کاربرد تئوری موج نو در روش موج دوام جهت ارزیابی سکوی پایه ثابت تحت بارگذاری امواج خلیج فارس

سعید مهاجرنسب[۱]، محمدعلی داستان[۲]، محمدرضا تابش‌پور[۳]*، محمدسعید سیف[۴]، حمید مهدیقلی[۵]

[۱] کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ saeed.mohajer.68@gmail.com
[۲] دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ dastan@mech.sharif.edu
[۳] استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ tabeshpour@sharif.edu
[۴] استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu
[۵] استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ mehdi@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:
تحلیل موج دوام اصلاح شده
سکوی پایه ثابت
تئوری موج نو، ارزیابی

چکیده

در این مقاله، اصلاح روش تحلیل موج دوام (EWA) در ارزیابی سکوهای دریایی بر اساس تئوری موج نو معرفی شده است. موج دوام روشی جدید برای تخمین پاسخ سازه‌های فراساحل در حالت‌های دریایی مختلف با استفاده از رکوردهای افزایشی است. مطالعه فوق، یک روش کاربردی جهت انتخاب مدت زمان تحلیل و روند افزایشی رکوردها ارائه می‌کند. روند تولید رکوردهای امواج بر اساس تئوری موج نو ارائه شده است. علاوه بر این، ارزیابی یک مدل ساده شده چند درجه آزادی از یک سکوی پایه ثابت واقعی تحت امواج حدی نیز بر اساس روش فوق انجام گرفته است. همچنین مقایسه‌ای بین این تحلیل و شبیه-سازی ۳ ساعته امواج تصادفی برای بررسی دقت این روش صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهاد شده، کاربردی ساده‌تر در طراحی و ارزیابی سکوهای دریایی دارد.

Application of New-wave theory in the Endurance Wave method to assess offshore structures under the Persian Gulf wave conditions

Saeed Mohajernassab[1], Mohammad Ali Dastan[2], Mohammad Reza Tabeshpour[3], Mohammad Saeed Seif[4], Hamid Mehdigholi[5]

[1] M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology
[2] PhD candidate, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology
[3] Assistant professor, Center of Excellence in Hydrodynamics and Dynamic of Marine Vehicles, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology
[4] Professor, Center of Excellence in Hydrodynamics and Dynamic of Marine Vehicles, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology
[5] Assistant professor, Center of Excellence in Hydrodynamics and Dynamic of Marine Vehicles, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 14 Aug. 2013
Accepted: 23 Jan. 2014
Available online: 19 Mar. 2014

Keywords:
Endurance Wave Analysis
Jacket platform
New-wave theory
Assessment

ABSTRACT

In this paper, the modification of Endurance Wave Analysis (EWA) in assessment of offshore platforms based on the new-wave theory is introduced. EWA is a new method to estimate the response of offshore structures in different sea states by use of incremental records. This study is offered practical procedures to select time duration and intensifying trend of the records. In addition, a simplified multi-degree of freedom model of a jacket platform under extreme waves is assessed through current study. A comparative study between this analysis and 3-hour random wave simulation to investigate the accuracy has also been carried out. The results show that the proposed procedure is a convenient method in design and assessment of offshore platforms.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

۱- مقدمه

اصلی‌ترین هدف در ارزیابی تحت امواج حدی اطمینان از مقاومت سازه در مقابل طوفان در حالت‌های دریایی[۱] مختلف است. به بیان دیگر، پاسخ سازه برای نیازهایی مانند عملیات تولید، ایمنی و قابلیت سرویس‌دهی سازه مورد قبول باشد [۱]. همچنین تغییر در کاربری سکو، اصلاح شرایط محیطی آن و دوباره ارزیابی کردن تحت بارگذاری‌های محیطی بر اهمیت ارزیابی تاکید می‌کند [۲]. با این وجود، به دلیل هندسه پیچیده، اندرکنش آب - سازه و خاک – شمع – سازه، ارزیابی سکوهای دریایی یک گام چالش‌برانگیز در مهندسی فراساحل محسوب می‌شود.

به دلیل ماهیت دینامیکی و تصادفی امواج دریا، تحلیل تاریخچه زمانی یک روش مطمئن برای ارزیابی دقیق عملکرد سازه به‌خصوص سکوهای آب‌های عمیق و سازه‌های منعطف است [۳]. در این روش، رفتار دینامیکی سکو براساس اعمال امواج تصادفی به اعضای مختلف آن به عنوان تابعی از زمان درنظر گرفته می‌شود. با وجود مزیت‌های مختلف روش تاریخچه زمانی، به دلیل پیچیدگی و زمان بر بودن آن، این روش کارایی محدودی در فرآیند ارزیابی دارد.

در طول دهه‌های گذشته، مطالعات زیادی در مورد ارزیابی سکوهای فراساحل در سطح طراحی یا ظرفیت نهایی انجام شده است [۴-۹]. با گسترش توان محاسباتی رایانه‌ها، تحلیل در سطوح مختلف بارگذاری موج با استفاده از روش‌های تاریخچه زمانی ممکن شد. گل‌افشانی و همکاران روش تحلیل موج افزایشی[۲] (IWA) را برای ارزیابی عملکرد سازه تحت تحریک‌های مختلف موج معرفی نمودند [۱۰]. این روش مزیت‌های تحلیل دینامیکی افزایشی[۳] (IDA) که روشی شناخته شده در ارزیابی لرزه‌ای است را به همراه داشت [۱۱]. برای غلبه بر هزینه‌های محاسباتی، آن‌ها پیشنهاد دادند که به جای مدت زمان ۳ ساعت برای شبیه‌سازی امواج دریا، فقط می‌توان بر روی بیشینه ارتفاع امواج تمرکز کرد. اما این روش نمی‌تواند به درستی به ماهیت پدیده بارگذاری موج اشاره داشته باشد، از این رو نویسندگان اذعان داشتند که ممکن است در سایر سکوها جواب‌های متفاوتی حاصل شود. زین‌الدینی و همکاران، روش تحلیل موج دوام[۴] (EWA) را که در آن از تئوری موج نو مقید شده[۵] به عنوان تئوری قابل اطمینان برای شبیه‌سازی امواج حدی استفاده شده است را معرفی نمودند [۱۲]. در این روش، زمان رکورد به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و یک مدت زمان ثابت برای هر حالت دریایی در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، روند افزایش خطی برای افزایش ارتفاع موج مشخصه[۶] در نظر گرفته شده است.

