Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):77-86

Validation of New Wave Theory in Determining Stability of Offshore Wind Turbines

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Shakarami M. [1] *MSc,*
Shanehsazzadeh A. *[1] *PhD,*
Shabakhty N. [2] *PhD*

How to cite this article
Shakarami M, Shanehsazzadeh A, Shabakhty N. Validation of New Wave Theory in Determining Stability of Offshore Wind Turbines. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):77-86.

ABSTRACT

The New Wave theory has recently applied for predicting wave forces on marine structures including offshore wind turbines. However, the validation of the theory in determining wave force has not been fully confirmed. Therefore, evaluation of the validity and accuracy of the results of New Wave theory to determining the stability parameters of various marine structures including base shear and the overturning moment is necessary. In the present article the results of wave generation by New Wave theory in determining water surface profiles, wave kinematics and offshore wind turbine monopile pier responses to the wave, including base shear, overturning moment and maximum displacement are compared to the experimental data and results from linear irregular wave time series generated from the wave spectrum. The results show that the New wave theory with a very short time of structural analysis calculations can be the reliable substitute for prediction of wave forces on offshore wind turbines in comparison to real irregular time series. The comparison of the results with the conventional 5th Stokes regular waves shows that the new wave theory is significantly more accurate in predicting wave kinematics and wave loads on offshore wind turbine monopiles.

Keywords New Wave Theory; Irregular Waves; Wave Force; Offshore Wind Turbine; ANSYS Software

[1]Civil Engineering Department, Civil Engineering & Transportation Faculty, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[2]Civil Engineering Department, Civil Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Shahid Motahari Square, Shahid Rafiee Boulevard , Imam Ali Highway, Khayyam University. Postal code: 9189747178
Phone: +98 (31) 37935328
Fax: +98 (31) 36699515
a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

Article History
Received: March 31, 2018
Accepted: April 22, 2019
ePublished: January 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Comparison of loads predicted using “NewWave” and other wave models with measurements on the tern structure. In: Society for Underwater Technology [2] A new model for the kinematics of large ocean waves-application as a design wave-application as a design wave [3] Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations [4] A methodology to simulate floating offshore operations using a design wave theory [5] Nonlinear space-time evolution of wave groups with a high crest [6] Application of system identification techniques in efficient modelling of offshore structural response [7] A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii [8] Revisiting the Pierson-Moskowitz asymptotic limits for fully developed wind waves [9] Third-order theory for multi-directional irregular waves [10] Improved linear representation of ocean surface waves [11] Assessment of offshore structures under extreme wave conditions by modified endurance wave analysis [12] Analysis of jack-up units using a constrained NewWave methodology [13] Environmental conditions and environmental loads [14] Report of the seakeeping committee [15]Application of New-wave theory in the Endurance Wave method to assess offshore structures under the Persian Gulf wave conditions [16]An experimental study of wave and current-induced forces on a compact linear array of vertical cylinders in shallow water [17] Handbook of offshore engineering [18] Experimental testing of grouted connections for offshore substructures: A critical review [19] Fatigue bending test on grouted connections for monopile offshore wind turbines [20] Effects of pile-soil-water interaction on the dynamic response of a seismically excited dynamic response [21] Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms [22] Mechanical apdl 15 manual [23] A fifth- order stokes theory for steady waves [24] Fifth order gravity wave theory

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی اعتبار تئوری موج نو در تعیین پایداری توربین‌های بادی فراساحل

میلاد شاکرمی MSc
گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
احمد شانه‌ساززاده* PhD
گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
ناصر شابختی PhD
گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده
امروزه از تئوری موج نو برای تخمین نیروی امواج بر سازه‌های دریایی از جمله پایه توربین‌های بادی فراساحل استفاده می‌شود. این در حالی است که به جز در موارد معدود، اعتبار این تئوری در تعیین نیروی امواج هنوز به طور کامل تایید نشده است. لذا بررسی اعتبار و دقت نتایج تئوری موج نو برای تعیین پارامترهای پایداری سازه‌های متنوع دریایی شامل برش پایه و لنگر واژگونی ضروری است. در این مقاله نتایج حاصل از تولید موج به روش تئوری موج نو در تعیین پروفیل سطح آب، سینماتیک موج و پاسخ‌های سازه‌ای شامل جابجایی حداکثر، برش پایه و لنگر واژگونی مونوپایل توربین بادی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال سری زمانی به روش تئوری تصادفی خطی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تئوری موج نو با کاهش قابل ملاحظه زمان محاسبات تحلیل سازه می‌تواند با دقت کافی جایگزینی مناسب برای شبیه‌سازی چند ساعته امواج تصادفی باشد. مقایسه نتایج با امواج منظم استوکس مرتبه ۵ همچنین نشان می‌دهد که نتایج تئوری موج نو بسیار قابل اعتمادتر نسبت به امواج منظم برای تعیین سینماتیک موج و بارگذاری دینامیکی موج بر پایه توربین‌های بادی است.

کلیدواژه‌ها: تئوری موج نو، امواج نامنظم تصادفی، نیروی امواج، توربین‌های بادی فراساحل، نرم‌افزار انسیس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۲
*نویسنده مسئول: a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

امواج مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی فیزیکی هستند که در سطح دریاها و اقیانوس‌ها اتفاق می‌افتند. از میان بارهای وارد بر سازه‌های دریایی، نیروی امواج و ارتعاشات ناشی از آن نقش مؤثری در عملکرد و عمر سازه‌های دریایی ایفا می‌کند. امواج دریا ماهیتی نامنظم دارند. بنابراین برای تعیین نیروهای وارد بر سازه‌های دریایی باید به تشریح مشخصات و معادلات بیان‌کننده این امواج نامنظم پرداخت. از دیرباز برای شبیه‌سازی سینماتیک امواج و در پی آن محاسبه نیروهای وارد بر سازه‌های دریایی، تئوری‌های امواج منظم از قبیل آیری، کنویدال، استوکس مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، به‌دلیل ماهیت تصادفی امواج دریا تعیین تاثیر نامنظمی امواج با لحاظ‌نمودن ماهیت تصادفی آن و عکس‌العمل سازه‌ها در مقابل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر تئوری‌های امواج نامنظم جهت مدل‌سازی امواج دریا به‌طور وسیعی به‌کار گرفته شدند. از جمله این تئوری‌ها، تئوری موج نو (New Wave) است. امروزه تئوری موج نو به‌عنوان جایگزینی مناسب برای شبیه‌سازی چندساعته امواج تصادفی مورد توجه قرار گرفته است[1, 2]. تئوری موج نو یک تئوری خطی مرتبه اول است که از طیف موج دریا به‌دست می‌آید و برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط *تورومانس* و همکاران ارائه گردید[2]. از آن زمان تاکنون از موج نو برای تخمین نیروی امواج به سازه‌های دریایی استفاده شده است.

در موج نو شرایط برای تشکیل یک ارتفاع بیشینه در زمان و مکان مشخص براساس طیف موج تصادفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و محتمل‌ترین نیم‌رخ ممکن را در اطراف آن ارائه می‌کند. این محتمل‌ترین تراز سطح آب، یک مدل مناسب برای سینماتیک ذرات آب فراهم می‌کند. این تئوری جایگزینی مناسب برای شبیه‌سازی چندساعته امواج تصادفی است. با این وجود بررسی صحت مقادیر نیروهای به‌دست‌آمده از تئوری موج نو از طریق مقایسه نتایج تئوری مذکور با دیگر روش‌ها و نتایج آزمایشگاهی و امکان‌سنجی جایگزین‌شدن این تئوری برای شبیه‌سازی‌های چندساعته امواج، همچنین تعیین صحت نیروهای هیدرودینامیکی تولیدشده از این تئوری ضروری است.

