برآورد احتمالاتی ظرفیت سکوهای دریایی نوع جاکت به‌کمک روش تحلیل امواج تصادفی افزایشی

حمید متین نیکو[1*]، مصطفی زین الدینی[2]، همایون استکانچی[3]

۱- کارشناس ارشد، سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

تحلیل موج افزایشی (IWA)[1] روشی مؤثر و کارآمد به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی سکوهای ثابت فلزی بر مبنای عملکرد می‌باشد. به لحاظ انطباق مناسب الگوی بارگذاری این رویکرد با شرایط بارگذاری واقعی، انتظار می‌رود نتایج حاصل از آن از دقت بهتری نسبت به تحلیل بار افزون[2] مرسوم برخوردار باشد. از سوی دیگر، امواج دریا ماهیتی تصادفی و نامنظم دارند و این ویژگی تأثیر به‌سزایی در پاسخ و عملکرد سازه‌های در معرض نیروی امواج خواهد داشت. دور از انتظار نیست که یکی از مهمترین پارامترهای عدم قطعیت[3] در مطالعات فراساحل را عدم ثابت بودن نیمرخ امواج و یا تصادفی بودن آن‌ها دانست.

با این هدف، در این مقاله سعی می‌شود به کمک مفاهیم احتمالاتی، تأثیر ماهیت تصادفی بارهای محیطی دریا در نتایج روش تحلیل موج افزایشی مورد بررسی قرار گیرد و بر اساس آن منحنی‌های احتمالاتی ظرفیت سکو استخراج گردد. برای این منظور با انجام تعداد زیادی شبیه‌سازی نامنظم بلندمدت (۳ ساعته) و کوتاه‌مدت افزایشی، منحنی‌های ظرفیت یک سازه جاکت فولادی به‌صورت احتمالاتی استخراج شده و نتایج آن با نتایج حاصل از مدل امواج منظم مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: سکوهای دریایی، ظرفیت احتمالاتی، تحلیل امواج تصادفی افزایشی، امواج تصادفی بلندمدت، امواج کوتاه‌مدت مقیدشده.

Probabilistic Estimation of Offshore Jacket Type Platforms Capacity Using Incremental Random Wave Analysis (IRWA)

H. Matin Nikoo[1*], M. Zeinoddini[2], H. Estekanchi[3]

1- MSc., Faculty of Civil Eng. K.N.Toosi University of Technology
2- Associate Professor, Faculty of Civil Eng. K.N.Toosi University of Technology
3- Professor, Faculty of Civil Eng. Sharif University of Technology

Abstract

Incremental Wave Analysis (IWA) is a novel and robust methodology for performance-based assessment of offshore jacket type platforms against wave loading. This approach can be employed to obtain a more realistic estimate for the ultimate capacity of offshore platforms, in comparison to the commonly used push-over analysis. On the other hand, ocean and sea waves are both random; they are irregular in shape, height, speed, period and directions. Therefore, one of the most important uncertainties in the offshore field loading is the stochastic nature of the waves. In this paper a probabilistic method has been proposed in order to estimate the ultimate capacity of offshore platforms subjected to random waves using IWA. To this end, a sufficient number of long-term simulations (3hours) and constrained simulations (using Constrained NewWave methodology) have been carried out.

* نویسنده مسئول مقاله: matinnikoo@alumni.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

Keywords: Offshore platform, Probabilistic capacity, Irregular waves, Incremental Random Wave Analysis (IRWA), Constrained short-term waves.

۱ـ مقدمه

تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)[۴] روش شناخته-شده‌ای است که در آن از مفهوم مقیاس کردن رکوردهای تحریک زمین‌لرزه جهت شناخت و تبیین رفتار سازه در برابر بارگذاری‌های نادر و تعیین ظرفیت نهایی سازه استفاده می‌شود [۱،۲]. به کمک این روش مطالعات مختلفی نیز بر روی انواع سازه‌های دریایی انجام شده است [۳،۴].

اخیراً روشی با عنوان تحلیل استاتیکی و یا دینامیکی موج افزایشی (SIWA, DIWA)[۵] به‌منظور ارزیابی عملکرد سکوهای دریایی در برابر نیروی امواج پیشنهاد شده است که مبنای آن روش تحلیل IDA می‌باشد [۵،۶]. در این روش مجموعه‌ای از ارتفاع امواج منظم با نرخ افزایشی در گام‌های محاسباتی جداگانه به صورت منفرد و تک‌تک به سازه اعمال می‌شود تا مرحله‌ای که گسیختگی نهایی در سیستم سازه‌ای مشاهده شود. نزدیک بودن شرایط بارگذاری به الگوی واقعی بار امواج، در نظرگرفتن پدیده اثر موج‌برعرشه[۶] و برقراری ارتباط نتایج با سطوح مختلف خطر موج[۷] از ویژگی‌های برجسته روش تحلیل موج افزایشی می‌باشد. با این وجود، بدلیل استفاده از مدل امواج منظم در روش تحلیل موج افزایشی ارائه شده، همچنان بر روی دقت نتایج آن جای بحث وجود خواهد داشت. با استفاده از تئوری امواج منظم، ماهیت تصادفی بودن امواج و تأثیر امواج با پریودهای مختلف بر روی پاسخ سازه پنهان می‌ماند. در واقع حداکثر پاسخ دینامیکی یک سازه دریایی تحت اثر امواج برخوردی، همیشه با وقوع حداکثر تراز آب (موج) همزمان نخواهد بود. پاسخ حداکثر، عمیقاً به تأثیر قله موج بیشینه و زمینه نامساعد ذخیره‌شده در حافظه سازه در اثر امواج کوتاه‌تر قبلی و با تواترهای مختلف، وابسته می‌باشد. به بیان دیگر بارهای محیطی دریا ماهیت تصادفی دارند و جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان، انجام تحلیل‌های احتمالاتی بر روی نتایج حاصل از مدل امواج نامنظم ضروری خواهد بود [۷،۸،۹]. بنابراین در عمل، استفاده از نظریه‌های موج معین مانند استوکس مرتبه ۵ با یک تواتر ثابت ممکن است منتج به مقدار حداکثر پاسخ نشود. از این روست که مطابق DNV-RP-C205 [۱۰] انجام شبیه‌سازی‌های امواج نامنظم سه ساعته توصیه شده است.