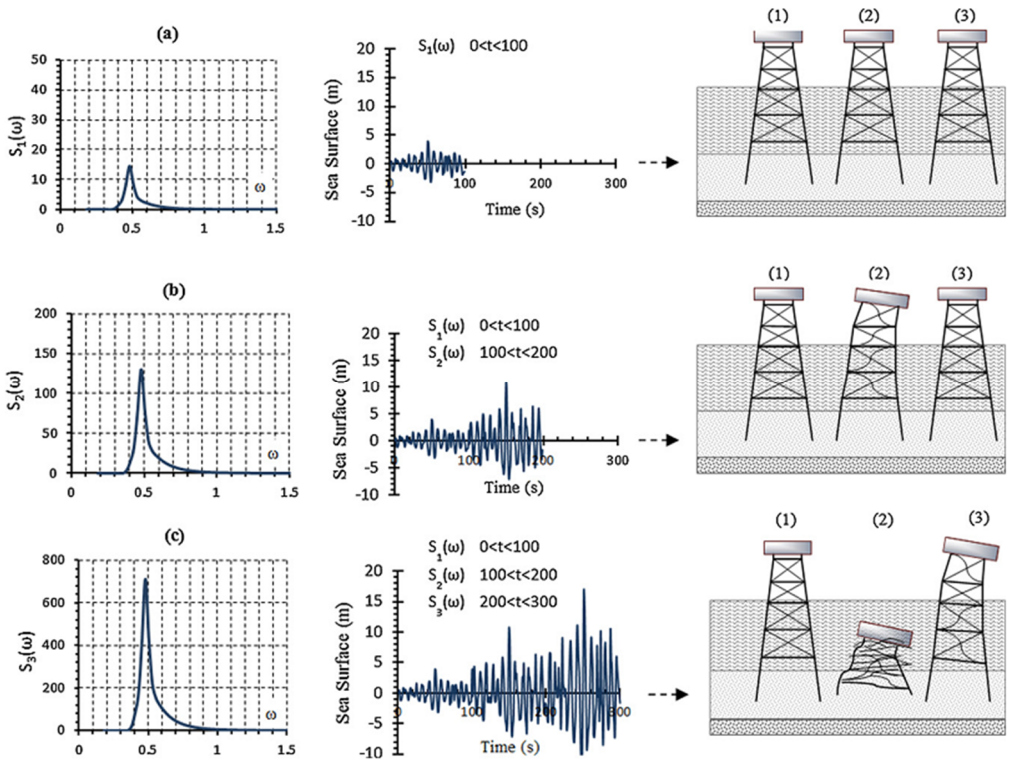
با وجود مزیت‌های تحلیل موج دوام، این روش نیازمند اصلاحاتی به‌مخصوص در انتخاب زمان است. تحلیل موج دوام اصلاح شده، روشی نوین برای به دست آوردن زمان بهینه تحلیل بر اساس دوره تناوب قله طیف را ارائه می‌دهد که در آن بازه زمانی قابل قبولی برای رکورد امواج نتیجه می‌شود. این روش می‌تواند برای طراحی و ارزیابی سکوهای فراساحل مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مفاهیم تحلیل موج دوام و موج دوام اصلاح شده

در تحلیل موج دوام برای بررسی عملکرد سازه‌ها از توابع قطار موج افزایشی استفاده می‌شود. مفاهیم پایه‌ای تحلیل موج دوام را می‌توان با یک آزمایش فرضی مطابق شکل ۱ توضیح داد. در این آزمایش، سه سازه مختلف با مشخصات دینامیکی نامعلوم در معرض یک تابع قطار موج افزایشی[۷] (IWTF) قرار می‌گیرند. در ابتدا، یک بارگذاری تاریخچه زمانی مربوط به ارتفاع موج مشخصه (H_s) دوره تناوب قله طیف (T_p) و مدت زمان مشخص (t_d) به سازه وارد می‌شود. به دلیل این که دامنه تحریک کوچک است، هر سه سکو بعد از این بارگذاری پایدار باقی می‌مانند. در گام‌های بعدی، ارتفاع‌های موج مشخصه به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند ولی مدت زمان تحریک ثابت باقی می‌ماند. با گذشت زمان، شدت تحریک به نقطه‌ای می‌رسد که یکی از سازه‌ها (سکو ۲) از حد سرویس دهی[۸] خود خارج می‌شود. با گذشت بیشتر زمان، تحریک شدیدتر شده به طوری که سکو ۲ به طور کامل فرومی‌ریزد، سکو ۳ آسیب جدی دیده و از سرویس دهی خارج می‌شود ولی سکو ۱ همچنان پایدار است. با توجه به این آزمایش، هرچه زمان دوام بیشتر باشد، سکو عملکرد بهتری دارد. در این روش، هر متغیر پاسخ مهندسی[۹] را می‌توان به عنوان معیار خرابی در نظر گرفت و تحلیل می‌تواند تا زمانی که سطح تحریک مورد نظر پوشش داده شود، ادامه پیدا کند.

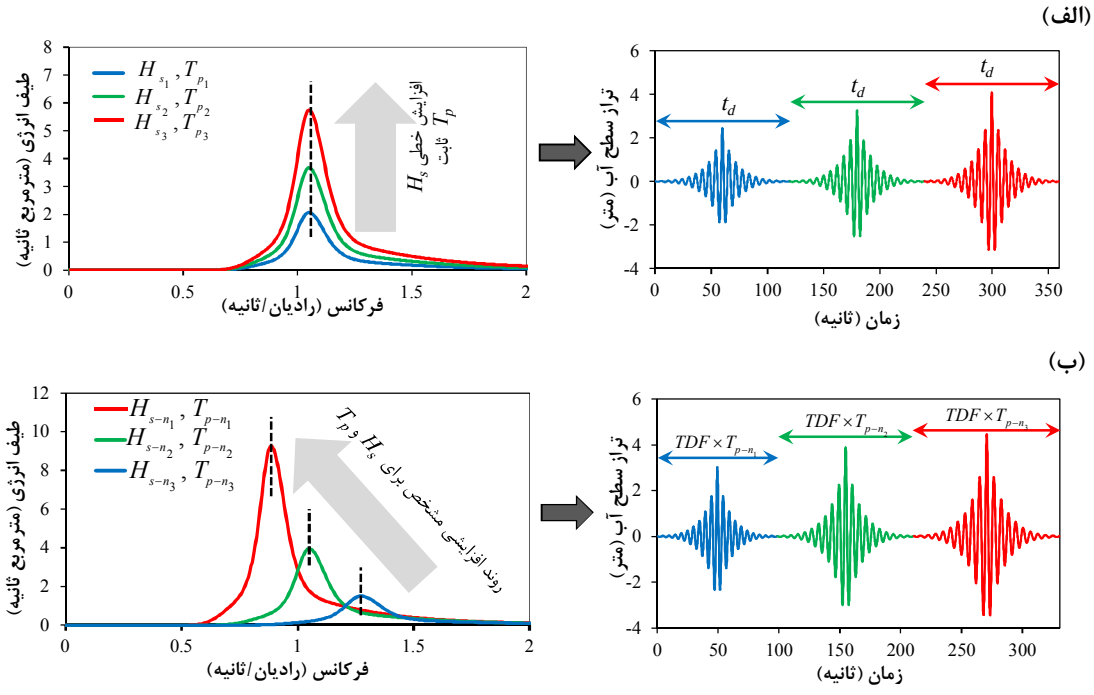
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]



شکل ۱ - آزمایش فرضی برای نشان دادن مفهوم روش موج دوام [۱۲]

یک چالش در تحلیل موج دوام در نظر گرفته شده و تحلیل موج دوام اصلاح شده بر اساس این موضوع صورت گرفته است. در تحلیل موج دوام، مدت زمان رکورد برای تمام سطوح تحریک ثابت در نظر گرفته شده است. در این مورد، اگر این زمان طولانی در نظر گرفته شود، نه تنها هزینه محاسباتی افزایش پیدا می‌کند بلکه در تناقض با مهمترین مزیت تحلیل موج دوام یعنی کاهش زمان محاسبات خواهد بود. از طرف دیگر، اگر زمان کوتاه در نظر گرفته شود، ممکن است پاسخ بحرانی سازه و یا مانا بودن سطح آب از دست داده شود. در ادامه توضیح داده خواهد شد که در این مطالعه برای هر حالت دریایی، زمان تحلیل متغیر در نظر گرفته شده و بر اساس دوره تناوب قله طیف تعیین می‌گردد.شکل ۲ مقایسه بین تحلیل موج دوام و موج دوام اصلاح شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ – نمونه‌ای از (الف) تحلیل موج دوام (ب) موج دوام اصلاح شده و طیف‌های مربوطه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

همانطور که در قسمت (الف) مشخص است، مدت زمان ثابت درنظر گرفته شده است و ارتفاع موج مشخصه به صورت خطی افزایش پیدا کرده است. همچنین، در تولید رکوردهای موج دوام، دوره تناوب قله موج برای تمام حالات دریایی ثابت در نظر گرفته شده است. در قسمت (ب)، تغییر در مدت زمان در حالات دریایی، افزایش ارتفاع موج مشخصه بر اساس داده‌های موج مربوط به محل مورد نظر و تغییر دوره تناوب قله طیف با توجه به ارتفاع موج مشخصه نشان داده شده است. بنابراین، روش تحلیل موج دوام اصلاح شده زمان محاسباتی بهینه‌تر، کاربرد ساده‌تر و همچنین انطباق بیشتری با ماهیت امواج دارد.

