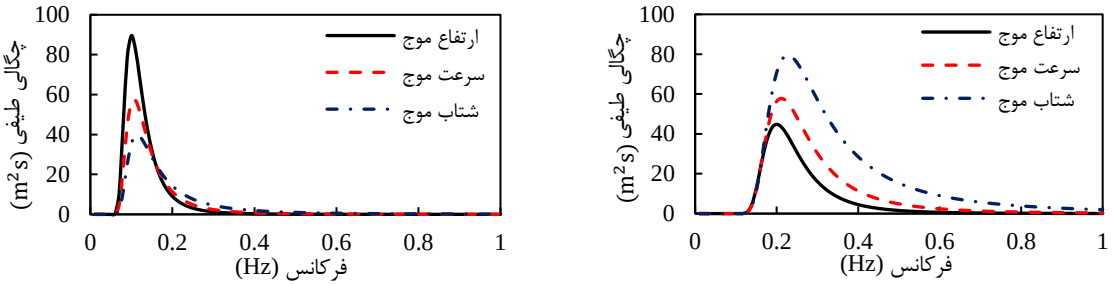
در روابط بالا J_n تابع بسل نوع اول از مرتبه n، Y_n تابع بسل نوع دوم از مرتبه n، ρ_w چگالی آب، g شتاب ناشی از گرانش، D قطر شمع و h_w عمق آب است.

به همین ترتیب، می‌توان نیروی موج تصادفی روی استوانه دایره‌ای را به صورت زیر بدست آورد:

$$F(t) = \rho_w g k \frac{\pi D^2}{4} \sum_{i=1}^{N} C_M(k_i D) \frac{\cosh(k_i z)}{\cosh(k_i h_w)} k_i A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) \qquad (۱۶)$$

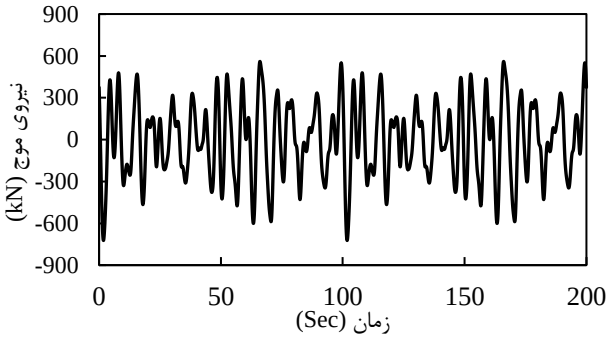
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]



شکل ۵ - طیف چگالی ارتفاع، سرعت و شتاب موج: (الف) $H_s=10m, T_s=5\text{Sec}$ **(ب)** $H_s=10m, T_s=10\text{Sec}$

از آنجا که نیرو موج به تمام ارتفاع مستغرق مونوپایل وارد می‌گردد لذا این نیرو برای تمام ارتفاعات مستغرق محاسبه و به هر قسمت نیرو موج مخصوص به خود وارد گردید. تمامی مراحل اشاره شده برای محاسبه بار موج در این نوشتار، تحت کدی در نرم افزار متلب نوشته شده است. نیرو موج محاسبه شده در سطح آب در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶ - بار موج محاسبه شده در سطح آب
$(H_s=10m, T_s=10\text{Sec})$

۵- گام‌های تحلیل

تحلیل دینامیکی سیستم خاک-شمع-برج تحت بارگذاری توأم باد و موج در چهار گام زیر انجام شده است:

گام اول: با تعریف گره‌ها و المان‌های خاک، هندسه مدل تعریف می‌شود و سپس المان‌های خاک تحت بار ژئواستاتیکی قرار داده می‌شوند تا شرایط طبیعی زمین به وجود آید. در این گام رفتار مصالح خاک ارتجاعی خطی می‌باشد.

گام دوم: شیب صفر برای مدل تعریف می‌شود و رفتار مصالح خاک از حالت الاستیک به حالت الاستوپلاستیک تبدیل می‌شود تا امکان بررسی شرایط پلاستیک در روانگرایی به وجود آید.