در تحقیق حاضر، به منظور مطالعه تأثیر حضور مدل امواج تصادفی در پارامترهای ظرفیت نهایی اعلام شده توسط روش تحلیل موج افزایشی، با فرض ثابت بودن تمامی عدم قطعیت‌های دیگر (برای جزئیات بیشتر راجع به پارامترهای عدم قطعیت نگاه کنید به [۶])، تعداد زیادی شبیه‌سازی‌های بلندمدت (سه‌ساعته، بخش ۵-۱) و کوتاه‌مدت (مدل موج‌نو مقید شده، بخش ۵-۲) تصادفی انجام شده است.

سازه مورد مطالعه، یک سکوی فراساحل از نوع جاکت فولادی است که در عمق آب حدود ۷۰ متری در خلیج فارس مستقر است. نتایج بدست آمده از روش تحلیل موج افزایشی با استفاده از امواج منظم و نامنظم با یکدیگر و با نتایج تحلیل بار افزون مرسوم مقایسه شده است.

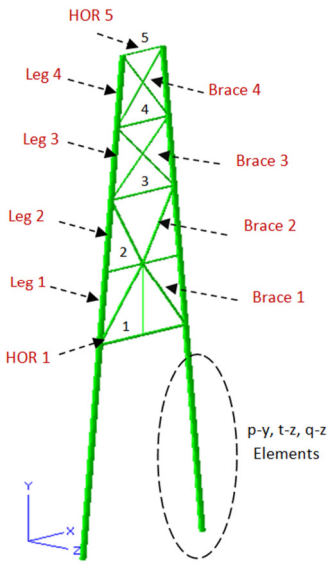
۲- مدل‌سازی

برای انجام تحلیل‌های مورد نظر، یک سکوی دریایی نوع جاکت فولادی چهارپایه، با شرایط دریایی و مشخصات هندسی مشابه با سکوهای مستقر در منطقه خلیج فارس، در حالت دوبعدی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱). مدل‌سازی هندسه سکو توسط برنامه المان محدود ABAQUS و با استفاده از المان دوبعدی Beam21 و مقطع Pipe انجام شده است. فرض اساسی المان Beam عبارت است از عدم تغییر شکل صفحات عمود بر محور بعد از تغییر شکل اجزای سازه‌ای. تغییر شکل‌های محوری، خمشی و پیچشی در این المان دیده می‌شود [۱۱]. برای اینکه تئوری Beam نتایج قابل قبولی ارائه نماید بایستی نسبت ابعاد مقطع به طول آن کمتر از ۰/۱ باشد. این شرایط در مدل‌سازی اعضای سکوهای دریایی نوع جاکت برقرار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

است و در مطالعات سایر محققین نیز استفاده شده است [۱۲]. جهت لحاظ نمودن تأثیرات حضور جرم عرشه، دو بار متمرکز ۴۰۰ تنی به‌کمک المان Mass در محل گره‌های عرشه، بر روی جاکت توزیع شده است. نسبت میرائی نیز همانند مقدار متداول در تحلیل‌های دینامیکی برابر ۰/۰۵ منظور گردیده است. به منظور شناخت مناسب رفتار سازه در هنگام وقوع تغییر شکل‌های بزرگ و مطابق توصیه آئین‌نامه API-RP-2A [۱۳] خاک محیط اطراف شمع توسط فنرهای غیرخطی p-y، t-z و q-z و بر اساس گزارش خاک محل استقرار مدل شده‌اند.

در جداول ۱ و ۲ به‌ترتیب مشخصات هندسی مقاطع و خاک اطراف شمع آمده است. عمق آب ۷۰ متر، ضرائب درگ، جرم افزوده و اینرسی به ترتیب ۱/۰۵، ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است. به دلیل عدم دسترسی به مشخصات دقیق جنس فولاد مصرفی، فولاد انتخابی بر اساس BS7191 دارای تنش تسلیم ۳۵۵ و تنش نهایی ۴۶۰ مگاپاسکال می‌باشد. شایان ذکر است این مقادیر می‌تواند از مشخصات فولاد متداول در سکوهای خلیج فارس تا حدودی قوی‌تر باشد.



شکل۱- مشخصات هندسی و نحوه مدل خاک اطراف شمع سکوی مورد مطالعه.

جدول ۱- مشخصات هندسی اعضای سکوی مورد مطالعه.