۳- مشخصات رکوردهای تحلیل موج دوام اصلاح شده

۳-۱- مدت زمان تحلیل

استفاده از شبیه‌سازی زمانی به‌طور متداول در تخمین پاسخ حدی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های مختلفی را می‌توان برای تولید رکوردهای تاریخچه زمانی استفاده کرد که در آن‌ها در نظر گرفتن زمان بهینه به دلیل هزینه محاسباتی بسیار مهم است. در این راه، گزارش ITTC اهمیت این مورد را بیان می‌کند و استفاده از تعداد سیکل‌های موج را برای تخمین مدت زمان پیشنهاد می‌کند [۱۳]. در تحلیل موج دوام، مدت زمان رکوردهای تولید شده برای تئوری موج تصادفی ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده که نمی‌تواند به درستی سطح امواج دریا را شبیه‌سازی کند. به طور معمول، ۳ ساعت زمان استاندارد پیشنهاد شده برای رکوردهای موج تصادفی است ولی این زمان قطعی و غیرقابل تغییر برای مانا بودن رکورد امواج نیست. در واقع آئین‌نامه بیان می‌دارد که مدت زمان مانا بودن سطح دریا می‌تواند از ۳۰ دقیقه تا ۱۰ ساعت تغییر کند [۱۴].

در این مطالعه، ضرایب مختلف دوره تناوب قله طیف که ضریب مدت زمان[۱۰] (TDF) نامگذاری شده است مورد تحقیق قرار گرفته‌اند تا زمان بهینه در حالات حدی را مشخص نمایند. تئوری موج نو نیز برای تولید رکوردهای تحلیل موج دوام اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفته و با درنظر گیری این روش، ضریب مدت زمان مناسب به دست آمده است.

تئوری موج نو[۱۱] یک موج مرتبه اول است که از طیف انرژی موج[۱۲] به دست می‌آید و به عنوان جایگزین برای شبیه‌سازی تاریخچه زمانی امواج تصادفی معرفی می‌شود [۱۵]. این روش شامل مجموع موجک‌های خطی جهت‌دار با یک قله حدی می‌شود که این قله از مجموع تمامی قله‌های موجک‌ها در یک زمان و مکان خاص به وجود می‌آید. فرضیات مورد نیاز در تئوری موج نو همان فرضیات استفاده شده در تولید امواج تصادفی در شبیه‌سازی‌های تاریخچه زمانی است. موج نو، خود حالت خطی محتمل‌ترین موج حدی است و شکلی شبیه تابع خودهمبستگی[۱۳] دارد [۱۶].

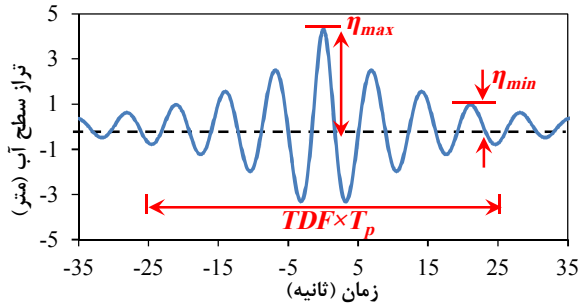
معیار پیشنهاد شده برای محاسبه زمان بهینه به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\frac{\eta_{\min}}{\eta_{\max}} = \frac{\text{Minimum amplitude of the crests}}{\text{Maximum amplitude of the crests}} \quad (۱)$$

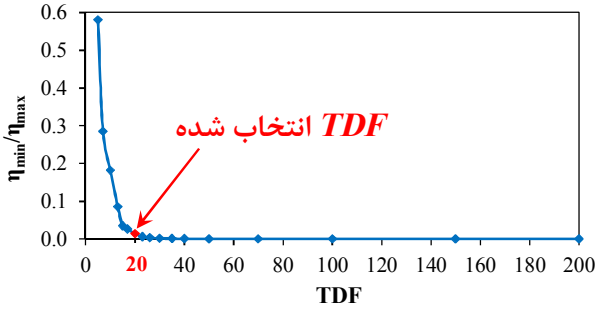
$$t \in \left[0\ ,\ TDF \times T_p\right]$$

همچنین، در شکل ۳ کمینه و بیشینه دامنه برای رکورد موج نو در مدت زمان بررسی نشان داده شده است. شکل ۳ نسبت معرفی شده برای ضریب مدت زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. بنابراین، بعد از ۲۰ برابر دوره تناوب قله طیف، این نسبت به سمت صفر میل می‌کند پس این مقدار میتواند مدت زمان لازم برای رکوردهای موج نو باشد.

(الف)



(ب)



شکل ۳ – روش انتخاب TDF برای تئوری موج نو (الف) تعریف متغیرهای ضریب مدت زمان برای تئوری موج نو و (ب) نسبت کمینه و بیشینه دامنه‌ها برای ضریب مدت زمان‌های مختلف

۴- تولید رکوردهای تحلیل موج دوام اصلاح شده

تئوری‌های مختلفی (منظم یا نامنظم) می‌تواند در تولید رکوردهای موج دوام اصلاح شده که تابع قطار موج افزایشی اصلاح شده نامگذاری شده‌اند استفاده شوند [۱۷]. بر این اساس، m

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

تاریخچه زمانی جداگانه که هر کدام یک طیف انرژی موج با ارتفاع موج مشخصی را نشان می‌دهند به هم می‌پیوندند تا یک تاریخچه زمانی را تشکیل دهند. همانطور که بالا اشاره شد، برای kامین سری زمانی، مدت زمان ضریبی از دوره تناوب قله طیف آن خواهد بود و این ضریب بر اساس تئوری موج انتخاب شده تعیین می‌گردد. معادله ۲ بازه زمانیkام را به دست می‌دهد.

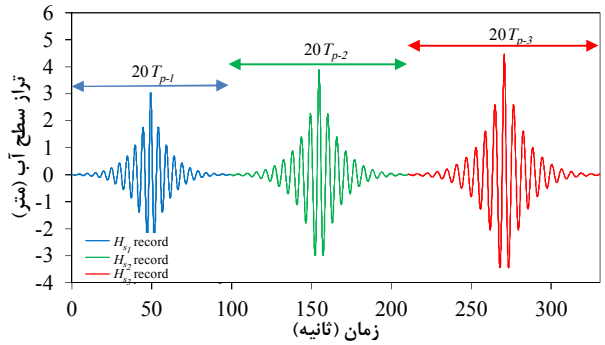
$$\begin{aligned} & t_{k-1} \le t \le t_k \\ & t_0 = 0 \\ & t_k = TDF \times \\ & \left(T_{p-n_1} + T_{p-n_2} + \ldots + T_{p-n_{k-1}} + T_{p-n_k}\right): \\ & \qquad \mathrm{k}=1,2,\ldots,m \end{aligned} \qquad (۲)$$

۴-۱- مدل موج نو افزایشی اصلاح شده

تئوری موج نو محتمل‌ترین تراز سطح آب را در اطراف قله با استفاده از تئوری‌های آمار و احتمالاتی محاسبه می‌کند. با توجه به کوتاهی زمان تحلیل در موج نو، این تئوری بسیار ارزشمند است. بنابراین این تئوری روشی مناسب برای تخمین پاسخ حدی سازه در بارگذاری موج است. همانطور که قبلا توضیح داده شد، ۲۰ برابر دوره تناوب قله طیف زمان مناسب برای رکوردهای به دست آمده از تئوری موج نو است. تولید رکورد موج نو افزایشی اصلاح شده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_{MINW}(t) = \begin{cases} \dfrac{\alpha_1}{\sigma_1^2}\sum_{n=1}^{N} S_1(\omega_n)\Delta\omega\cos(k_n X - \omega_n t) & t_0 \le t < t_1 \\ \dfrac{\alpha_2}{\sigma_2^2}\sum_{n=1}^{N} S_2(\omega_n)\Delta\omega\cos(k_n X - \omega_n t) & t_1 \le t < t_2 \\ \vdots & \\ \dfrac{\alpha_k}{\sigma_k^2}\sum_{n=1}^{N} S_k(\omega_n)\Delta\omega\cos(k_n X - \omega_n t) & t_{k-1} \le t < t_k \\ \vdots & \\ \dfrac{\alpha_m}{\sigma_m^2}\sum_{n=1}^{N} S_m(\omega_n)\Delta\omega\cos(k_n X - \omega_n t) & t_{m-1} \le t \le t_m \end{cases} \qquad (۳)$$