در سال‌های اخیر استفاده از نیروگاه‌های بادی فراساحل جهت تولید انرژی مورد توجه ویژه قرار گرفته است[3]. با توجه به اهمیت این سازه‌ها در تولید انرژی، صحت مقادیر نیروهای وارد بر این سازه‌ها ضروری بوده و در نهایت به طراحی‌های بهینه توربین‌های بادی منجر می‌شود. در این راستا در تحقیق پیش رو به بررسی اعتبار نتایج موج نو در تعیین جابجایی حداکثر و مهم‌ترین شاخص‌های پایداری سازه از قبیل برش پایه و لنگر واژگونی مونوپایل توربین‌های بادی در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی چندساعته امواج تصادفی پرداخته می‌شود.

در این پژوهش ابتدا امواج نامنظم براساس تئوری موج نو شبیه‌سازی شده است. در این راستا با استفاده از برنامه نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب، پروفیل‌های سطح آب در موج نو استخراج شده‌اند. با تشکیل پروفیل سرعت و شتاب ذرات آب در اعماق متفاوت آب و جاگذاری در معادله موریسون (Equation Morison)، سری زمانی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه تعیین می‌گردد. پس از تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر سازه، با اعمال این نیروها در بسته مکانیکال نرم‌افزار انسیس (ANSYS APDL15) و انجام آنالیز دینامیکی، پاسخ‌های سازه‌ای شامل تغییر شکل حداکثر، برش پایه و لنگر واژگونی محاسبه می‌گردند. نرم‌افزار انسیس با ایجاد انواع تحلیل‌های مهندسی از جمله دینامیکی، استاتیکی، مودال یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی جهت تحلیل و طراحی سازه‌ها به روش اجزاء محدود است. لازم به توضیح است که بارهای حاصله از تئوری موج نو به‌عنوان بار خارجی (به‌صورت سری زمانی) در نرم‌افزار انسیس به سازه اعمال می‌گردد.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تئوری موج نو با نتایج آزمایشگاهی، ابتدا میزان اعتبار تئوری موج نو در تعیین پارامترهای پایداری سازه

www.SID.ir

Archive of SID

مورد بررسی قرار گرفته است. سپس اعتبار نتایج به‌دست‌آمده از تئوری موج نو در تعیین پروفیل سطح آب، سینماتیک ذرات آب و پارامترهای پایداری مونوپایل دریایی از طریق مقایسه با نتایج حاصله از شبیه‌سازی توسط تئوری تصادفی خطی نیز سنجیده می‌شود. به‌علاوه، به‌منظور تعیین اعتبار تئوری‌های امواج منظم استوکس مرتبه ۵ در تعیین پارامترهای پایداری مونوپایل‌های دریایی، نتایج حاصله از تئوری‌های مذکور با تئوری امواج منظم مقایسه می‌گردد.

۲- تئوری موج نو

با توجه به ماهیت تصادفی امواج دریا، موج بحرانی در اثر ترکیب امواج با فرکانس‌های متفاوت به حالت حدی خود می‌رسد[4, 5]. تئوری‌های امواج نامنظم و تصادفی، سطح دریا را ترکیب خطی از امواج منظم درنظر می‌گیرند و در این راستا طیف موج تعریف و از آن استفاده می‌شود[6, 7]. در این پژوهش جهت مدل‌سازی امواج به روش تئوری‌های امواج تصادفی و تئوری موج نو، از طیف پیرسون-مسکوییچ (Pierson-Moskowitz) استفاده گردیده است که به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد[7, 8].

$$S\eta(f)=\frac{5}{16}f^{-5}{f_p}^4{H_s}^4\mathrm{e}^{-\frac{5}{4}\left(\frac{fp}{f}\right)^4} \quad (۱)$$

که H_s ارتفاع موثر امواج و f_p فرکانس قله طیف مورد نظر است. براساس مدل موج‌ساز تصادفی خطی، یک موج نامنظم از جمع N موجک خطی تک‌رنگ تشکیل می‌شود. بر این اساس پروفیل نیم‌رخ سطحی موج تولیدشده از این تئوری توسط رابطه ۲ بیان می‌شود[9, 10].

$$\eta(t)=\sum_{n=1}^{N}C_n\cos(\omega_n t-K_n x+\varphi_n) \quad (۲)$$

در رابطه ۲، ω_n=۲ Π/T_n برابر فرکانس زاویه‌ای موجک شماره n بوده و φ_n زاویه فاز تصادفی با توزیع یکنواخت متعلق به موجک nام است که ماهیت تصادفی سطح آب دریا را بیان می‌کند و در بازه صفر تا 2Π قرار دارد. و همچنین K_n عدد موج مربوط به موجک nام است. لازم به ذکر است که با استفاده از معادله ۲ می‌توان سری زمانی سطح تراز امواج نامنظم را تولید کرد. همچنین عبارت C_n در رابطه ۲ به‌صورت رابطه ۳ بیان می‌گردد[11].

$$C_n=\sqrt{2S_\eta(\omega_n)d\omega} \quad (۳)$$

در رابطه ۳، $S_\eta(\omega_n)$ مقدار طیف موج برای موجک nام است و از این مفهوم برداشت می‌شود که طیف مورد نظر به وسیله پهنای نوار فرکانس $d\omega$ به N قسمت مجزی تقسیم شده است.

از طرف دیگر تئوری موج نو یک تئوری خطی مرتبه اول است که از طیف دریا استخراج می‌شود. تئوری موج نو بدین صورت بیان می‌گردد که با حفظ محتوی انرژی موج، شرایط لازم و کافی برای تشکیل یک ارتفاع بیشینه در زمان و مکان مشخص مورد ارزیابی قرار گیرد و محتمل‌ترین نیم‌رخ ممکن را در اطراف آن بیان می‌کند. این محتمل‌ترین تراز سطح آب، یک مدل مناسب برای سینماتیک ذرات آب فراهم می‌کند. سطح تراز تولیدشده توسط این مدل از دو بخش تشکیل می‌شود که بخش اول قطعی و بخش دوم تصادفی است. در نهایت معادله نیم‌رخ سطحی تولیدشده توسط موج نو به‌صورت رابطه ۴ بیان می‌گردد[2, 12].

$$\eta(x,t)=\frac{\alpha}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}[S(\omega_n)\Delta\omega_n]\cos(K_n x-\omega_n t) \quad (۴)$$

در رابطه ۴، K_n، $S(\omega_n)\Delta\omega_n$ و σ به‌ترتیب برابر عدد موج مربوط به موجک شماره nام، سطح تراز طیف مربوط به موجک شماره nام و انحراف استاندارد مطابق طیف موج هستند. بنابراین پارامتر σ^2 برابر واریانس طیف موج است.

در تئوری موج نو مؤلفه‌های افقی سرعت و شتاب ذرات آب که به‌ترتیب با u و v نشان داده می‌شوند با روابط ۵ و ٦ به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$u(x,z,t)=\frac{\alpha}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}[S(\omega_n)\Delta\omega_n]\omega_n F_n(z)\cos(K_n x-\omega_n t) \quad (۵)$$

$$v(x,z,t)=\frac{\alpha}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}[S(\omega_n)\Delta\omega_n]{\omega_n}^2 F_n(z)\cos(K_n x-\omega_n t) \quad (۶)$$

در روابط ۵ و ٦، $F_n(z)$ تابع وابسته به عمق است که توسط رابطه ۷ بیان می‌شود.

$$F_n(\mathrm{z})=\frac{\mathrm{Cosh}[K_n(d+z)]}{\mathrm{Sinh}(K_n d)} \quad (۷)$$