مشخصات مقطع (میلیمتر)				
Pile	Leg 1	Leg 2	Leg 3	Leg 4
Φ۱۵۷۶×۳۳	Φ۱۶۵۶×۲۰	Φ۱۶۵۶×۲۰	Φ۱۶۵۶×۲۰	Φ۱۶۶۶×۲۰
مشخصات مقطع (میلیمتر)				
Column	Horizontal (HOR1)	HOR2	HOR3	HOR4
Φ۳۲۵×۱۲	Φ۸۰۰×۲۰	Φ۶۰۰×۳۰	Φ۶۰۰×۲۰	Φ۶۰۰×۲۰
مشخصات مقطع (میلیمتر)				
HOR5	Brace1	Brace2	Brace3	Brace4
Φ۴۵۷×۱۳	Φ۷۰۰×۲۵	Φ۷۰۰×۲۵	Φ۵۰۸×۱۳	Φ۵۰۸×۱۵

در این مطالعه به منظور معرفی و مدل‌سازی تاریخچه‌های زمانی بلندمدت (سه‌ساعته) و کوتاه‌مدت (مدل موج‌نو مقید شده) امواج تصادفی و محاسبه نیروی حاصل از آن به سازه، تعدادی زیربرنامه[۸] به زبان فرترن تدوین گردیده است که قابلیت پردازش موازی با ماشین محاسباتی ABAQUS را دارا می‌باشد. زیربرنامه قادر است در هر گام محاسباتی مقادیر سرعت و شتاب ذرات را جهت استفاده در رابطه موریسون و مقادیر فشار دینامیکی و گرادیان آن را جهت محاسبه نیروی شناوری در اختیار ماشین محاسباتی ABAQUS قرار دهد. همچنین این زیربرنامه امکان تعریف جریان و تولید امواج نامنظم طیفی طولانی و کوتاه‌شده را (مطابق طیف‌های جان ـ سوآپ و پیرسون ـ موسکویتز و بر اساس سرعت باد یا ارتفاع موج مؤثر) فراهم می‌آورد.

جدول۲- مشخصات خاک بستر.

لایه	$\gamma'(kN/m^2)$	$c_u(kPa)$	φ(deg)
۱	۶/۵	-	۲۵
۲	۷/۵	۴۵	-
۳	۸	-	۳۰
۴	۸	۵۰	-
۵	۸	-	۳۰
۶	۷/۵	۴۰	-
۷	۷/۵	۱۱۰	-
۸	۸	-	۳۰
۹	۹/۵	۱۸۰	-
۱۰	۸	-	۳۰
۱۱	۹	۳۰۰	-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

۳- شبیه‌سازی‌های امواج بلندمدت و کوتاه‌مدت تصادفی

مطالعات قبلی انجام شده بر روی روش تحلیل موج افزایشی بر تئوری امواج منظم استوار بوده است [۶،۵]. در مدل امواج منظم فرض می‌شود تمام انرژی موج در یک فرکانس ثابت متمرکز شده است که این فرض دور از واقعیت طبیعی امواج می‌باشد. چراکه نیروی یک موج بحرانی مشخص (تک فرکانس)، در اثر یک پیشینه امواجِ تدریجاً رشدیافته، شامل بازه‌ای از فرکانس‌ها، به شرایط حدی رسیده است. به بیان دیگر، اثر یک ارتفاع موج مشخص بر روی سازه باید با حضور تأثیر امواج تصادفی قبلی (امواج کوتاه‌تر و بلندتر) با فرکانس‌های متفاوت همراه باشد.

بنابراین دقت مناسب نتایج در رویکرد فعلی روش تحلیل موج افزایشی که پاسخ سازه صرفاً در مقابل برخورد یک موج واحد که به صورت آنی شکل‌گرفته است، مورد تردید خواهد بود. با توجه به موارد ذکر شده مطلوب به نظر می‌رسد که اثر پیشینه و سیر شکل-گیری و تکامل ارتفاع امواج ورودی بر روی نتایج تحلیل موج افزایشی مورد تحقیق قرار گیرد. برای این هدف، تولید و شبیه‌سازی امواج نامنظم طیفی الزامی خواهد بود.

در مقابل، به منظور شبیه‌سازی دقیق طبیعت امواج و لحاظ شدن اثر همه حالات ممکن بارگذاری، به-کارگیری تعداد زیادی تاریخچه زمانی بلندمدت (حدود ۳ ساعت [۱۶،۱۵،۱۴،۱۰]) نامنظم تراز سطح آب و روش حل مستقیم معادلات حرکت در دامنه زمان توصیه می‌شود که امری زمان‌بر، پرهزینه و تفسیر نتایج خروجی نیز به لحاظ حجم بالای داده‌های آن دشوار خواهد بود [۱۷]. به همین دلیل در طی سال‌های گذشته تلاش‌هایی جهت معرفی مدل‌های کوتاه‌شده انجام شده است. ویژگی اصلی این مدل‌ها اینست که اولاً: محتوی امواج با ارتفاع‌های مختلف و فرکانس‌های متفاوت هستند، ثانیاً: مدت زمان آن‌ها در حدود ۶۰ تا ۶۰۰ ثانیه بوده و این امر باعث کاهش چشمگیری در هزینه و زمان محاسبات خواهد شد. ثالثاً: این امواج کوتاه‌شده، دربرگیرنده ارتفاع موج بیشینه مورد انتظار نیز می‌باشند. تئوری موجنو[۹] و موجنو مقیدشده[۱۰] نمونه‌ای از تاریخچه‌های امواج کوتاه‌مدت تصادفی می-باشند [۱۸،۱۹].