گام سوم: گره‌ها و المان‌های شمع و برج تعریف می‌شود و شرایط عدم حرکت در راستای عمود بر صفحه تقارن با منع حرکت در راستای y و دوران حول محورهای x و z بوجود می‌آید. گره‌های متناظر خاک و شمع با دستور درجه آزادی یکسان برای تمام حرکات انتقالی به هم بسته می‌شوند. وزن شمع و برج به صورت بارهای قائم استاتیکی در تک تک گره‌ها توزیع می‌شود. سپس تحلیل مدل تحت بار ثقلی شمع به صورت شبه استاتیکی انجام می‌گیرد تا توزیع تنش و کرنش در خاک بر اثر حضور شمع ایجاد شود.

گام چهارم: کل سیستم تحت بارگذاری توأم باد و موج قرار گرفته و تحلیل دینامیکی غیر خطی از نوع تاریخچه زمانی با بازه‌های زمانی متغیر انجام می‌شود.

۶- بحث و بررسی نتایج

در این مطالعه در مرحله اول پاسخ توربین بادی فراساحلی تحت بارگذاری باد با پارامترهای مختلف باد همانند سرعت باد و فاکتور القایی در مرحله دوم تحت بارگذاری موج با پارامترهای مختلف موج همانند ارتفاع موج و پریود موج و سپس تحت بارهای ترکیبی باد و موج بررسی شده است. در اکثر پژوهش‌های انجام شده برای مدل‌سازی شمع از المان‌های تک بعدی تیر ستون ارتجاعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی مونوپایل و برج از المان سه‌بعدی ورق ارتجاعی استفاده شده است. که بر خلاف المان‌های تیر ستون ارتجاعی، می‌توان از نقاط مختلفی برای به دست آوردن پاسخ‌های سیستم در برنامه اپنسیس استفاده نمود. در نتیجه از نقاط راست (A) و چپ (B) مدل (در قسمت ج شکل ۱ نشان داده شده است)، برای به دست آوردن جابجایی و دوران سیستم استفاده شده است؛ و در نهایت مقدار متوسط نقاط چپ و راست به عنوان پاسخ نهایی ارائه شده است. همچنین برای به دست آوردن پاسخ‌های نیرویی از المان‌های موجود در سمت راست مدل (A) استفاده شده است.

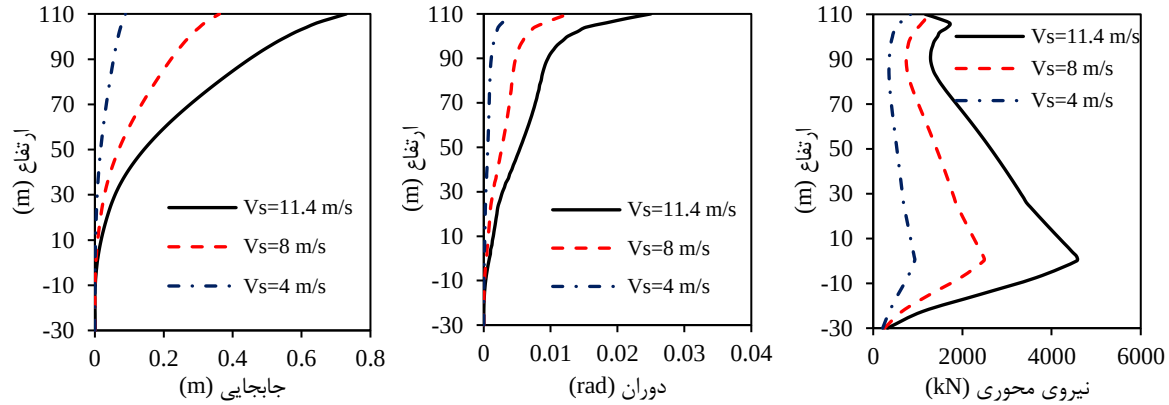
۶-۱- پاسخ به بار باد

در این پژوهش سه سرعت باد متفاوت ۴، ۸ و ۱۱.۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۷، حداکثر جابجایی جانبی در جهت محور x و همچنین دوران حول محور y و نیروی محوری برج-مونوپایل را برای بار باد با سه مقدار متفاوت سرعت باد نشان داده