که η_{MIRSE} رکورد موج نو افزایشی اصلاح شده، $S_k(\omega_n)$ مقدار $S_k(\omega)$ در فرکانس ω_n برای kامین طیف موج و X مکان را نشان می‌دهند. α و σ نیز به ترتیب تراز قله[۱۴] و واریانس طیف هستند. در این مقاله تراز قله از یک مطالعه مقایسه‌ای تعیین شده است. برای مثال، یک نمونه از رکورد تراز دریای تصادفی افزایشی اصلاح شده در شکل ۴ نمایش داده شده است. در جدول ۱ ارتفاع موج مشخصه و دوره تناوب های مربوط به آن جهت تولید رکوردهای موج نو افزایشی اصلاح شده ارائه گردیده است.



شکل ۴ – نمونه‌ای از تاریخچه زمانی رکورد موج نو افزایشی اصلاح‌شده

جدول ۱ - ارتفاع موج مشخصه و دوره تناوب قله طیف جهت تولید رکوردها

ارتفاع موج مشخصه (متر)	دوره تناوب قله طیف (ثانیه)	تراز قله (متر)
۲/۸۲	۴/۹۴	۲/۳۱
۳/۶۲	۵/۵۹	۲/۹۶
۴/۱۵	۵/۹۹	۳/۴۰
۴/۶۷	۶/۳۵	۳/۸۲
۵/۳۳	۶/۷۷	۴/۳۶
۵/۸۳	۷/۱۰	۴/۷۷

۵- مطالعه موردی

۵-۱- مدلسازی

مدلسازی کامل یک سکوی واقعی، روشی دقیق برای اندازه‌گیری پاسخ با جزئیات آن است. اما با توجه به هندسه پیچیده و تحلیل‌های زمان‌بر سازه، بسیاری از محققین از مدل ساده شده چند درجه آزادی استفاده نموده اند [۱۸-۲۲]. این مدل تقریبی نمی‌تواند پاسخ اجزاء سازه را ارزیابی کند اما پاسخ کلی سازه را با دقت خوبی تخمین می‌زند. علاوه بر این، در این روش، هزینه محاسباتی به طور چشمگیری در مقایسه با مدل دقیق کاهش پیدا می‌کند.

برای درک و ارزیابی روش تحلیل موج دوام اصلاح شده، سکوی رسالت به عنوان مطالعه موردی که در شکل ۵ نشان داده شده، انتخاب شده است. این سازه، یک سکوی ۴ پایه که در عمق ۶۸/۲ متری خلیج فارس واقع شده است. این سکو به یک مدل ۷ درجه آزادی ساده شده است که دوره تناوب‌های سه مود اول آن به ترتیب ۲/۳۵۵، ۰/۵۰۲ و ۰/۲۴۳ ثانیه می‌باشد. جرم‌های متمرکز و سختی‌ها بر اساس مشخصات سازه واقعی و به طوری که دوره تناوب‌های طبیعی مشابه مدل دقیق باشد، مدل شده است. برای به دست آوردن مقادیر جرم، به این صورت عمل شده است که جرم عرشه به صورت جداگانه در بالاترین تراز قرارداده شده است. در سایر ترازها به اندازه نصف ارتفاع تراز از بالا و نصف ارتفاع تراز از پایین مقادیر جرم اجزاء با یکدیگر جمع شده است.

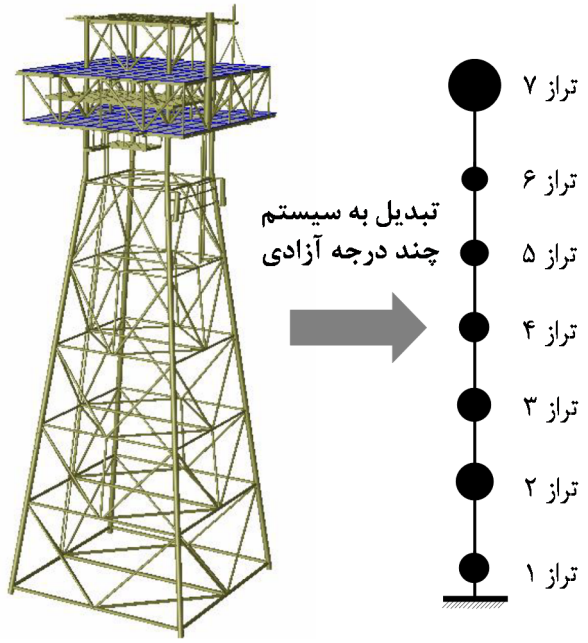
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

جدول ۲ - مشخصات سکوی رسالت

سکوی رسالت	تراز ۱	تراز ۲	تراز ۳	تراز ۴	تراز ۵	تراز ۶	تراز ۷
جرم [ton]	۱۰۶	۱۲۹	۱۱۶	۱۰۵	۹۲	۶۳	۱۷۹۰
سختی [MN/m]	۱۷۹	۱۴۶	۱۴۶	۱۲۱	۱۰۶	۹۰	۳۸
حجم اعضا [m^3]	۱۳۴	۱۳۴	۱۱۷	۱۱۳	۱۰۳	۲۲	۰
سطح تصویرشده[۱۵] [m^2]	۲۲۷	۲۳۸	۲۱۳	۲۰۹	۱۹۱	۳۵	۰

همچنین اثر جرم افزوده نیز در این جرم‌ها لحاظ شده است. سختی ترازها نیز با استفاده از منحنی نیرو- جابه‌جایی در مدلسازی کامل سه بعدی سکو در نرم افزار انسیس[۱۶] به دست آمده است. در این روش، برای محاسبه سختی هر تراز، طبقات پایین تر را ثابت فرض کرده و نیرو را در محل تراز جرمی آن طبقه اعمال کرده و سختی محاسبه می‌شود. اما این روش محاسبه سختی کاملا صحیح نیست و این مقادیر به نحوی اصلاح شده است تا دوره تناوب‌های سازه مطابق با مدلسازی سه بعدی سکو باشد. مقادیر مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است. ماتریس میرایی سازه به عنوان میرایی رایلی در نظر گرفته شده و نسبت میرایی ۲٪ برای مودهای اول و دوم آن فرض شده است.



شکل ۵ - سکوی رسالت و مدل ساده شده چند درجه آزادی

برای این مدل، معادله حرکت سیستم با بارگذاری موج به صورت زیر است:

$$M_0\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F_I + F_D \qquad (۳)$$

که M_0، C و K ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی هستند. همچنین X، $\dot{X}$ و $\ddot{X}$ جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه هستند.

F_I و F_D نیروهای اینرسی[۱۷] و پسا[۱۸] محاسبه شده از معادله موریسون بوده و روابط آن به صورت زیر می‌باشد:

$$F_I = \rho C_m V\dot{U}$$
$$F_D = \rho C_d A'(U-\dot{X})\left|U-\dot{X}\right| \qquad (۴)$$

که U و $\dot{U}$ سرعت و شتاب ذرات موج است و ρ چگالی آب می‌باشد که برابر ۱۰۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. C_m و C_d ضرایب اینرسی و پسا هستند که با توجه به آئین نامه API برابر ۱/۲ و ۱/۰۵ در نظر گرفته شده‌اند [۲]. V و A' حجم و سطح تصویر شده اعضا هستند که مقادیر آن در جدول ۲ ارائه شده است. نیروی اینرسی یک رابطه خطی مربوط به شتاب موج است در حالی که نیروی پسا یک رابطه غیرخطی و وابسته به سرعت نسبی ذرات موج و سازه می‌باشد که باعث پیچیده شدن نیروی اندرکنشی آب - سازه می‌شود.