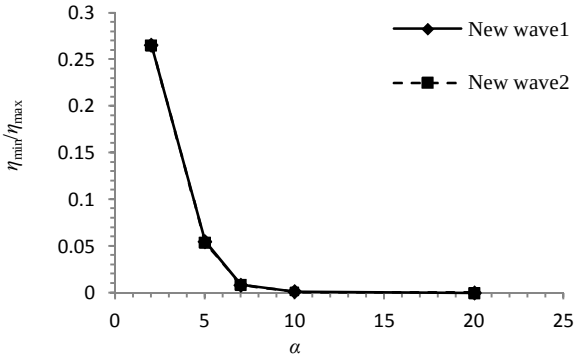
تعیین زمان آنالیز سازه تحت تئوری موج نو نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است[13, 14]. در این مطالعه، ضرایب مختلف دوره تناوب قله طیف (α) برای تولید موج نو مورد پژوهش قرار گرفته تا زمان بهینه آنالیز سازه توسط موج نو تعیین گردد. معیار پیشنهادشده برای محاسبه زمان بهینه به‌صورت رابطه ۸ قابل تعریف است[15].

$$\frac{\eta_{\min}}{\eta_{\max}}=\frac{\text{Minimum amplitude of the creast}}{\text{Maximum amplitude of the creast}}:t\epsilon[0,\alpha T_p] \quad (۸)$$

برای تعیین مدت زمان بهینه آنالیز سازه‌های دریایی تحت اعمال موج به روش تئوری موج نو، پروفیل سطح آب تحت تئوری موج نو به‌طور کاملاً اختیاری، برای دو حالت دریایی موج شماره ۱ با مشخصات T_p=۲s، H_s=۰/۱m و موج شماره ۲ با مشخصات T_p=۲/۵s، H_s=۰/۰۶m، برای ضرایب مختلف دوره تناوب قله طیف تولید می‌گردند و نحوه تغییرات نسبت مینیمم به ماکزیمم ارتفاع موج بر اثر تغییرات در ضریب زمان تناوب قله طیف سنجیده شده که در نمودار ۱ ارائه گردیده است (نتایج هر دو موج بر هم منطبق شده‌اند). مطابق نمودار ۱ نحوه تغییرات مینیمم به ماکزیمم امواج شماره ۱ و ۲ نسبت به α برابر هستند. از نمودار ۱ به وضوح دیده می‌شود که با تعیین ضریب زمان تناوب قله طیف برابر ۷ تا ۱۰، نسبت مینیمم قله موج به ماکزیمم قله موج به صفر میل می‌کند. با توجه به قابل تعمیم‌بودن نتایج این بخش در حالت‌های مختلف دریایی، در این راستا در این پژوهش مدت زمان لازم برای رکوردهای تئوری موج نو، ۷ برابر دوره تناوب قله طیف درنظر گرفته می‌شود (نمودار ۱).

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۱) تعیین مدت زمان شبیه‌سازی تحت تئوری موج نو

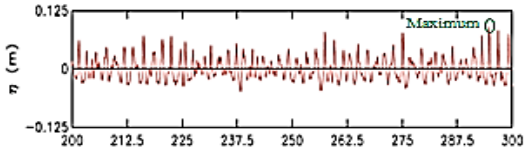
۳- اعتبارسنجی تئوری موج نو در تعیین پروفیل سطح آب و پارامترهای پایداری سازه‌های دریایی

به‌منظور اعتبارسنجی تئوری موج نو در تعیین پارامترهای پایداری سازه‌های دریایی، به مقایسه نتایج حاصل از تئوری موج نو با نتایج آزمایشگاهی و سپس مقایسه نتایج حاصل از تئوری موج نو با تئوری تصادفی خطی در تخمین پروفیل سطح آب، سینماتیک موج و پارامترهای پایداری توربین‌های بادی مونوپایل به شرح زیر پرداخته می‌شود.

۳-۱- مقایسه نتایج حاصل از تئوری موج نو با نتایج آزمایشگاهی

برای بررسی اعتبار نتایج شبیه‌سازی موج نو، نتایج تحقیق آزمایشگاهی که توسط کودیح و همکاران در فلوم مرکز هیدرولیک کانادا واقع در اتاوا انجام شده، مورد استفاده قرار گرفته شده است[16]. در این تحقیقات آزمایشگاهی یک نمونه سه‌استوانه‌ای (استوانه‌ها با ابعاد یکسان) در حالات متفاوت در یک کانال موج‌ساز تحت تاثیر امواج قرار گرفته و با استفاده از سنسورهای تعبیه‌شده در قسمت‌های مختلف، مقادیر برش پایه و لنگر واژگونی اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱ نحوه قرارگیری استوانه‌ها آورده شده است. نمودار تاریخچه زمانی تراز سطح آب اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه برای یک نمونه موج در نمودار ۲ ارائه می‌گردد. چنانکه در نمودار ۲ ملاحظه می‌شود، تراز ماکزیمم سطح آب توسط مدل موج‌ساز تصادفی برای ارتفاع موج مشخصه ۰/۱متر و ۲ثانیه در آزمایشگاه، ۰/۱۱۱متر تعیین گشته است[16].

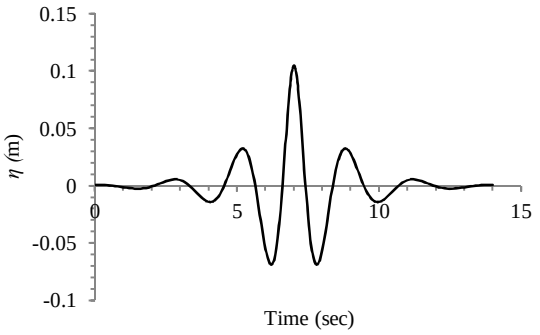
شکل ۱) مدل آزمایشگاه در فلوم مرکز هیدرولیک کانادا جهت اعتبارسنجی نتایج[16]



نمودار ۲) تاریخچه زمانی پروفیل سطح آب در آزمایشگاه در اثر موج تصادفی با ارتفاع موج مشخصه ۰/۱متر و پریود ۲ثانیه[16]

با توجه به اطلاعات در دسترس موجود از نتایج پژوهش کودیح و همکاران، مقایسه تراز سطح آب اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه با نتایج تئوری موج نو به راحتی میسر است. البته در بخش‌های بعد به مقایسه برش پایه و لنگر واژگونی نیز پرداخته شده و با توجه به ثابت‌بودن استوانه‌ها، مقایسه جابجایی استوانه مقدور نمی‌باشد. کودیح و همکاران تراز سطح آب در آزمایشگاه را برای مدت زمان ۱۲۰۰ثانیه اندازه‌گیری کردند. در تحقیق حاضر نیز با تولید موج نو برای ۷ برابر دوره تناوب قله طیف، اقدام به مقایسه نتایج گردیده است.

در نمودار ۳ به وضوح دیده می‌شود که ماکزیمم سطح آب تولیدشده توسط تئوری موج نو برابر ۰/۱۰۵۰متر است. که نشان می‌دهد که تئوری موج نو با مقدار اختلاف ۵/۴درصدی توانسته است ماکزیمم تراز سطح آب را تخمین بزنند که این درصد اختلاف کم، نشان از اعتبار تئوری موج نو در تخمین پروفیل سطح است. لازم به ذکر است که این درصد اختلاف از تقسیم تفاضل حداکثر ارتفاع موج در آزمایشگاه از حداکثر ارتفاع تولیدشده موج توسط تئوری موج نو بر حداکثر ارتفاع تولیدشده موج در آزمایشگاه به‌دست آمده است (نمودار ۳).



نمودار ۳) تاریخچه زمانی تراز سطح آب در تئوری موج نو برای ارتفاع موج مشخصه ۰/۱متر و پریود ۲ثانیه

کودیح و همکاران پاسخ‌های سازه‌ای مدل آزمایشگاهی تحت تئوری موج‌ساز تصادفی برای چهار موج تحت عنوان موج ۱ (T_p=۲s، H_s=۰/۱m)، موج ۲ (T_p=۲/۵s، H_s=۰/۰۶m)، موج ۳ (T_p=۲/۵s، H_s=۰/۱m) و موج ٤ (T_p=۲s، H_s=۰/۰۶m) را استخراج کردند. با تعیین سینماتیک موج، تعیین نیروی ناشی از موج بر مونوپایل امکان‌پذیر است. به‌طور کلی برای محاسبه نیروهای وارده توسط موج بر سازه‌های دریایی، دو روش به شرح زیر وجود دارد[11]:

www.SID.ir

Archive of SID

الف- محاسبه نیروهای وارد بر سازه با استفاده از مدل‌سازی عددی سازه و سیال اطراف آن با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).