در تئوری موجنو شرایط لازم و کافی برای شکل‌گیری یک ارتفاع تاج بیشینه (دلخواه) در زمان و مکان مشخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و محتمل‌ترین نیمرخ سطح دریا در اطراف آن بیان می‌شود. از ترکیب مدل موجنو با یک تاریخچه کاملاً تصادفی از وضعیت دریایی، مدل موجنو مقیدشده تولید می‌شود که ماهیت نامنظم امواج را نیز لحاظ می‌کند [۱۹]. Taylor و همکاران پس از انجام ۱۰۰ شبیه‌سازی سه ساعته از امواج نامنظم و رسم پاسخ‌های احتمالاتی تجمعی، نشان دادند که نتایج حاصل از مدل موجنو مقیدشده، بسیار نزدیک به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های بلندمدت خواهد بود[۱۹]. نتایج سایر محققین در استفاده از این مدل موج، مؤید دقت قابل قبول و کاربرد مناسب آن در پژوهش‌های عددی و مقاصد طراحی می‌باشد [۲۰،۱۵،۱۴].

در این تحقیق نیز علاوه بر شبیه‌سازی بلندمدت (۳ ساعته) امواج نامنظم، تحلیل‌های مشابه‌ای با استفاده از مدل موجنو مقیدشده انجام شده است تا کفایت مدل-های کوتاه‌مدت مقیدشده نیز در تحلیل موج افزایشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴- رویکرد احتمالاتی پیشنهاد شده در این تحقیق برای بدست آوردن ظرفیت نهایی سکوهای دریایی به کمک تحلیل موج افزایشی

روش اتخاذ شده در تحلیل موج افزایشی، در ابتداء برای تحلیل احتمالاتی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها پیشنهاد شده است [۲۱]. در این تحقیق نیز با الهام از مفاهیم ارائه شده در مطالعات لرزه‌ای، یعنی به کمک تحلیل چندگانه نواری[۱۱]، رویکردی به‌منظور درنظر گرفتن تصادفی بودن امواج دریا و تأثیر آن در تحلیل موج افزایشی معرفی می‌شود. در این رویکرد، به ازای هر ارتفاع موج مؤثر[۱۲] مشخص (متناظر با سطوح شدت[۱۳] در مفاهیم لرزه‌ای [۲]) تعداد زیادی شبیه سازی امواج تصادفی انجام شده و پاسخ‌های سازه شامل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

جابه‌جایی بالای عرشه سکو[14] و برش پایه (متناظر با پارامتر اندازه خرابی[15] در مفاهیم لرزه‌ای) در همان سطح شدت بار یا ارتفاع موج مؤثر بدست آمده است. بنابراین، در نهایت، دو منحنی نواری IM در مقابل DM حاصل خواهد شد. (یکی ارتفاع موج مؤثر بر حسب جابه‌جایی عرشه و دیگری ارتفاع موج بر حسب برش پایه). هدف نهایی، رسم منحنی احتمالاتی ظرفیت سازه می‌باشد. برای این منظور، با برازش توابع توزیع احتمالاتی در هر سطح شدت بارگذاری (در این مطالعه ارتفاع موج مؤثر)، پاسخ‌های احتمالاتی شامل مقادیر صدک[16] ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ استخراج شده‌اند. در نهایت با رسم زوج داده‌های بدست آمده برای مقادیر صعودی شدت بار، منحنی ظرفیت سازه بدست می‌آید.

۵ - روش انجام تحقیق

همانطور که بیان شد هدف این مقاله مطالعه تأثیر پارامتر عدم قطعیت در نیمرخ بارگذاری امواج (با فرض ثابت بودن سایر عدم قطعیت‌ها) بر روی رفتار سکوهای دریایی نوع جاکت به کمک روش تحلیل موج افزایشی می‌باشد. برای این منظور نتایج در چهار بخش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

- روش تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی‌های امواج تصادفی بلندمدت (۳ ساعته).
- روش تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی‌های امواج تصادفی کوتاه‌مدت (مدل موج‌نو مقیدشده).
- روش تحلیل موج افزایشی با استفاده از مدل موج منظم ایری و استوکس مرتبه ۵ (مشابه کارهای محققین قبلی).
- روش تحلیل بار افزون.

۵-۱- تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی‌های بلندمدت

انتظار می‌رود روش اتخاذ شده در این بخش، یعنی تحلیل موج افزایشی به کمک امواج نامنظم طیفی بلندمدت، دقیق‌ترین پاسخ‌ها را ارائه نماید، زیرا اولاً: نیمرخ بارگذاری در این حالت بسیار به واقعیت نزدیک‌تر است. ثانیاً: بازه زمانی ۳ ساعته می‌تواند تا حد قابل قبولی تمامی ارتفاع امواج قابل رخداد با فرکانس‌های مختلف در طوفان مورد نظر را پوشش دهد و ثالثاً: تحریک اعمال شده به سازه در زمان t به قدر کافی شامل اثر امواج در بازه زمانی 0 تا $t-dt$ می‌باشد.