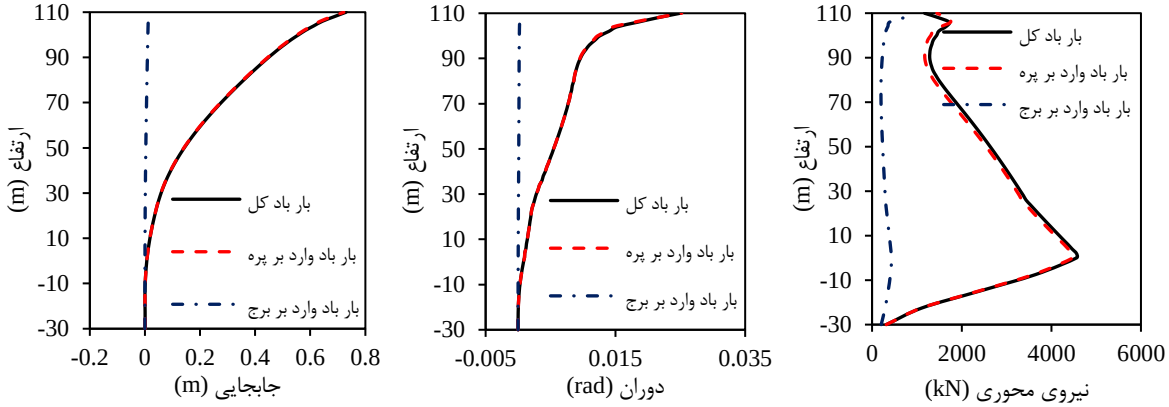
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

شده است. نیروی محوری که در شکل ۷ ترسیم شده است فقط برای سمت راست مدل می‌باشد و در سمت چپ آن نیز همین نیرو در خلاف جهت وجود دارد. نمودارهای ترسیم شده تأثیر بسیار زیاد سرعت باد بر پاسخ‌های سیستم را نشان می‌دهند و مشاهده می‌کنیم با افزایش سرعت باد پاسخ‌های توربین بادی ساحلی اعم از جابجایی، دوران و نیروی محوری به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده‌اند.

شکل ۸ حداکثر جابجایی، دوران و نیروی محوری برج-مونوپایل را نشان می‌دهد که تحت نیروی باد وارد بر پره، نیروی باد وارد بر برج و ترکیب این نیروها است. نمودارها گویای تأثیر کم بار باد اعمال شده روی برج توربین، بر پاسخ‌های سیستم هستند. همچنین مشاهده می‌شود که عمده پاسخ‌های سیستم، از بار باد اعمال شده روی پره‌های توربین ایجاد می‌شود. این نتیجه توسط ونگ و همکاران و احمدتبار و همکاران در مورد بار باد اعمال شده بر روی توربین‌های بادی فراساحلی به دست آمده بود [۲۰, ۳۸]



شکل ۷ - پاسخ‌هایی در طول برج و مونوپایل در معرض بار باد با سرعت‌های مختلف باد



شکل ۸ - پاسخ هایی در طول برج و مونوپایل تحت نیروی باد رانشی، نیروی باد توزیع شده و کل نیروی باد $(V_s = 11.4 m/s)$

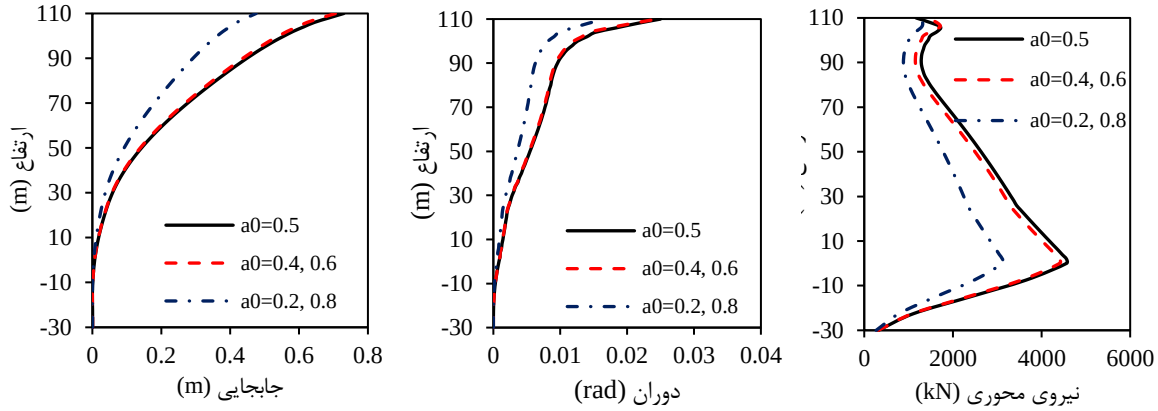
در شکل ۹ برای بررسی تأثیر فاکتور القایی (a_0) که در معادلات (۶) و (۷) آورده شده است، پروفیل حداکثر جابجایی، دوران و نیروی محوری برج-مونوپایل را برای $a_0 = 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$ و $V_s = 11.4 m/s$ رسم کرده‌ایم. همان‌طور که از شکل مشخص است، پاسخ‌های سیستم با افزایش فاکتور القایی تا ۰.۵ افزایش می‌یابند و پس از آن با افزایش ضریب القایی، کاهش می‌یابند.