ب- تعیین نیروهای وارده بر سازه براساس روابط نیمه تجربی.

روابط نیمه‌تجربی ارائه‌شده بسیار سریع بوده ولی مقادیر نیروهای وارده را به‌طور تقریبی تعیین می‌کنند. معادله موریسون از جمله روابط نیمه‌تجربی است که به علت سادگی خود توانسته است کاربرد گسترده‌ای پیدا کند و برای شرایطی حاکم است که رابطه D/L <۰/۰۵ برقرار باشد (D قطر مونوپایل و L طول موج است). در رابطه موریسون نیروهای حاصل از موج بر استوانه قائم به‌صورت جمع دو نیرو پسا و اینرسی بیان می‌گردد. لذا نیروی وارد بر واحد طول المان به‌صورت رابطه ۹ ارائه می‌گردد[9, 17].

$$df = 0.5C_d\rho D\dot{u}(t)|\dot{u}(t)| + C_m\rho\frac{\Pi D^2}{4}\ddot{u}(t) \quad (۹)$$

در معادله فوق، df اندازه نیروی گسترده بر واحد طول عضو لوله‌ای، همچنین C_m و C_m ضرایب نیروی پسا و نیروی اینرسی هستند که در این پژوهش با توجه به اینکه هدف، مقایسه نتایج تئوری تصادفی خطی و موج نو است، این دو مقدار براساس توصیه آیین‌نامه API، به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۱/۶ درنظر گرفته می‌شوند. لازم به توضیح است که انتخاب دقیق این ضرایب از مباحث چالش برانگیز هستند که انجام تحقیقاتی در این زمینه بسیار پراهمیت می‌باشد و در تحقیق دیگری حساسیت سازه به تغییر این پارامترها در حال انجام می‌باشد. D قطر خارجی شمع و ρ نیز چگالی جرمی آب دریا بوده که در این پژوهش برابر $1000 kg/m^3$ درنظر گرفته می‌شود. در این رابطه، $\dot{u}(t)$ و $\ddot{u}(t)$ به‌ترتیب سرعت و شتاب جریان آب در امتداد عمود بر محور طولی عضو را بیان می‌کنند. به‌منظور تعیین نیروهای وارد بر مونوپایل، با توجه به اینکه در تمام حالات D/L <۰/۰۵ است، رابطه موریسون در تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر مونوپایل حاکم است. اگرچه در تعیین نیروهای وارد بر پایه، باید اندرکنش پایه‌ها با ضرایب اصلاحی دیده شود، اما در این مدل با توجه به عمودبودن پایه بر راستای جریان، از این مورد صرف نظر شده است. در این راستا با جای‌گذاری پروفیل‌های سرعت و شتاب تحت تئوری‌های موج تصادفی خطی و موج نو در ترازهای مختلف مونوپایل در معادله موریسون، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر تراز مختلف مونوپایل در نرم‌افزار متلب تولید می‌گردند. پس از اعمال این نیروها در نرم‌افزار انسیس و انجام آنالیز دینامیکی خطی، پاسخ‌های سازه‌ای شامل: جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی، تعیین می‌گردند.

با مدل‌سازی نمونه آزمایشگاهی در نرم‌افزار انسیس و اعمال نیروهای حاصل از امواج مذکور به سازه در این نرم‌افزار و انجام آنالیز دینامیکی، پاسخ‌های سازه‌ای تعیین می‌گردند. جزییات شبیه‌سازی کامپیوتری مونوپایل برای یک نمونه با ابعاد واقعی در بخش بعد ارائه گردیده است. چنانچه از جدول ۱ ملاحظه می‌گردد مقدار اختلاف برآورد پارامتر برش پایه برای روش تئوری موج نو به‌طور متوسط ۵درصد است که این مقدار اختلاف ناچیز، نشان‌دهنده اعتبار مدل تئوری موج نو در برآورد برش پایه مدل آزمایشگاهی است. لنگر واژگونی نیز با مقدار اختلاف حداکثر ۲۴/۸درصد در موج ۲ و حداقل مقدار اختلاف ۱۰ در موج ۳ و همچنین با درصد اختلاف قابل قبول متوسط ۱۶درصد توانسته است مقدار لنگر واژگونی مدل آزمایشگاهی را برآورد کند (جدول ۱).

جدول ۱) درصد اختلاف تخمین برش پایه (Ev) و لنگر واژگونی (Em) در تئوری‌های موج نو در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

نوع موج	پاسخ‌های سازه‌ای	تئوری موج نو	آزمایشگاه
موج ۱	برش (N)	۶۲/۶۱	۵۷/۷
	خمش (N.m)	۸/۱۸	۹/۴
	(%) Ev	۸	----
	(%) Em	۱۳/۱۴	----
موج ۲	برش (N)	۴۰/۴۷	۴۰
	خمش (N.m)	۵/۲۵	۷
	(%) Ev	۰/۹	----
	(%) Em	۲۴/۸	----
موج ۳	برش (N)	۷۹/۰۸	۷۵
	خمش (N.m)	۱۰/۳	۱۱/۵
	(%)Ev	۵/۴	----
	(%) Em	-۱۰	----
موج ۴	برش (N)	۳۸/۶۷	۳۹
	خمش (N.m)	۵/۱	۶
	(%) Ev	-۰/۸	----
	(%) Em	-۱۴/۹	----

۳-۲- مقایسه نتایج تئوری موج نو با تئوری تصادفی خطی در توربین‌های بادی مونوپایل

پایه توربین‌های بادی فراساحل از نوع مونوپایل از سه بخش عمده تشکیل می‌شوند که این سه بخش اصلی سازه عبارت‌اند از: سازه نگه‌دارنده (شمع)، برج و یک قطعه رابط که پایه را به برج وصل می‌کند. قطعه وصل‌کننده پایه و برج به‌صورت یک سیلندر توخالی بوده که روی پایه پوشیده شده و سطح بالای آن به برج متصل می‌شود[18]. در شکل ۲ نمای نمونه توربین‌های بادی فراساحل از نوع پایه خرپایی (جلو) و تک‌پایه (مونوپایل، عقب) ارائه گردیده است. در این شکل مونوپایل، برج و قطعه رابط این دو نیز نشان داده شده است.

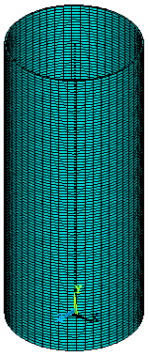
شکل ۲) توربین‌های بادی فراساحل[19]

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌سازی کامل توربین‌های بادی مونوپایل، روشی دقیق برای اندازه‌گیری پاسخ این سازه‌ها به بارهای محیطی است، اما با توجه به هندسه پیچیده و زمان‌بربودن شبیه‌سازی، بیشتر محققین از مدل چند درجه آزادی یا مدل‌های ساده‌شده این سازه‌ها استفاده می‌کنند[20, 21]. در این راستا از آنجا که هدف اصلی این پژوهش تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر قسمت سازه نگه‌دارنده سازه و محاسبه پاسخ‌های سازه‌ای پایه ناشی از موج است؛ لذا از مدل‌کردن قسمت برج و قطعه رابط صرف نظر شده است. از طرفی نیز می‌توان گفت که موضوع برخورد موج با توربین بادی تک‌پایه با یک استوانه از نظر ماهیت تفاوتی ندارد. هر چند مسائل دیگری از جمله اندرکنش باد و پره و انعطاف‌پذیری فونداسیون و پاره‌ای از مسائل دیگر در طراحی سازه توربین‌های بادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند.