برای انجام این قسمت از تحقیق، سازه معرفی شده در بخش (۲) در معرض امواجی با ارتفاع فزاینده از $2m$ تا $18m$ (H_s=۲~۱۸m) قرار گرفته است. به ازای هر سطح شدت بارگذاری (ارتفاع موج مشخصه H_s)، سازه در معرض ۱۰ شبیه‌سازی نامنظم ۳ ساعته از تراز سطح دریا گرفته است. بنابراین در مجموع ۱۷۰ (۱۷۰=۱۰×۱۷) تحلیل تاریخچه زمانی ۳ ساعته که معادل ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی می‌باشد، انجام شده است. انتظار می‌رود با افزایش تعداد تحلیل‌ها بتوان به نتایج دقیق‌تری نیز دست یاقت.

در این تحقیق به منظور تولید امواج نامنظم، از طیف موج جان سوآپ و مدل امواج تصادفی خطی استفاده شده است. یک مدل موج تصادفی خطی، مجموع تعداد زیادی از مولفه‌های امواج خطی کوتاه، با دامنه و فرکانس مختلف می‌باشد. شایان ذکر است در تحقیق حاضر اثر توزیع جهت‌دار امواج در نظر گرفته نشده است. از اعداد تصادفی برای بیان زوایای فاز این امواج نسبت به هم استفاده می‌شود:

$$Z(x,t)=\sum_{n=1}^{N} c_{\xi,n}\cos(k_n x-\omega_n t+\theta_{\xi,n}) \qquad (۱)$$

$Z(x,t)$ تراز سطح آب و $c_{\xi,n}$ برابر است با:

$$c_{\xi,n}=\sqrt{2S_{\xi}(\omega_n)\Delta\omega} \qquad (۲)$$

$k_n=\omega_n^2/g$ عدد موج، g شتاب ثقل، ω_n فرکانس موج، $\theta_{\xi,n}$ توزیع یکنواخت تصادفی از زاویه فاز که مقداری بین $0-2\pi$ دارد و $S_{\xi}(\omega_n)$ مقادیر چگالی انرژی طیف موج هستند. N تعداد امواج سینوسی (برابر با ۱۰۰۰) [۱۰]، x فاصله از مبدا و t زمان می‌باشد. عامل تمایز در ۱۷۰ شبیه‌سازی ذکر شده، زاویه فاز $\theta_{\xi,n}$ می‌باشد که ماهیتی تصادفی داشته و با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

تغییر آن نحوه بارگذاری در همان سطح ثابت شدت (H_s) تغییر می‌کند.

مطابق رویکرد معرفی شده در بخش ۴، به‌منظور شناسایی بهترین توابع توزیع منطبق با پارامترهای نیاز، در این مطالعه از ۹ از تابع توزیع احتمالاتی شامل توابع کوشی، گامبل، نرمال، فریچت، گاما، لگاریتم نرمال ۲ و ۳ پارامتری، ریلی و ویبول استفاده شده است که در نهایت مشخص گردید که توابع گامبل، گاما، لگاریتم نرمال (۲ و ۳ پارامتری) و ویبول از انطباق مناسب‌تری با داده‌ها برخوردار هستند.

لازم به توضیح است که تعداد گروه‌ها[۱۷] در هیستوگرام می‌تواند بر دقت برازش توابع احتمالاتی تأثیرگذار باشد [۲۲]. در مراجع مختلف مقادیر متفاوتی برای این پارامتر پیشنهاد شده است [۲۳]:

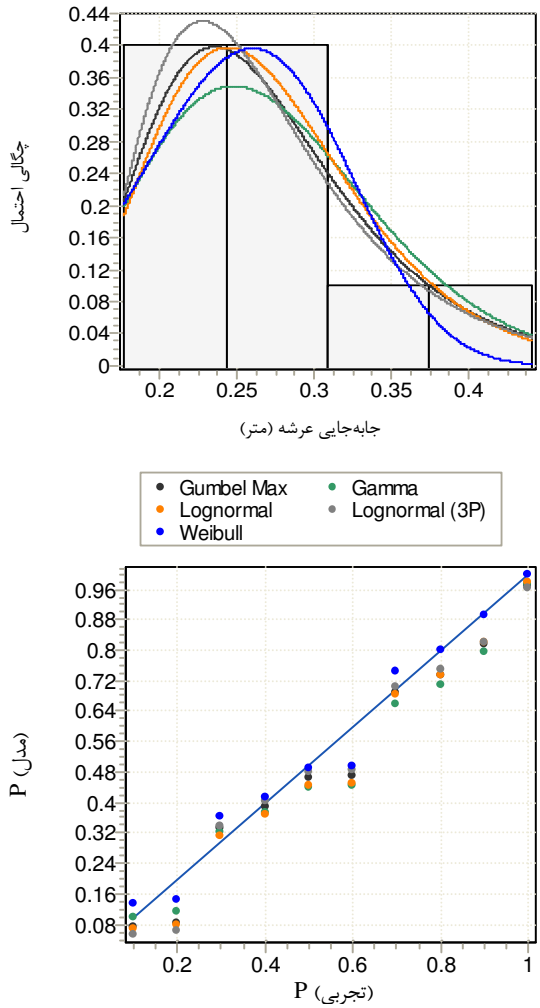
$$k = \sqrt{n} \qquad (۳)$$

$$k = 5(\log n) \qquad (۴)$$

$$k = 1 + \log_2 n \qquad (۵)$$

که k معرف تعداد نوار یا دسته‌های تفکیک‌شده داده‌ها و n تعداد داده‌ها می‌باشد که در این بخش برابر با ۱۰ است. بنابراین روابط فوق بترتیب مقادیر $\sqrt{10} \cong 3.2$، $5\log 10 = 5$ و $1+\log_2 10 \cong 4.35$ را به عنوان تعداد مناسب گروه‌ها اعلام می‌کنند. در این تحقیق بطور میانگین مقدار k برابر ۴ در نظر گرفته شده است.