۶-۲- پاسخ به بار موج

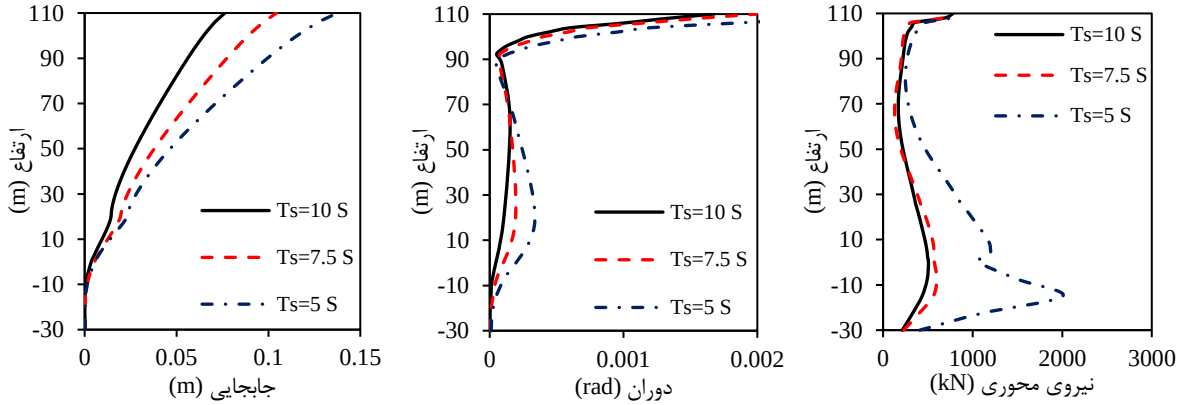
ارتفاع موج (H_s) و دوره موج (T_s) دو عامل مهم برای نیروی موج هستند [۳۹]. کاملاً مشهود است که با افزایش ارتفاع موج، پاسخ سازه‌های ساحلی افزایش خواهد یافت. این مطالعه سه مقدار متفاوت پریود موج ۵، ۷.۵ و ۱۰ ثانیه و ارتفاع موج ۱۰ متر را در نظر گرفته است. شکل ۱۰ پروفیل حداکثر جابجایی، دوران و نیروی محوری برج-مونوپایل را برای پریودهای مختلف موج نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]



شکل ۹ - پاسخ‌هایی در طول برج و مونوپایل در معرض بار باد با فاکتور القایی متفاوت $(V_s = 11.4 m/s)$



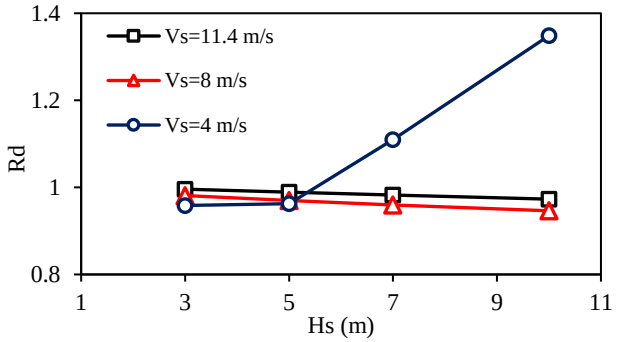
شکل ۱۰ - پاسخ‌هایی در طول برج و مونوپایل در معرض بار موج با پریودهای موج متفاوت $(H_s = 10 m)$

مشاهده شده است که پریود موج تأثیر مهمی بر پاسخ‌های سیستم دارد و با افزایش آن پاسخ‌های سیستم کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که دوره موج تأثیر قابل توجهی روی نیروهای موج استوانه‌ای دارد.