مدل مورد استفاده در این پژوهش یک مونوپایل (لوله) با قطر خارجی ۴متر و ضخامت جداره ۵سانتی‌متر بوده و ارتفاع کلی این سازه برابر ۴۰متر درنظر گرفته شده است. عمق آب در محل استقرار توربین ۳۰متر است. همچنین مونوپایل مذکور از جنس فولاد با مدول الاستیسیته $2/1\times10^{11}\ N/m^2$ است (شکل ۳ و جدول ۲). در این راستا هندسه مذکور در نرم‌افزار انسیس با استفاده از المان لوله Pipe59 مدل گشته است. این المان دارای ۶ درجه آزادی در هر گره بوده و قابلیت تحمل کشش، فشار، پیچش و خمش را دارا است. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های این المان، تحمل بار موج به روش تئوری‌های امواج منظم است. در این المان همچنین امکان اعمال بار موج به‌عنوان بار خارجی به‌صورت سری‌های زمانی وجود دارد[22].

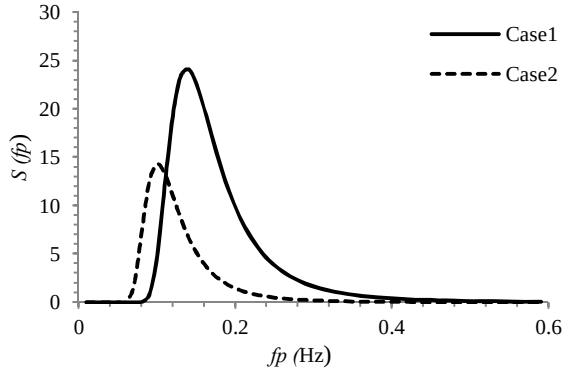


شکل ۳) مدل مونوپایل در نرم‌افزار انسیس

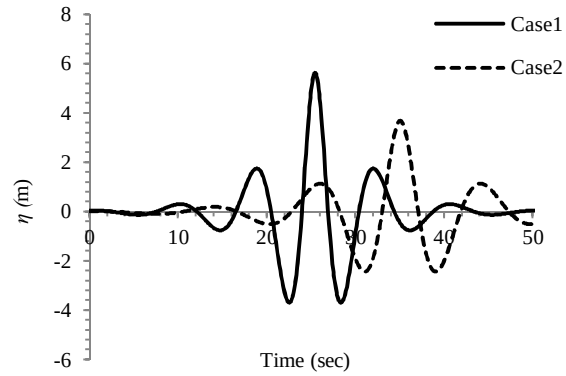
جدول ۲) مشخصات مونوپایل

مشخصات مونوپایل	مقدار
قطر (D)	۴m
ضخامت جداره (t)	۵cm
مدول الاستیسیته (E)	$2/1\times10^{11}\ N/m^2$
ارتفاع (h)	۴۰m

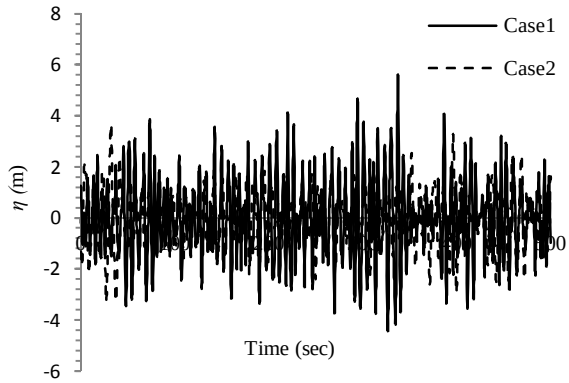
به‌منظور بررسی اعتبار تئوری موج نو در تعیین پروفیل سطح آب، سینماتیک ذرات آب و پارامترهای پایداری مونوپایل دریایی مورد مطالعه، از نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو حالت موج تحت عنوان Case1 و Case2 استفاده می‌شود. امواج مذکور به‌ترتیب دارای ارتفاع موج مشخصه و پریود ۶/۱متر و ۷/۲۶۳ثانیه و ۴متر و ۱۰ثانیه هستند. انتخاب امواج مذکور بر این اصل استوار بوده که ضمن اینکه در محدوده امواج طراحی متعارف خلیج فارس هستند، با دو محتوی انرژی مختلف در محدوده اعتبار تئوری استوکس مرتبه ۵ که رایج‌ترین تئوری موج منظم در تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی است، قرار گیرند؛ تا مقایسه نتایج با نتایج حاصل از امواج منظم امکان‌پذیر باشد. طیف پیرسون- مسکوویچ امواج مذکور در نمودار ۴ نشان داده شده است. تراز سطح آب استخراج‌شده براساس تئوری موج نو در نمودار ۵ و سری زمانی امواج تصادفی خطی تولیدشده در نمودار ۶ ارائه گردیده است.



نمودار ۴) طیف پیرسون- مسکوویچ برای امواج Case1 و Case2



نمودار ۵) تاریخچه زمانی تراز سطح آب با استفاده از تئوری موج نو برای Case1 و Case2



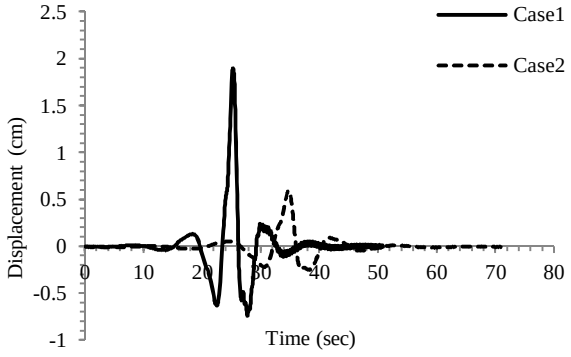
نمودار ۶) تاریخچه زمانی تراز سطح آب با استفاده از تئوری تصادفی خطی برای Case1 و Case2

www.SID.ir

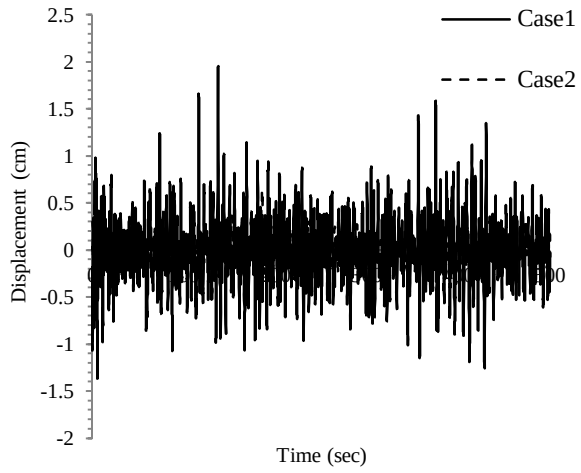
Archive of SID

همان‌طور که در نمودار های ۵ و ۶ دیده می‌شود، مقدار ماکزیمم سطح آب برای امواج Case1 و Case2 در تئوری موج نو به‌ترتیب برابر ۵/۶۱ و ۳/۷متر است. مقادیر متناظر در تئوری تصادفی خطی به‌ترتیب با مقادیر ۵/۶۲ و ۳/۷متر تعیین گشته‌اند. لذا می‌توان گفت که تئوری موج نو، سطح آب در هر دو حالت با اختلاف کمتر از ۱درصد تخمین زده شده‌اند که نشان از اعتبار تئوری موج نو در تعیین نیم‌رخ سطح آب در شرایط مختلف است. مقایسه سرعت ذرات آب در تراز سطح آب برای حالات امواج Case1 و Case2 تحت تئوری امواج تصادفی خطی و تئوری موج نو، نشان می‌دهد که تئوری موج نو توانسته است سرعت ذرات آب را نیز برای حالات امواج Case1 و Case2 به‌ترتیب با درصد اختلاف ۷/۴ و ۷/۲ نسبت به تئوری تصادفی خطی برآورد کند که دقت قابل قبولی را در برآورد سرعت ذرات آب دارا بوده است. با این وجود ماکزیمم شتاب ذرات آب در تراز سطح آب برای دو حالت موج در تئوری موج نو به‌ترتیب برابر ۶/۳۵ و ۲/۳۱متر بر مجذور ثانیه هستند. این مقادیر در تئوری تصادفی برابر ۱۱/۴۲ و ۳ برآورد می‌گردند که به‌ترتیب به میزان ۴۴/۳۹ و ۲۳درصد اختلاف داشته‌اند و مقدار خطای بالاتری نسبت به تخمین پروفیل سطح آب و پروفیل سرعت ذرات آب دارا است.