ماتریس جرم متشکل از جرم سازه M و جرم افزوده M_a است که به صورت زیر عنوان می‌شود:

$$M_0 = M + M_a \qquad (۵)$$

که

$$M_a = \rho(C_m - 1)V\ddot{X} \qquad (۶)$$

در این مطالعه، از بخش سیمولینک[۱۹] نرم افزار متلب[۲۰] برای حل معادله حرکت غیرخطی که در شکل ۶ نشان داده شده، استفاده شده است. در قسمت (الف) دو بلوک به نمایش در آمده است. بلوک "FSI & Wave Force" نیروی اینرسی را تعیین و قسمت غیرخطی در نیروی پسا را با استفاده از سرعت و شتاب نسبی حل می‌کند (شکل ۶ (ب)).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

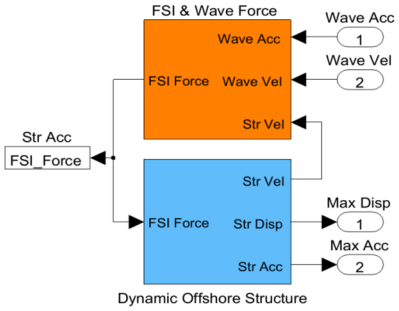
بلوک "Dynamic Offshore Structure" نیروهای موج و اندرکنش آب- سازه را به سکو اعمال کرده و معادله حرکت سیستم را حل می‌کند (شکل ۶ (ج)). خروجی برنامه، سری زمانی جابه‌جایی‌ها و شتاب‌ها در تمامی ترازهای جرمی است. در این مطالعه، جزء غیرخطی مولفه پسا در معادله موریسون به طور کامل در نظر گرفته شده است که این جزء در تحلیل‌های احتمالاتی پاسخ نقش مهمی را ایفا می‌کند [۲۳].

۵-۲- نتایج و بررسی آن‌ها

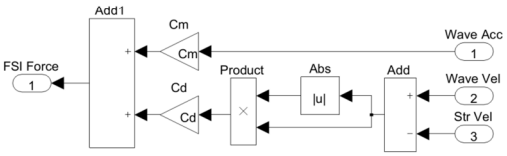
در این مطالعه، با استفاده از توابع قطار موج افزایشی اصلاح شده، پاسخ سکو برای ارتفاع‌های موج مختلف (جدول ۱) بارگذاری موج، ارزیابی شده است. برای بررسی پدیده تصادفی بودن رکوردهای تحلیل موج دوام اصلاح شده؛ ۵۰۰ رکورد امواج تصادفی ۳ ساعته برای سکوی مورد مطالعه تولید شده است.

شکل ۷ مقادیر جابه‌جایی حدی عرشه و توزیع تجمعی آن را برای بیشترین ارتفاع موج نشان می‌دهد. میانگین و احتمال فزونی[۲۱] ٪۵۰ جابه‌جایی عرشه به ترتیب برابر ۰/۰۵۹ و ۰/۰۵۸ متر می‌باشد. علاوه بر این، توزیع دارای ضریب تغییرات[۲۲] ٪۱۸/۶۴ است. برای سایر ارتفاع‌های موج، توزیع پاسخ حدی برای بیشینه جابه‌جایی عرشه و برش پایه نیز به دست آمده و در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ارتفاع موج، مقادیر پاسخ‌ها دارای توزیع گسترده‌تری می‌باشند.

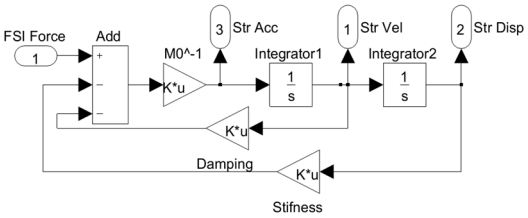
(الف)



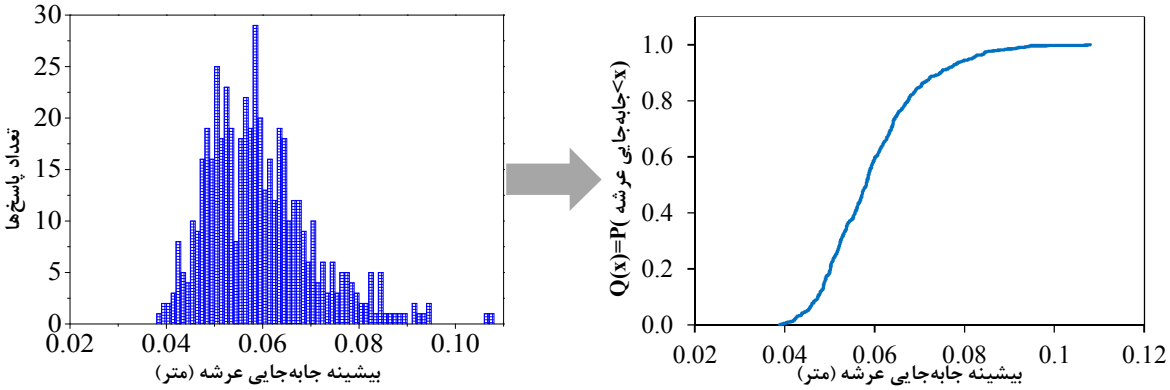
(ب)



(ج)



شکل ۶ - بلوک‌های سیمولینک متلب

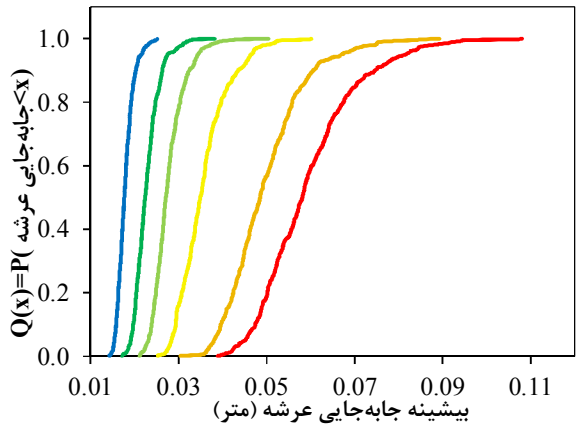


شکل ۷ – جابه‌جایی‌های حدی عرشه و توزیع تجمعی آن برای رکوردهای امواج تصادفی ۳ ساعته

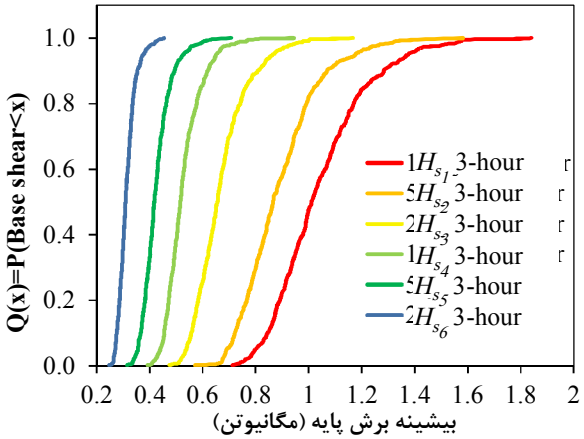
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

(الف)



(ب)



شکل ۸ – توزیع تجمعی بیشینه جابه‌جایی عرشه و بیشینه برش پایه در ارتفاع‌های مختلف موج

در این مطالعه جهت برازش داده‌ها و به دست آوردن توزیع مناسب برای آن‌ها، از ۵ توزیع گامبل[۲۳]، گاما[۲۴]، ویبول[۲۵]، نرمال[۲۶] و لگ-نرمال[۲۷] استفاده شده است. همچنین تعداد گروه‌ها از رابطه (۷) محاسبه شده است [۲۴].