در شکل ۲ هر پنج تابع توزیع برازش شده به مقادیر پاسخ جابه‌جایی عرشه در سطح شدت H_s=۱۴m و منحنی P-P آن‌ها نشان داده شده است. به کمک منحنی P-P می‌توان کفایت تابع احتمالاتی را مورد قضاوت قرار داد. هر چه روند پراکندگی داده‌ها نسبت منحنی خطی P-P کمتر باشد بیانگر کفایت بهتر تابع احتمالاتی برازش داده شده است [۲۴].



شکل ۲- توابع احتمالاتی برازش داده شده به مقادیر جابه-جایی عرشه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته (بالا) و منحنی P-P (پائین) در سطح شدت H_s=۱۴m.

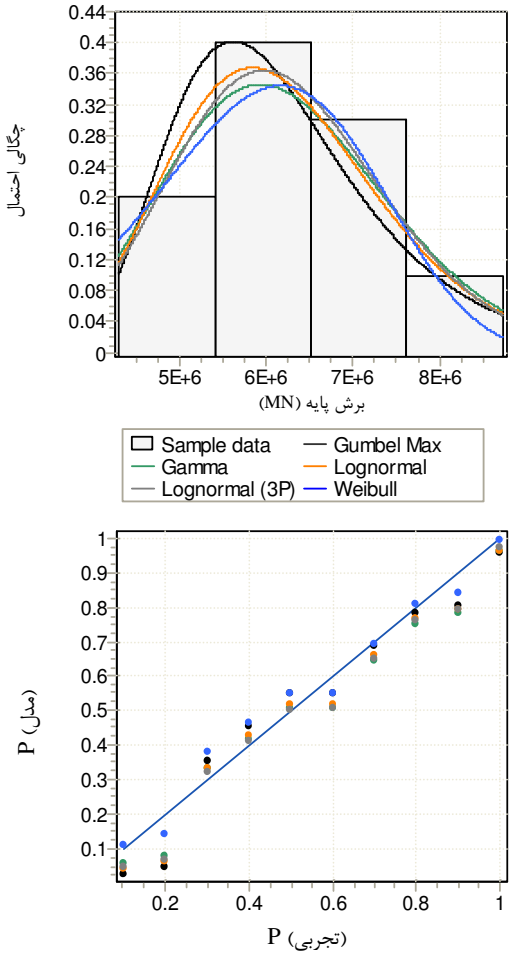
در جدول ۳ نتایج آزمون نکوئی توابع توزیع پاسخ جابه-جایی عرشه به کمک آزمون K-S[۱۸] آمده است.

جدول ۳- نتایج آزمون نکوئی برای پاسخ جابه‌جایی عرشه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته.

تابع توزیع احتمال	پارامتر	آزمون K – S ترتیب نکویی
Gumbel Max	σ = ۰/۰۶ μ = ۰/۲۳	۱
Lognormal (3P)	σ = ۰/۴۴ μ = ۱.۸۹ γ = ۰/۱	۲
Lognormal (2P)	σ = ۰/۲۶ μ = ۱/۳۴	۳
Gamma	α = ۱۱/۹۱ β = ۰/۰۲	۴
Weibull	α = ۴/۳۶ β = ۰/۲۷	۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

ملاحظه می‌شود که تابع گامبل بهترین برازش و تابع توزیع ویبول از کمترین نکوئی برخوردار است. انتظار می‌رود با تغییر نوع سازه، مدل موج بکارگرفته شده، عمق آب و سایر پارامترهای محیطی، ترتیب نکوئی توابع توزیع حاکم بر پارامترهای نیاز نیز تغییر کند. با این وجود، نزدیک بودن مشخصات آماری پنج تابع توزیع، بیانگر عدم تفاوت قابل توجه در بکارگیری آن‌ها می‌باشد. شکل ۳ نیز برازش توابع احتمالاتی مختلف به مقادیر برش پایه و منحنی P-P را برای سطح شدت H_s=۱۴m نشان می‌دهند. شایان ذکر است به دلیل زمان‌بر بودن تحلیل امواج طوفانی ۳ ساعته، در این مطالعه برای هر شدت بارگذاری (H_s)، ۱۰ شبیه‌سازی ۳ ساعته انجام شده‌است، انتظار می‌رود با افزایش تعداد تحلیل‌ها دقت برازش توابع احتمالاتی نیز دقیق‌تر شود.



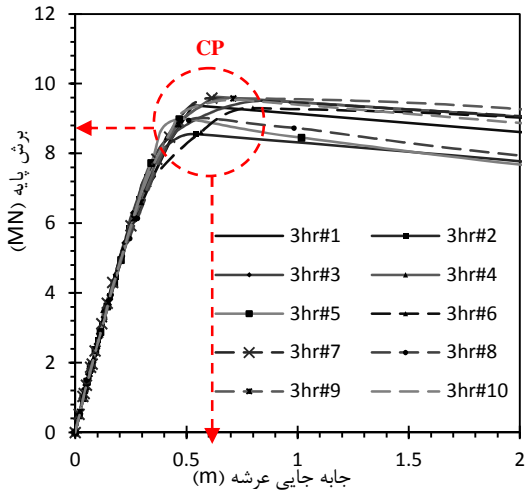
شکل ۳- توابع احتمالاتی برازش داده شده به مقادیر برش پایه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته (بالا) و منحنی P-P (پائین) در سطح شدت H_s=۱۴m.