به‌منظور مقایسه پاسخ‌های سازه، با تعیین پروفیل سرعت و شتاب ذرات آب برای امواج مذکور تحت تئوری موج نو در نرم‌افزار متلب و جای‌گذاری در معادله موریسون به نحوی که در بخش قبل ارائه گردید، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه تعیین می‌گردند. در این راستا با جای‌گذاری پروفیل‌های سرعت و شتاب تحت تئوری‌های موج تصادفی خطی و موج نو در ترازهای مختلف مونوپایل در معادله موریسون، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر تراز مختلف مونوپایل در نرم‌افزار متلب تولید می‌گردند. پس از اعمال این نیروها در نرم‌افزار انسیس و انجام آنالیز دینامیکی خطی، پاسخ‌های سازه‌ای شامل، جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی، تعیین می‌گردند. نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی حداکثر مونوپایل تحت تئوری موج نو و تئوری امواج تصادفی برای حالات امواج Case1 و Case2 به‌ترتیب به شرح نمودارهای ۷ و ۸ ارائه می‌گردد.



نمودار ۷) تاریخچه زمانی جابجایی حداکثر مونوپایل تحت تئوری موج نو برای Case1 و Case2



نمودار ۸) تاریخچه زمانی جابجایی حداکثر مونوپایل تحت تئوری تصادفی خطی برای Case1 و Case2

چنانچه در نمودارهای ۷ و ۸ دیده می‌شود، جابجایی حداکثر مونوپایل برای حالات امواج Case1 و Case2 تحت تئوری موج نو به‌ترتیب برابر ۰/۰۱۸۹ و ۰/۰۰۵۹متر است. مقادیر مذکور تحت تئوری امواج تصادفی خطی به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۱۹۵ و ۰/۰۰۶۴متر برآورد می‌گردند. لذا می‌توان گفت تئوری موج نو توانسته است جابجایی حداکثر مونوپایل برای حالات امواج Case1 و Case2 را به‌ترتیب با مقدار اختلاف ۳ و ۷/۸درصدی نسبت به تئوری تصادفی خطی برآورد کند که این مقدار اختلاف، نشان از دقت قابل قبول تئوری موج نو در تخمین جابجایی حداکثر مونوپایل است. جهت بررسی اعتبار تئوری موج نو در تعیین شاخص‌های قابلیت اعتماد سازه، مقایسه برش‌های پایه مونوپایل و لنگر واژگونی نیز مورد مقایسه قرار گرفتند.

در جدول ۳، نتایج تئوری تصادفی خطی و نتایج حاصل از استفاده از تئوری موج نو در تعیین مقادیر برش و لنگر واژگونی (خمش) و میزان اختلاف آنها ارائه گردیده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد میزان اختلاف برای دو حالت مختلف موج با محتوای انرژی متفاوت در کل کمتر از ۱۰درصد است که بیشترین اختلاف با ۹/۷درصد مربوط به برش پایه و در حالت کم‌انرژی موج می‌باشد. به‌طور کلی اختلاف تخمین پارامترهای مورد بررسی بین موج نو و موج نامنظم در حالت پر انرژی (Case1) کمتر از نصف حالت کم‌انرژی موج (Case2) است.

۴- مقایسه نتایج تئوری موج نو و موج منظم استوکس مرتبه ۵

از دیرباز از امواج منظم تک‌رنگ به‌عنوان جانشین امواج نامنظم در تعیین سینماتیک امواج استفاده می‌شود. تئوری استوکس مرتبه ۵ یک رویکرد عرفی و مورد تایید آیین‌نامه‌های طراحی و مناسب برای کارهای مهندسی می‌باشد[6]. *ترومانس* و همکاران در اعتبارسنجی اولیه تئوری موج نو، به مقایسه نتایج حاصل از این تئوری با استوکس مرتبه ۵ به‌عنوان نماینده تئوری‌های امواج منظم

www.SID.ir

Archive of SID

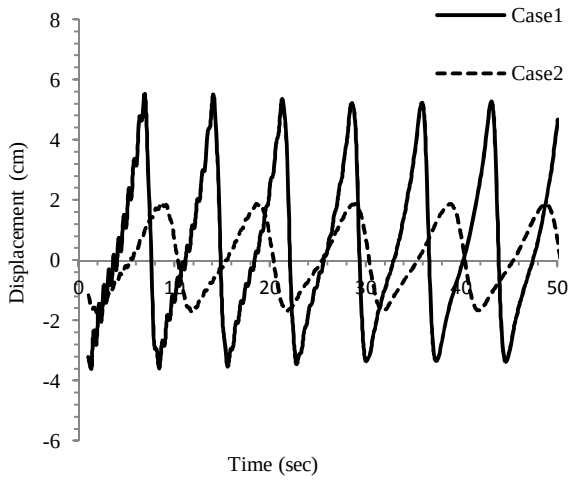
پرداختند[2]. لذا مقایسه نتایج تئوری موج نو با نتایج این تئوری به نوعی اعتبار این تئوری را بررسی می‌کند.

به‌منظور تعیین اعتبار تئوری‌های امواج منظم در تعیین پاسخ‌های سازه‌ای مونوپایل، به تعیین پاسخ‌های سازه‌ای مونوپایل تحت بارگذاری حالات Case1 و Case2 پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه از مسایل بسیار پرکاربرد امواج منظم در تحلیل سازه‌های دریایی انتخاب تئوری موج منظم مناسب است، روش‌های متعددی توسط محققین مختلف برای تعیین محدوده‌های مناسب در به‌کارگیری تئوری‌های امواج منظم مختلف ارائه شده است. در این روش‌ها تئوری موج مناسب معمولاً برحسب تیزی موج (H/gT^2) و عمق نسبی (d/gT^2) انتخاب می‌گردد[23]. در پارامترهای بدون بعد فوق، d عمق آب است. براساس مقادیر مورد توجه در این پژوهش برای حالات Case1 و Case2، تیزی و عمق نسبی به گونه‌ای است که امواج مذکور در محدوه اعتبار تئوری استوکس مرتبه ۵ هستند[24].

به‌منظور بارگذاری دینامیکی موج به روش تئوری استوکس مرتبه ۵ بر پایه توربین از زیربرنامه معرفی موج (WATER TABLE) نرم‌افزار انسیس استفاده گردیده است. مونوپایل مورد نظر با المان لوله که قابلیت اعمال بار موج به روش تئوری‌های امواج منظم را دارا بوده، شبیه‌سازی شده است. لازم به یادآوری است که نرم‌افزار نیاز به شبیه‌سازی محیط دریا نداشته و نیروی امواج با استفاده از روابط نیمه‌تجربی (مثل رابطه موریسون) محاسبه و به المان‌ها در ترازهای مختلف اعمال می‌شود. پس از تحلیل دینامیکی مونوپایل برای حالات امواج Case1 و Case2 تحت بارگذاری موج به روش تئوری استوکس مرتبه ۵، نمودار تاریخچه زمانی جابجایی حداکثر سازه برای امواج مذکور در نمودار ۹ ارائه گردیده است.