$$k = 1 + \log_2 n \qquad (۷)$$

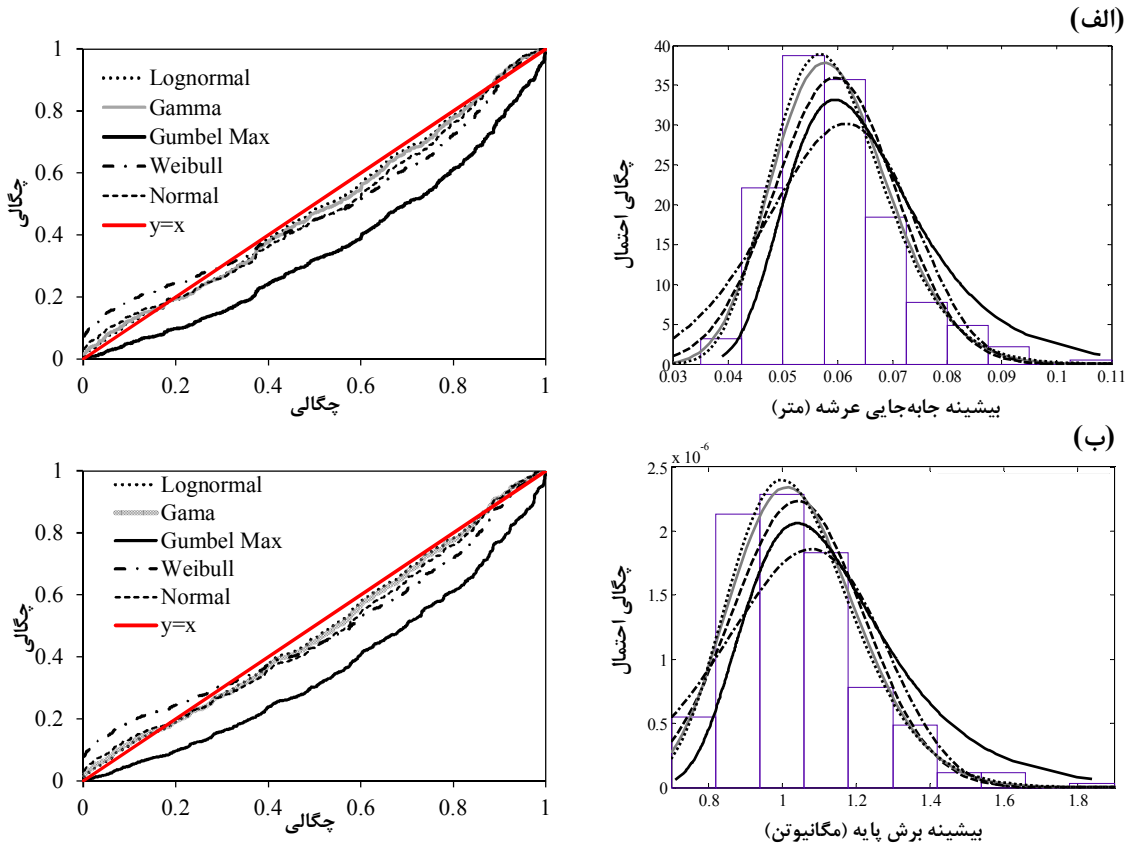
که k تعداد گروه‌ها[۲۸] در هیستوگرام و n تعداد داده‌ها می‌باشد که در این مقاله برابر ۵۰۰ است که بدین ترتیب تعداد گروه‌های هیستوگرام برابر ۱۰ می‌شود. در شکل ۹ (الف) چگالی احتمال بیشینه جابه‌جایی عرشه تحت بارگذاری موج برای توابع توزیع مختلف رسم شده است و همچنین منحنی P-P این توابع نشان داده شده است. در این منحنی تابع توزیع تجمعی داده‌ها (در اینجا بیشینه جابه‌جایی عرشه) با مقادیر به دست آمده از توابع توزیع تجمعی تئوری مقایسه می‌شود و میزان تطابق این تئوری‌ها با داده‌های اصلی مورد سنجش قرار می‌گیرد [۲۵]. در جدول ۳ نتایج آزمون K-S[۲۹] آمده است. این آزمون جزء آزمون‌های ناپارامتری برای تفاوت مابین توزیع‌های تجمعی می‌باشد. این آزمون تفاوت مطلق بیشینه مقادیر توزیع تجمعی مشاهده شده‌ی یک نمونه تصادفی و یک توزیع نظری می‌باشد [۲۶]. همانطور که از این جدول استنباط می‌شود، تابع توزیع لگ- نرمال بهترین برازش را میان سایر توابع داراست که البته لازم به ذکر است که این نمودارها تنها برای این سازه و با توجه به محل قرارگیری آن و شرایط موج استخراج می‌شود و در صورت تغییر هر یک از شرایط، نمودارهای متفاوتی به دست خواهد آمد [۲۷]. البته استفاده از توزیع عمومی مقدار حدی[۳۰] می‌توانست نتایج بهتری را ایجاد نماید. همچنین در شکل ۹ (ب) و جدول ۳ چگالی احتمال توابع توزیع، منحنی P-P و نتایج آزمون K-S برای معیار برش پایه نیز آورده شده است.

جدول ۳ – نتایج آزمون K-S برای بیشینه جابه‌جایی عرشه و بیشینه برش پایه

ترتیب نکوئی	تابع توزیع احتمال	پارامترهای بیشینه جابه‌جایی	پارامترها بیشینه برش پایه
۱	Lognormal	μ = -۲/۸۴, σ = ۰/۱۸	μ = -۱۳/۸۴, σ = ۰/۱۶
۲	Gamma	α = ۳۱/۰۱, β = ۰/۰۰۲	α =۳۶/۶۰, β = ۲۸۴۸۲
۳	Normal	μ = ۰/۰۶, σ = ۰/۰۱	μ =۱/۰۴×۱۰^{۶}, σ =۱/۷۸×۱۰^{۵}
۴	Weibull	α = ۰/۰۶, β = ۵/۱۶	α =۱/۱۲×۱۰^{۶}, β = ۵۵۱/۶۳
۵	Gumbel Max	μ = ۰/۰۶, σ = ۰/۰۱	μ =۱/۰۴×۱۰^{۶}, σ =۱/۷۸×۱۰^{۵}

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

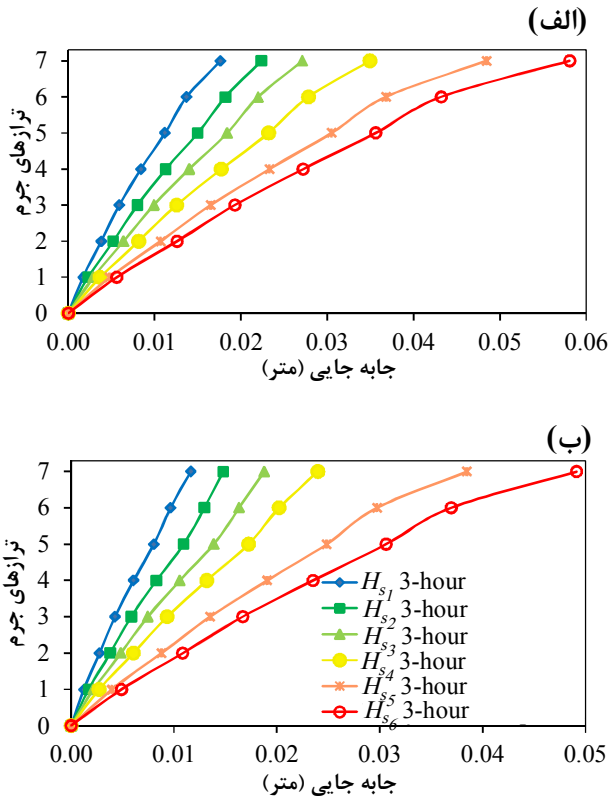
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]



شکل ۹ – برازش توزیع‌های مختلف بر روی داده‌های (الف) بیشینه جابه‌جایی عرشه و (ب) بیشینه برش پایه و نمودارهای P-P مربوط به آن

در شکل ۱۰، احتمال فزونی۵۰٪ بیشینه جابه‌جایی عرشه در تمامی ترازها نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش ارتفاع موج، بیشینه جابه‌جایی عرشه افزایش یافته است. به‌طور تقریبی، روند تغییر بیشینه جابه‌جایی برای ترازهای مختلف در هر ارتفاع موج خطی است اما به دلیل جرم متمرکز بیشتر و سختی کمتر در بالاترین تراز، نرخ افزایش در این تراز بیش از سایر ترازهاست.