۶-۳- پاسخ به ترکیب بار باد و موج

برای بررسی تأثیرات بارگذاری موج بر روی پاسخ‌های سیستم توربین بادی فراساحلی که تحت بار ترکیبی باد و موج قرار دارد، بار موج برای ارتفاع موج از ۳ تا ۱۰ متر و برای پریود موج از ۲ تا ۱۰ ثانیه ارزیابی می‌شود. پارامتر R_d نسبت حداکثر جابجایی در بالای برج را تحت بار ترکیبی باد و موج به بار باد نشان می‌دهند. R_d برای ارتفاع و دوره موج متفاوت به ترتیب در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که پاسخ‌های سیستم تحت بار ترکیبی با یک باد شدید و ارتفاع موج کوچک $(V_s = 11.4 m/s, H_s = 3m)$ عمدتا توسط بار باد ایجاد می‌شود، چون در این حالت تأثیرگذاری بار موج در مقایسه با بار باد بسیار ناچیز است. در حالی که پاسخ‌های سیستم تحت بار ترکیبی با یک باد ضعیف و ارتفاع موج زیاد $(V_s = 4 m/s, H_s = 10 m)$ عمدتا توسط بار موج ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده می‌کنیم R_d با افزایش ارتفاع موج در مورد بار موج شدید به شدت افزایش می‌یابد و در مورد باد قوی کاهش می‌یابد که این مورد به دلیل وجود تغییر فازی است که در دو نیروی باد و موج وجود دارد؛ که باعث می‌شود دو نیرو در خلاف جهت یکدیگر رفتار کنند و در نهایت باعث کاهش پاسخ می‌شوند. ولی همواره نمی‌توان گفت که پاسخ‌ها در حالت ترکیب بار باد و موج نسبت به بار باد کمتر است چرا که این تغییرات بسیار ناچیز است و با افزایش H_s محسوس‌تر خواهد شد.

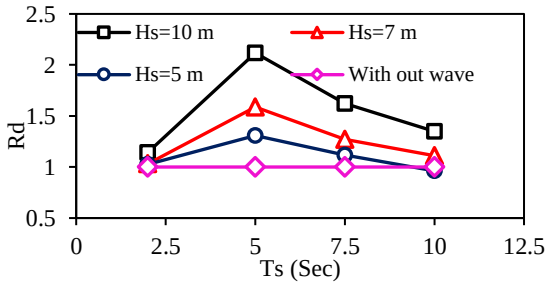


شکل ۱۱ - تأثیر ارتفاع موج بر پاسخ توربین بادی دریایی تحت ترکیب بار باد و موج $(T_s = 10 Sec)$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

شکل ۱۲ نشان می‌دهد پاسخ سیستم توربین‌های بادی دریایی در ابتدا افزایش می‌یابد و با افزایش پریود موج کاهش می‌یابد، و وقتی $(T_s = 5\text{Sec})$ حداکثر مقدار را کسب می‌کند. این موضوع به این دلیل است که نیروی موج با افزایش پریود موج تا ۵ ثانیه افزایش می‌یابد و بعد از آن روند کاهشی دارد. این نتیجه با نتایج به دست آمد توسط ونگ و همکاران در مورد بار باد اعمال شده بر روی توربین‌های بادی فراساحلی مطابقت دارد [۲۰].



شکل ۱۲ - تأثیر پریود موج بر پاسخ توربین‌های بادی دریایی تحت ترکیب بار باد و موج $(V_s = 4m/s)$

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل عددی برای بررسی پاسخ‌های سیستم خاک-مونوپایل-برج در معرض بار باد، موج و ترکیب آن‌ها ایجاد شده است. عوامل مربوط به پارامترهای مختلف در مورد پاسخ‌های سیستم مورد بحث قرار می‌گیرند. برج و مونوپایل با استفاده از المان سه بعدی ورق با رفتار ارتجاعی و خاک با المان آجری شکل که قابلیت اندازه‌گیری اضافه فشار آب حفره‌ای را دارد مدل‌سازی می‌شوند. سپس مدل‌های عددی با نتایج آزمایش سانتریفیوژ اعتبارسنجی شده و مدل‌های رفتاری و شرایط مرزی و اندازه‌ی المان‌های آن مورد تأیید قرار گرفتند و در نهایت یک سری تحلیل دینامیکی در حوزه زمان انجام می‌شود. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان دادکه:

۱- پاسخ‌های سیستم توربین بادی فراساحلی تحت بار باد عمدتا از بار باد اعمال شده به پره ایجاد می‌شوند، و بار باد وارد شده به برج نقش کمی در این مورد دارند.