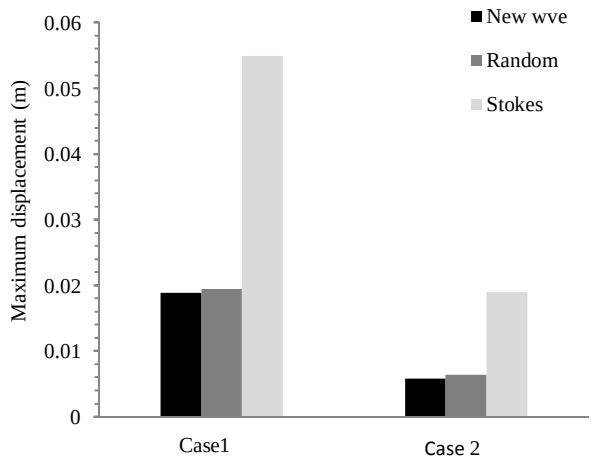
جدول ۳) مقایسه درصد اختلاف تخمین برش پایه (Ev) و لنگر واژگونی (Em) و جابجایی حداکثر (Ed) در تئوری‌های موج نو و استوکس مرتبه ۵ با تئوری موج خطی

نوع موج	پاسخ‌های سازه‌ای	تئوری موج نو	تئوری تصادفی خطی	استوکس مرتبه ۵
Case1	برش (N)	۴۶۷۰۴۹	۴۴۶۱۱۵	۱۳۰۲۷۴۰
	خمش (N.m)	۱۱۶۸۳۸۰۰	۱۱۷۶۴۱۰۰	۳۱۷۱۱۰۰۰
	جابجایی (m)	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۹۵	۰/۰۵۵
	Ev	۴/۷	----	۱۹۲
	Em	۰/۶۸	----	۲۷۰
	Ed	۳	----	۱۸۹
Case2	برش (N)	۱۸۱۷۶۸	۱۶۵۵۵۲	۶۸۱۵۰۸
	خمش (N.m)	۳۸۹۰۵۹۰	۳۹۸۸۸۸۰	۱۲۹۰۴۱۰۰
	جابجایی (m)	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۹
	Ev	۹/۷	----	۳۱۱
	Em	۲/۴	----	۲۲۳
	Ed	۷/۸	----	A۱۹۶



نمودار ۹) تاریخچه زمانی جابجایی حداکثر مونوپایل تحت تئوری استوکس مرتبه ۵ برای Case1 و Case2

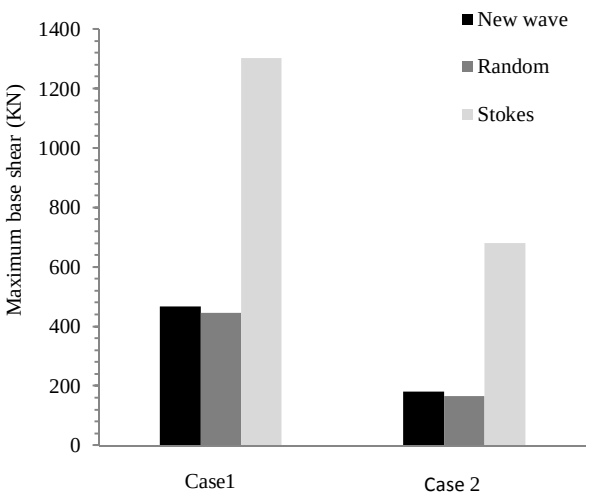
با توجه به نمودار ۹ به وضوح دیده می‌شود که مقادیر جابجایی حداکثر سازه برای حالات امواج Case1 و Case2 در تئوری استوکس مرتبه ۵ به‌ترتیب برابر ۰/۰۵۵ و ۰/۰۱۹متر هستند. لذا می‌توان گفت که مقادیر جابجایی‌های حداکثر مونوپایل برای حالات امواج Case1 و Case2 در تئوری استوکس مرتبه ۵ نسبت به تئوری تصادفی خطی، به‌ترتیب با درصد اختلاف ۱۸۹ و ۱۹۶ برآورد شده‌اند که درصدهایی به مراتب بسیار بیشتر از تئوری موج نو هستند. این درصد اختلاف بسیار بالا نسبت به تئوری موج تصادفی، نشان از ضعف تئوری‌های امواج منظم در تعیین دقیق پارامترهای پایداری مونوپایل دریایی تحت بارگذاری دینامیکی موج است. نمودارهای مقایسه جابجایی حداکثر مونوپایل، برش پایه و لنگر واژگونی این سازه در تئوری‌های موج نو، تصادفی خطی و استوکس مرتبه ۵ برای حالات موج Case1 و Case2 به شرح نمودارهای ۱۰ تا ۱۲ ارائه گردیده است.



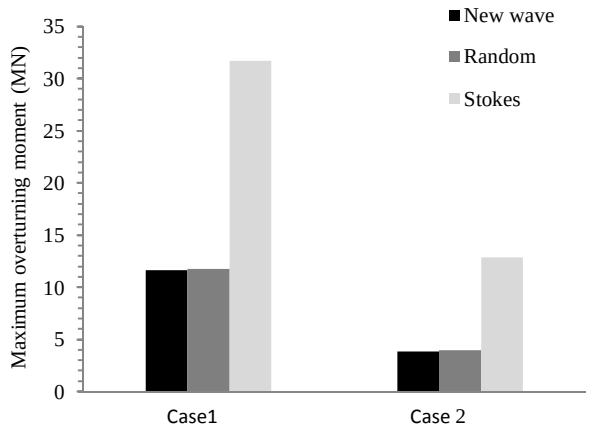
نمودار ۱۰) مقایسه جابجایی حداکثر مونوپایل در تئوری‌های موج نو، تصادفی خطی و استوکس مرتبه ۵

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۱۱) مقایسه برش پایه حداکثر مونوپایل در تئوری‌های موج نو، تصادفی خطی و استوکس مرتبه ۵



نمودار ۱۲) مقایسه لنگر واژگونی حداکثر مونوپایل در تئوری‌های موج نو، تصادفی خطی و استوکس مرتبه ۵

در نمودارهای ۱۰ تا ۱۲ دیده می‌شود که تئوری موج نو در تعیین پارامترهای پایداری مونوپایل شامل جابجایی حداکثر مونوپایل، برش پایه و لنگر واژگونی، از همگرایی خوبی با تئوری تصادفی خطی برخوردار بوده که نشان از اعتبار تئوری موج نو در تعیین جابجایی حداکثر مونوپایل و مهم‌ترین شاخص‌های قابلیت اعتماد سازه شامل برش پایه و لنگر واژگونی مونوپایل است. از طرفی مشاهده می‌شود که تئوری استوکس مرتبه ۵ با اختلاف زیادی نسبت به تئوری‌های مذکور، پاسخ‌های سازه‌ای مذکور را به‌صورت دست بالا تخمین زده است که موجب طرحی غیراقتصادی در تحلیل و طراحی مونوپایل‌های دریایی می‌شود. مقادیر عددی جابجایی حداکثر مونوپایل و شاخص‌های قابلیت اعتماد مونوپایل شامل برش پایه و لنگر واژگونی مونوپایل، برای حالات امواج Case1 و Case2 تحت تئوری‌های موج نو، تصادفی خطی و استوکس مرتبه ۵ به شرح جدول ۳ ارائه می‌گردد که Ed، Ev و Em به‌ترتیب درصد اختلاف مدل در پیش‌بینی مقادیر جابجایی حداکثر مونوپایل، برش پایه و لنگر واژگونی نسبت به تئوری تصادفی خطی است (جدول ۳).