در شکل ۴ منحنی ظرفیت سکوی مورد مطالعه برای هر ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی‌های ۳ ساعته آمده است. یک منحنی ظرفیت (معادل یک سری تحلیل موج افزایشی) به این صورت استخراج شده است که به ازای هر ارتفاع موج مؤثر (شدت بار)، بیشینه مقادیر جابه‌جایی عرشه و برش پایه متناظر به‌دست آمده است. بنابراین به‌کمک ۱۷ مقدار پاسخ (H_s=۲~۱۸m) یک منحنی ظرفیت استخراج شده است. خلاصه نتایج بدست آمده شامل مقادیر برش پایه ظرفیت، جابه‌جایی عرشه متناظر با آن و ارتفاع موج شکست[19] (CWH) در آستانه وقوع حد CP[20] (متناظر با نقطه‌ای که شیب منحنی ظرفیت معادل ۲۰٪ ناحیه اولیه الاستیک می‌شود [۵]) نیز در جدول ۴ آمده است. شایان ذکر است شناسایی معیارهای دقیق‌تر حالات حدی در سکوهای دریایی، مشابه آنچه در سازه‌های مستقر در خشکی در برابر نیروی زلزله وجود دارد، نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد.

جدول ٤- خلاصه نتایج ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی به کمک امواج تصادفی ۳ ساعته.

شماره تحلیل	ارتفاع موج شکست (m)	جابه‌جایی عرشه متناظر با خرابی (m)	برش پایه ظرفیت (MN)
۱	۱۷	۰.۵۳	۹.۴
۲	۱۷	۰.۵۴	۸.۶
۳	۱۶	۰.۴۳	۸.۵
۴	۱۷	۰.۶۲	۹.۶
۵	۱۵	۰.۴۷	۹.۰
۶	۱۵	۰.۵۷	۸.۶
۷	۱۷	۰.۶۲	۹.۶
۸	۱۵	۰.۵۱	۸.۹
۹	۱۶	۰.۷۱	۹.۶
۱۰	۱۶	۰.۵	۹.۳
کمینه	۱۵	۰.۴۳	۸.۵
بیشینه	۱۷	۰.۷۱	۹.۶
میانگین	۱۶	۰.۵۵	۹.۱۱
انحراف معیار	۰.۸۷۵	۰.۰۸۲	۰.۴۴

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

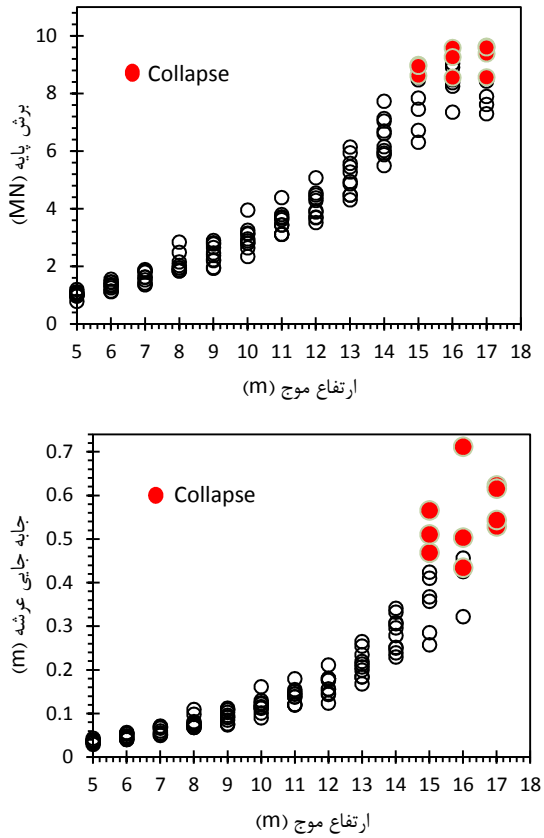


شکل ٤- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده از ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی با استفاده از امواج تصادفی ۳ ساعته و استخراج مقادیر متناظر با حد عملکردی CP.

از مقادیر گزارش شده در جدول ۴ چند نکته قابل برداشت است:

- ماهیت تصادفی نیمرخ بارگذاری (محتوای فرکانسی و یا حضور امواج با پریودهای مختلف) به شدت بر روی عملکرد و ظرفیت سازه تأثیر می‌گذارد؛ پراکندگی مقادیر برش پایه ظرفیت در محدوده ۸/۵ تا ۹/۶ مگانیوتن، جابه‌جایی عرشه متناظر با خرابی در محدوده ۰/۴۳ تا ۰/۷۱ متر و ارتفاع موج شکست در محدوده ۱۵ تا ۱۷ متر مؤئد این مسئله است.
- تعداد تحلیل‌های انجام شده عامل تأثیرگذاری در بارگذاری‌های تصادفی امواج می‌باشد؛ در واقع این تعداد باید نمایانگر کافی تمام شرایط و حالت‌های بارگذاری قابل رخداد باشد. در این مطالعه ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی انجام شده است که با توجه به پراکندگی مقادیر گزارش شده انتظار می‌رود با افزایش تعداد تحلیل‌ها، پراکندگی نتایج جدول ۴ نیز افزایش یابد.