۲- پاسخ‌های سیستم تحت بار باد به طور قابل توجهی با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابند، که این افزایش در سر برج به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سایر نقاط است همچنین با افزایش ضریب القایی تا ۰.۵، پاسخ‌های سیستم افزایش می‌یابند و پس از آن، پاسخ‌ها با افزایش فاکتور القایی روند کاهشی از خود نشان می‌دهند.

۳- پاسخ‌های سیستم تحت بار موج با افزایش ارتفاع موج افزایش می‌یابند و با افزایش پریود موج کاهش می‌یابند.

۴- اصل برهم‌نهی در مورد پاسخ‌های مونوپایل تحت بارگذاری ترکیبی باد و موج برقرار نمی‌باشد. یعنی پاسخ مونوپایل تحت اثر توأم بارهای باد و موج با مجموع پاسخ‌های آن تحت اثر باد و موج برابری نمی‌کند

۵- پاسخ‌های سیستم تحت بار ترکیبی از باد و موج با باد شدید عمدتا از اثر باد ایجاد می‌شود اما در حالتی که سیستم تحت بار موج با بار باد ضعیف قرار بگیرد تأثیرات بار موج محسوس‌تر خواهد شد. همچنین در حالت ترکیب بار باد و موج، پاسخ‌ها با افزایش دوره موج تا زمان ۵ ثانیه افزایش می‌یابند و بعد از آن روند کاهشی دارند.

کلید واژگان

1- Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence (FAST)
2- OpenSees
3- PEER
4- Brick UP element
5- Shell element
6- Equal DOF

۸- مراجع

1- Europe, W., (2020), *Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2020*.
2- Shi, W., Park, H.-C., Chung, C.-W. and Kim, Y.-C., (2011), in *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
3- Gupta, B. K., and Basu, D., (2020) ,*Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives*, Ocean Engineering **213**, p. 107514.
4- Pechak, O., Mavrotas, G. and Diakoulaki, D.,(2011), *Role and contribution of the clean development mechanism to the development of wind energy* , Renewable and Sustainable Energy Reviews **15**(7), p. 3380-3387.
5- Bahaj, A. S., (2011), *Generating electricity from the oceans*, Renewable and Sustainable Energy Reviews **15**(7), p. 3399-3416.
6- Ohlenforst, K., (2019), *Global Wind Report 2018*.
7- Achmus, M., Kuo, Y.-S. and Abdel-Rahman, K.,(2009), *Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load*, Computers and Geotechnics **36**(5), p. 725-735.
8- Paulsen, B. T., De Sonneville, B., Van Der Meulen, M. and Jacobsen, N. G., (2019), *Probability of wave slamming and the magnitude of slamming loads on offshore wind turbine foundations*, Coastal Engineering **143**, p. 76-95.
9- Slot, R. M., Sorensen, J. D., Sudret, B., Svenningsen, L. and Thogersen, M. L., (2020), *Surrogate model uncertainty in wind turbine reliability*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

10- Wu, X., *et al.*, (2019), *Foundations of offshore wind turbines: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 104, p. 379-393.

11- Dezvareh, R., (2019), *Dynamic analysis of tripod offshore wind turbine under wind and wave loads considering water-structure interaction*, Marine Technology 5(4), p. 74-82.

12- Kuhn, M. J., (2001), *Dynamics and design optimization of offshore wind energy conversion systems*, DUWIND, Delft University Wind Energy Research Institute.

13- Dong, W., Moan, T. and Gao, Z., (2011), *Long-term fatigue analysis of multi-planar tubular joints for jacket-type offshore wind turbine in time domain*, Engineering Structures 33(6), p. 2002-2014.

14- Fayzolahzade, M., and Mahmudi, M., (2015), *Trust force-induced vibration analysis of offshore wind turbine tower with fixed monopile platform*, Marine Technology 2(1), p. 33-49.