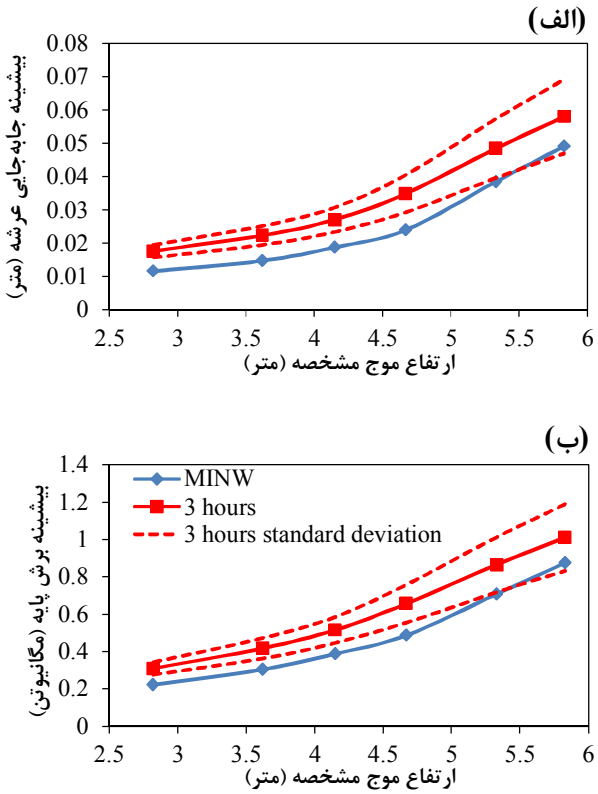
شکل ۱۱ مقایسه احتمال فزونی ۵۰٪ در امواج تصادفی و موج نو افزایشی اصلاح شده برای بیشینه جابه‌جایی عرشه و بیشینه برش پایه در ارتفاع‌های موج مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روند افزایش برش پایه و بیشینه جابه‌جایی نمایی لگاریتمی دارد که به‌نحوی بیان کننده پاسخ سازه در ارتفاع‌های موج مختلف است. علت این موضوع را می‌توان به افزایش لگاریتمی ارتفاع موج با افزایش دوره تناوب مربوط دانست. در این شکل، به علت منظم بودن تئوری موج نو، پاسخ‌های به دست آمده از آن کمتر از پاسخ‌های به دست آمده از تحلیل امواج تصادفی است و از آن می‌توان به عنوان تخمین قابل قبولی از پاسخ سازه بهره برد.



شکل ۱۰ – احتمال فزونی ۵۰٪ برای بیشینه جابه‌جایی عرشه در تمامی ترازهای جرمی برای سری‌های زمانی (الف) رکوردهای امواج تصادفی ۳ ساعته و (ب) موج نو افزایشی اصلاح شده

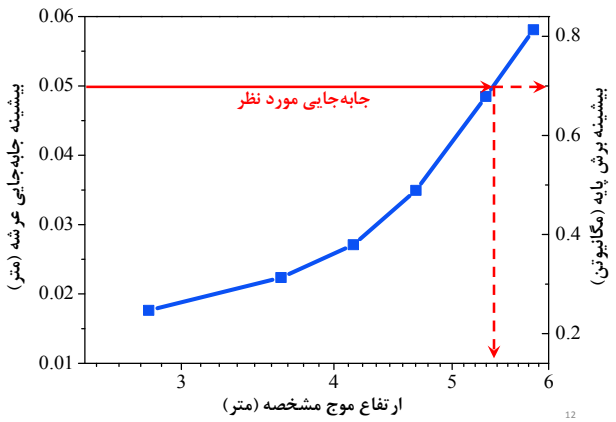
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]



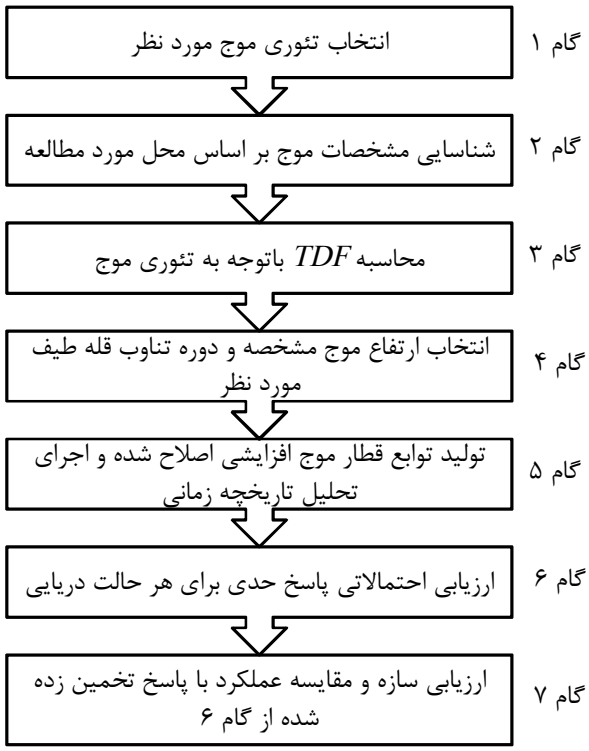
شکل ۱۱ – مقایسه احتمال فزونی ۵۰٪ در امواج تصادفی و موج نو افزایشی اصلاح شده برای (الف) بیشینه جابه‌جایی عرشه و (ب) بیشینه برش پایه در ارتفاع‌های موج‌های مختلف

شکل ۱۲ یک نمودار طراحی است که بر اساس روش تحلیل موج دوام اصلاح شده برای این سازه استخراج شده است و برای طراحی کاربردی سازه‌های فراساحل استفاده می‌شود. متغیرهای پاسخ مهندسی مختلفی را می‌توان برای این نمودار استفاده کرد که در این مطالعه، بیشینه جابه‌جایی عرشه در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، اگر مقدار این متغیر به ۰/۰۵ متر محدود باشد، ارتفاع موج مشخصه و بیشینه برش پایه تعیین شده به ترتیب برابر ۵/۳۸ متر و ۰/۷۰ مگانیوتن خواهد بود.



شکل ۱۲ – نمودار طراحی به دست آمده از تحلیل موج دوام اصلاح شده

در انتها، روش کلی برای ارزیابی سکوها به روش تحلیل موج دوام اصلاح شده در شکل ۱۳ ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، اولین قدم، انتخاب یک تئوری موج مناسب است. سپس مشخصات موج مانند ارتفاع موج مشخصه و دوره تناوب قله طیف بر اساس مکان مورد مطالعه مشخص می‌شود. بعد از آن، ضریب مدت زمان که ضریبی از دوره تناوب قله طیف است برای تعیین مدت زمان رکورد برای هر حالت دریایی تخمین زده می‌شود. در گام بعدی، ارتفاع‌های موج مشخصه و دوره تناوب‌های قله طیف متناظر آن انتخاب می‌شوند. بدین صورت، توابع قطار موج افزایشی اصلاح شده تولید و به عنوان بارگذاری موج به سازه اعمال می‌شوند. سپس ارزیابی احتمالاتی سکو بر اساس پاسخ‌های حدی مورد بررسی قرار می‌گیرند. نهایتا، منحنی‌های مورد نظر برای متغیرهای مختلف مانند بیشینه جابه‌جایی، برش پایه یا هر متغیر پاسخ مهندسی رسم و با عملکر مورد نیاز مقایسه می‌شوند.