براساس جدول ۳ به وضوح دیده می‌شود که درصد اختلاف تخمین شاخص‌های قابلیت اعتماد مونوپایل مورد مطالعه شامل برش پایه و لنگر واژگونی در هر دو حالت موج Case1 و Case2 تحت تئوری موج نو نسبت به تئوری موج تصادفی، نسبت به موج منظم شرایط بسیار بهتری دارد. در این راستا با توجه به درصد بسیار پایین اختلاف تئوری موج در تخمین پارامترهای پایداری مونوپایل دریایی، می‌توان گفت تئوری موج نو مدلی مناسب برای تعیین پروفیل سطح آب و سینماتیک ذرات آب بوده و نهایتاً با دقت قابل قبول خود در تعیین پارامترهای پایداری مونوپایل دریایی، می‌تواند جایگزینی مناسب و معتبر برای شبیه‌سازی چندساعته امواج تصادفی باشد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه‌های محاسباتی بالای آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی چندساعته برای امواج تصادفی و عدم دقت کافی امواج منظم معادل، تئوری موج نو به‌عنوان جایگزین مناسبی جهت تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی به‌ویژه توربین‌های بادی با پایه مونوپایل، به‌کار می‌رود. با این وجود لازم است اعتبار این روش مورد توجه قرار گیرد. در این راستا در این پژوهش ابتدا با مقایسه نتایج حاصل از تئوری موج نو با نتایج آزمایشگاهی، نتایج به‌دست‌آمده شامل تخمین پروفیل سطح آب، برش پایه و لنگر واژگونی در شرایط آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. همچنین اعتبار تئوری موج نو در تعیین پروفیل سطح آب، سینماتیک موج و پاسخ‌های سازه‌ای مونوپایل دریایی از طریق مقایسه با مدل موج تصادفی خطی (بسط فوریه طیف موج) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از بسط طیف انرژی پیرسون- مسکوییچ، موج مورد نظر مطابق تئوری‌های موج نو و تئوری تصادفی خطی تولید گردید. سپس با مدل‌کردن مونوپایل توربین بادی و بارگذاری دینامیکی موج برای حالات مختلف موج تحت تئوری موج نو و تئوری تصادفی خطی، پروفیل سطح آب، سرعت و شتاب و براساس آن جابجایی حداکثر سازه و برش پایه و لنگر واژگونی مونوپایل به‌عنوان پارامترهای پایداری سازه تعیین گردید و نتایج مذکور در این دو تئوری مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج نشان می‌دهد که تئوری موج نو با کاهش بسیار چشم‌گیر زمان محاسبات آنالیز سازه، با درصد اختلاف کمتر از ۱۰درصد، دقت قابل قبولی در تعیین پروفیل سطح آب و سرعت ذرات را دارا بوده و شتاب ذارت آب را با دقت قابل قبولی برآورد کرده است. در این راستا جابجایی حداکثر مونوپایل و شاخص‌های قابلیت اعتماد مونوپایل مانند برش پایه و لنگر واژگونی برای حالات مختلف امواج در تئوری موج نو با درصد خطای کمتر از ۱۰درصد نسبت به تئوری تصادفی برآورد گشته‌اند. لذا می‌توان گفت که تئوری موج نو مدلی اطمینان‌بخش برای تعیین سینماتیک امواج بوده و جایگزینی مناسب برای شبیه‌سازی چندساعته امواج تصادفی در تحلیل و طراحی توربین‌های بادی مونوپایل است. همچنین مقایسه نتایج

www.SID.ir

Archive of SID

تئوری‌های امواج منظم مرتبه ۵ برای پاسخ‌های سازه‌ای نشان می‌دهد که پاسخ‌های سازه‌ای مونوپایل در تئوری امواج منظم تک‌رنگ استوکس مرتبه ۵، دست بالا برآورد گردیده که موجب طرحی غیراقتصادی و غیرمهندسی در تحلیل و طراحی توربین‌های بادی فراساحل می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.
تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.
سهم نویسندگان: میلاد شاکرمی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰%)؛ احمد شانه‌ساززاده (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۰%)؛ ناصر شابختی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۲۰%)
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

منابع

1- Rozario JB, Tromans PS, Taylor PH, Efthymiou M. Comparison of loads predicted using "NewWave" and other wave models with measurements on the tern structure. In: Society for Underwater Technology. Wave kinematics and environmental forces. Dordrecht: Springer; 1993.
2- Tromans PS, Anaturk AR, Hagemeijer P. A new model for the kinematics of large ocean waves-application as a design wave-application as a design wave. The 1st International Offshore and Polar Engineering Conference, 1991 August 11-16, Edinburgh, United Kingdom. Mountain View: International Society of Offshore and Polar Engineers; 1991.
3- Adhikari S, Bhattacharya S. Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations. Shock and Vibration. 2012;19(1):37-56.
4- O'Neill L, Fakas E, Cassidy M. A methodology to simulate floating offshore operations using a design wave theory. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2006;128(4):304-313.
5- Arena F, Fedele F. Nonlinear space-time evolution of wave groups with a high crest. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2005;127(1):46-51.
6- Najafian G. Application of system identification techniques in efficient modelling of offshore structural response. Part I: Model development. Applied Ocean Research. 2007;29(1-2):1-16.
7- Pierson Jr WJ, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. Journal of Geophysical Research. 1964;69(24):5181-5190.
8- Alves JH, Banner ML, Young IR. Revisiting the Pierson-Moskowitz asymptotic limits for fully developed wind waves. Journal of Physical Oceanography. 2003;33(7):1301-1323.
9- Madsen PA, Fuhrman DR. Third-order theory for multi-directional irregular waves. Journal of Fluid Mechanics. 2012;698:304-334.
10- Creamer DB, Henyey F, Schult R, Wright J. Improved linear representation of ocean surface waves. 1989;205:135-161.
11- Dastan Diznab MA, Mohajernassab S, Seif MS, Tabeshpour MR, Mehdigholi H. Assessment of offshore structures under extreme wave conditions by modified endurance wave analysis. Marine Structures. 2014;39:50-69.
12- Cassidy MJ, Eatock Taylor R, Houlsby GT. Analysis of jack-up units using a constrained NewWave methodology. Applied Ocean Research. 2001;23(4):221-234.
13- Det Norske Veritas. Environmental conditions and environmental loads. Oslo: Det Norske Veritas; 2010.
14- ITTC Seakeeping Committee. Report of the seakeeping committee. The 17th International Towing Tank Conference, 1984 September 8-15, Goteborg, Sweden. Publisher city?: Publisher?; 1984. pp. 457-534.
15- Mohajernassab S, MA Dastan Diznab, Tabeshpour MR, Mehdigholi H, Seif MS. Application of New-wave theory in the Endurance Wave method to assess offshore structures under the Persian Gulf wave conditions. Journal of Marine Engineering. 2014;9(18):71-82. [Persian]
16- Kudeih M, Cornett A, Nistor I. An experimental study of wave and current-induced forces on a compact linear array of vertical cylinders in shallow water. 32nd Conference on Coastal Engineering 2010. 30 June-5 July 2010, Shanghai, China. Red Hook: Curran Associates, Inc.; 2013. pp. 614-624.
17- Chakrabarti S. Handbook of offshore engineering (2-volume set). Amsterdam: Elsevier; 2005. pp. 914-916.
18- Dallyn P, El-Hamalawi A, Palmeri A, Knight R. Experimental testing of grouted connections for offshore substructures: A critical review. Structures. 2015;3:90-108.
19- Chen T, Wang X, Yuan G, Liu J. Fatigue bending test on grouted connections for monopile offshore wind turbines. Marine Structures. 2018;60:52-71.
20- Stockard DM. Effects of pile-soil-water interaction on the dynamic response of a seismically excited dynamic response. 8th Annual Offshore Technology Conference, 1976 May 3-6, Houston, Texas. Houston: Offshore Technology Conference; 1976.
21- Golafshani AA, Gholizad A. Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms. Journal of Constructional Steel Research. 2009;65(1):180-187.
22- ANSYS. Mechanical apdl 15 manual. Version 15 [Software]. 2015 [Unknown cited]. Available from: Not Found
23- Fenton JD. A fifth- order stokes theory for steady waves. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1985;111(2): 216-234.
24- Skjelbreia L, Hendrickson J. Fifth order gravity wave theory. The 7th Conference on Coastal Engineering, 1960, The Hague, Netherlands. Unknown city: Unknown Publisher; 1960. pp. 184-196.

www.SID.ir