15- Jonkman, J. M., and Buhl Jr, M. L., (2007), *Loads analysis of a floating offshore wind turbine using fully coupled simulation*, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

16- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G., (2009), *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

17- Asgari, A., Ibsen, L. B., Bagheri, M. and Barari, A., (2014), in *Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, Eds, p. 312-322.

18- Zheng, X. Y., Li, H., Rong, W. and Li, W., (2015), *Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: An experimental study*, Marine Structures 44, p. 125-141.

19- Chen, L., Yang, X., Li, L., Wu, W., El Naggar M.H., Wang, K., and Chen, J., (2020), *Numerical analysis of the deformation performance of monopile under wave and current load*, Energies 13(23), p. 6431.

20- Wang, P., Zhao, M., Du, X., Liu J. and Xu, C.,(2018), *Wind, wave and earthquake responses of offshore wind turbine on monopile foundation in clay*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 113, p. 47-57.

21- Jeremic, B., (2001), *Development of geotechnical capabilities in OpenSees*, Citeseer.

22- Mazzoni, S., Mckenna, F., Scott, M. H. and Fenves, G. L.,(2006), *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center 264, p. 137-158.

23- Prevost, J. H., (1985), *A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils*, International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering 4(1), p. 9-17.

24- Elgamal, A., Yan, L., Yang, Z. and Conte, J. P., (2008), *Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system*, Journal of Structural Engineering 134(7), p. 1165-1176.

25- Law, H. K., and Lam, I. P., (2001), *Application of periodic boundary for large pile group*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127(10), p. 889-892.

26- Asgari, A., Oliaei, M., and Bagheri, M., (2013), *Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 51, p. 77-96.

27- Elgamal, A., Lu, J. and Forcellini, D., (2009), *Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation*, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 135(11), p. 1672-1682.

28- He, L., Ramirez, J., Jinchi Lu, J., Tang L., Elgamal A., and Tokimatsu K., (2017), *Lateral spreading near deep foundations and influence of soil permeability*, Canadian Geotechnical Journal 54(6), p. 846-861.

29- Malekjafarian, A., Jalilvand, S., Doherty, P. and Igoe, D., (2021), *Foundation damping for monopile supported offshore wind turbines: A review*, Marine Structures 77, p. 102937.

30- Gerolymos, N., Escoffier, S., Gazetas, G. and Garnier, J., (2009), *Numerical modeling of centrifuge cyclic lateral pile load experiments*, Earthquake Engineering and Engineering Vibration 8(1), p. 61-76.

31- Van Binh, L., Ishihara, T., Van Phuc, P. and Fugino, Y., (2008), *A peak factor for non-Gaussian response analysis of wind turbine tower*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96(10-11), p. 2217-2227.

32- Veritas, D. N., (2010), *Recommended practice DNV-RP-C205: environmental conditions and environmental loads*, DNV, Norway.

33- Scanlan, R. H., (1993), *Problematics in formulation of wind-force models for bridge decks*, Journal of engineering mechanics 119(7), p. 1353-1375.

34- Deodatis, G., (1996) ,*Simulation of ergodic multivariate stochastic processes*, Journal of engineering mechanics 122(8), p. 778-787.

35- Lee, S., Kim, H. and Lee, S., (2010), *Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-assessment*, Renewable Energy 151, p. 1150-1162.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]

rotating wind turbine, Current Applied Physics 10(2), p. S339-S342.

36- Maccamy, R. and Fuchs, R. A., (1954), *Wave forces on piles: a diffraction theory*, US Beach Erosion Board.

37- Oh, K.-Y., Kim, J.-Y., and Lee, J.-S., (2013), *Preliminary evaluation of monopile foundation dimensions for an offshore wind turbine by analyzing hydrodynamic load in the frequency domain*, Renewable energy 54, p. 211-218.

38- Ahmadtabar Sorkhi, F. and Asgari, A., (2021), *Wind responses of offshore wind turbine on monopiles foundation in Liquefiable sandy soil*, 7th Iran Wind Energy Conference.

39- Li, M., Zhang, H. and Guan, H., (2011), *Study of offshore monopile behaviour due to ocean waves*, Ocean Engineering 38(17-18), p. 1946-1956.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.9.1]