شکل ۱۳ – روش توصیه‌شده برای ارزیابی سکوها تحت بارگذاری امواج حدی با استفاده از روش موج دوام اصلاح شده

۶– نتیجه‌گیری

در این مقاله، گام به گام، مفاهیم، روش تولید و یک نمونه کاربرد عملی تحلیل موج دوام اصلاح شده توضیح داده شد. اصلاح روش تحلیل موج دوام در دو بخش خلاصه می‌شود. اول، مدت زمان تحلیل در هر حالت دریایی به جای انتخاب یک مقدار ثابت به صورت ضریبی از دوره تناوب قله طیف در نظر گرفته می‌شود. این ضریب به عنوان ضریب مدت زمان (TDF) معرفی گردید و روش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

به دست آوردن آن برای تئوری موج نو توضیح داده شد. دوم، روند افزایشی ارتفاع امواج بر اساس الگوی افزایش ارتفاع موج در خلیج فارس صورت گرفت. بنابراین، کاربرد رکوردهای اصلاح شده برای مهندسین جهت ارزیابی سازه‌ها، راحت‌تر و قابل اطمینان‌تر است. پاسخ سازه برای ۵۰۰ شبیه‌سازی ۳ ساعته امواج تصادفی در نظر گرفته شد و توزیع‌های آماری مناسب برای آن استخراج گردید. همچنین مقادیر این پاسخ‌ها با رکوردهای موج نو اصلاح شده مقایسه شد. علاوه بر این، یک منحنی طراحی بر اساس رکورد موج نو افزایشی اصلاح شده به دست آمد که بیانگر کاربرد مناسب این روش در طراحی براساس عملکرد است. ذکر این نکته الزامی است که تمامی نتایج برای سازه خطی شده به دست آمد و تحقیقات بیشتری باید برای در نظرگیری اثرات مربوط به رفتار غیرخطی اعضا در کاربرد روش موج دوام اصلاح شده صورت گیرد.

کلید واژگان

1 - Sea states
2 - Incremental Wave Analysis
3 - Incremental Dynamic Analysis
4 - Endurance Wave Analysis
5 - Constrained new-wave theory
6 - Significant wave height
7 - Intensifying Wave Train Function
8 - Serviceability
9 - Engineering Demand Parameter
10 - Time Duration Factor
11 - New-wave theory
12 - Wave energy spectrum
13 - Autocorrelation
14 - Crest elevation
15 - Cross-sectional area
16 - ANSYS
17 - Inertia force
18 - Drag force
19 - SimuLink
20 - MATLAB
21 - Exceedance probability
22 - Coefficient of variation
23 - Gumbel
24 - Gamma
25 - Weibull
26 - Normal
27 - Lognormal
28 - Bin
29 - Kolmogorov-Smirnov
30 - Generalized extreme value distribution

۷- مراجع

1- Komachi, Y., Tabeshpour, M.R., Golafshani, A.A. and Mualla, I., (2011), *Retrofit of Ressalat jacket platform (Persian Gulf) using friction damper device*, Journal of Zhejiang University: Science A, Vol. 12, p. 680-691.

2- American petroleum institute, (2007), *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design.*, Washington, DC.

3- Najafian, G., (2007), *Application of system identification techniques in efficient modelling of offshore structural response. Part I: Model development*, Applied Ocean Research, Vol. 29, p. 1-16.

4- Okada, H. and Murotsu, Y., (1990), *A method for reliability assessment of aged jacket structures based on ultimate strength analysis*, The First ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. International Society of Offshore and Polar Engineers.

5- Stewart, T. M. G., Amdahl, J. and Eide, O. I., (1993), *Nonlinear Re-Assessment of Jacket Structures Under Extreme Storm Cyclic Loading: Part I-Philosophy and Acceptance Criteria*, The Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, p. 491-491.

6- Bea, R., Mortazavi, M. and Loch, K., (1995), *Verification of a Simplified Method to Evaluate the Capacities of Template-Type Platforms*, Offshore Technology Conference.

7- Hellan O. and Skallerud, B., (1991), *Reassessment of offshore steel structures: Shakedown and cyclic nonlinear FEM analyses*, he First International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.

8- Amdahl, J., Skallerud, B. H., Elde, O. and Johansen, A., (1995), *Recent developments in reassessment of jacket structures under extreme storm cyclic loading part II: Cyclic capacity of tubular members*, Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, p. 113-113.

9- Zhao, W. and Burdekin, F. M., (2004), *Dynamic structural integrity assessment for offshore structures*, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 126, p. 358-363.

10- Golafshani, A. A., Bagheri, V., Ebrahimian, H. and Holmas, T., (2011), *Incremental wave analysis and its application to performance-based assessment of jacket platforms*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, p. 1649-1657

11- Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A., (2002), *Incremental dynamic analysis, Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, p. 491-514.

12- Zeinoddini, M., Matin Nikoo, H. and Estekanchi, H., (2012), *Endurance Wave Analysis (EWA) and its*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]

13- ITTC Seakeeping Committee, (1984), *Report of the seakeeping committee*, Proceedings of the 17th International Towing Tank Conference, p. 457-534.
14- Det Norske Veritas, (2010), *DNV-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads*, Høvik, Norway, Det Norske Veritas, DNV.
15- Tromans, P.S., Anaturk, A.R. and P. Hagemeijer, (1991), *A NEW MODEL FOR THE KINEMATICS OF LARGE OCEAN WAVES*, International Offshore and Polar Engineering Conference, p. 64-71.
16- Tromans, P. S., Anaturk, A.R. and Hagemeijer, P., (1991), *A new model for the kinematics of large ocean waves*, The Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, p. 64-71.
17- Seif, M. S., Tabeshpour, M. R., Mehdigholi, H., Mohajernassab, S. and Dastan, M. A., (2012), *Development of Endurance Wave Analysis for assessment of jacket platforms under the Persian Gulf wave loading using new-wave theory*, The 14th Marine Industries Conference, Tehran, Iran. (In Persian)
18- Stockard, D. M., (1976), *Effects of Pile-Soil-Water Interaction on the Dynamic Response of a Seismically Excited Dynamic Response*, Offshore Technology Conference.
19- McCormick, M. E., (1989), *Analysis of offshore structural dynamics with nonproportional damping*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 115, p. 775-792.
20- Mastanzade N. S. and Yazici, G., (2005), *Dynamic behavior and optimization of offshore gravity platforms*, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 127, p. 130-134.
21- Kim, D. H., (2009), *Neuro-control of fixed offshore structures under earthquake*, Engineering Structures, Vol. 31, p. 517-522.
22- Golafshani, A. and Gholizad, A., (2009), *Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platform*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, p. 180-187.
23- Zaki, N. M. and Najafian, G., (2011), *Long-Term distribution of the extreme values of offshore structural response by Finite-Memory Nonlinear System Modelling*, Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, p. 347-358.
24- Sai Venu Gopal Lolla, L. L. H., *On selecting the number of bins for a histogram*, Oklahoma State University.
25- Park, H. M., (2008), *Univariate Analysis and Normality Test Using SAS, Stata, and SPSS*, University Information Technology Services Center for Statistical and Mathematical Computing, Indiana University.
26- Miller, I., Freund, J. E. and Johnson, R. A., (1965), *Probability and statistics for engineers*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Vol. 4.
27- Matin Nikoo, H., Zeinoddini, M. and Estekanchi, H., (2013), *Probabilistic Estimation of Offshore Jacket Type Platforms Capacity Using Incremental Random Wave Analysis (IRWA)*, International Journal of Maritime Technology, p. 1-18. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.5.9]