شکل ۵ مقادیر برش پایه و جابه‌جایی سکو را به ازای اندازه شدت بار امواج مختلف حاصل از تحلیل امواج نامنظم افزایشی بلندمدت (۳ ساعته) نشان می‌دهد. همچنین محدوده ارتفاع امواج عامل خرابی گزارش شده در طی ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی بر روی شکل نشان داده شده‌اند.



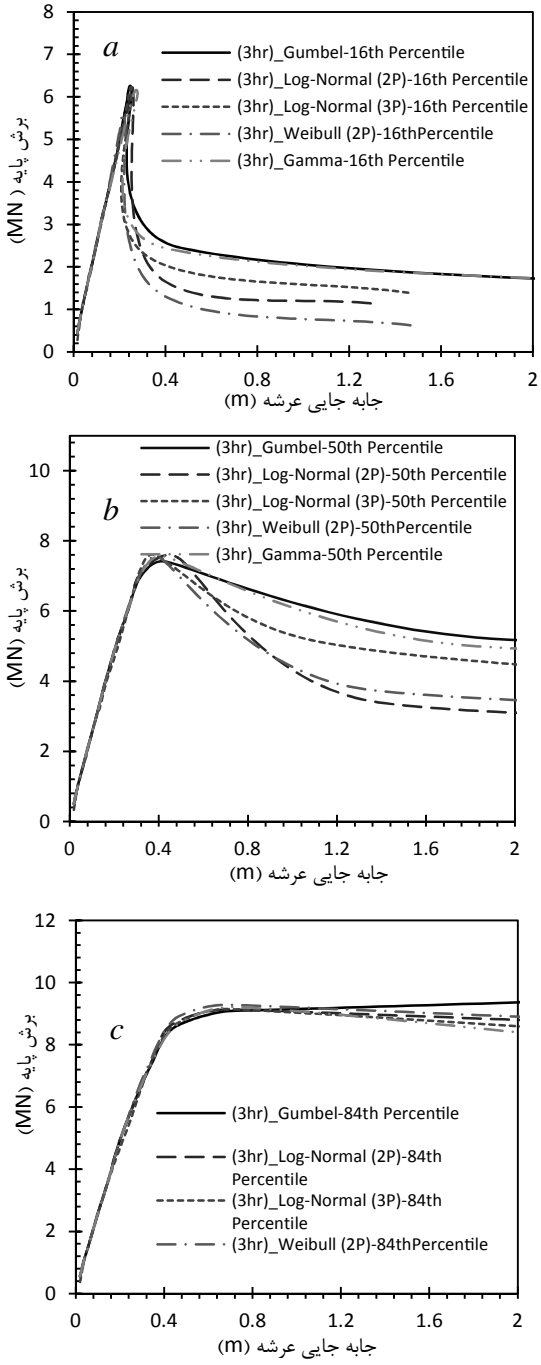
شکل ۵- مقادیر ۱۰ سری تحلیل چندگانه نواری به کمک امواج نامنظم ۳ ساعته، (حاصل از ۱۷×۱۰ تحلیل).

همانطور که اشاره شد، نتایج جدول ۴ بیانگر این نکته است که با افزایش تعداد تحلیل‌ها و قرارگیری سازه در شرایط دریایی و امواج با پریودهای مختلف، مقادیر ظرفیت نهایی گزارش شده دچار تغییرات قابل توجه‌ای خواهند شد. بنابراین در ادامه، مطابق رویکرد تشریح شده در بخش ۴، منحنی ظرفیت سکوی مدل‌سازی شده بر اساس داده‌های موجود از ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی بصورت احتمالاتی استخراج شده است. در واقع با این رویکرد به این سوال اساسی پاسخ داده خواهد شد که اگر به تعداد بسیار بیشتری (مثلاً ۱۰۰۰ سری) تحلیل موج افزایشی بر روی سازه انجام گیرد چه تغییری در نتایج و در واقع ظرفیت سازه حاصل خواهد شد؟ شایان ذکر است بدلیل آنکه در پدیده‌های تصادفی نمی‌توان یک پاسخ متعین را به عنوان نتیجه اعلام نمود، بنابراین پاسخ به سوال فوق نیز در شکل ۶، در سه حالت مختلف ارائه شده است. این سه حالت به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

کمک مقادیر ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ در هر شدت بارگذاری (H_s) استخراج شده‌اند.

تأثیر بکارگیری توابع احتمالاتی مختلف نیز در این شکل نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این تأثیرات خود را در بخش تغییر شکل‌های بزرگ یا پس از بار حدی[۲۱] نشان می‌دهد.



شکل ٦- منحنی‌های ظرفیت استخراج شده با رویکرد تحلیلی بر روی امواج تصادفی بلندمدت ۳ ساعته. a) صدک ١٦٪ b) صدک ٥٠٪ و c) صدک ٨٤٪.

همانطور که انتظار می‌رود مقادیر ظرفیت گزارش شده از منحنی صدک ۱۶٪ کمتر از منحنی ۵۰٪ می‌باشد و این روند برای حالت ۵۰٪ و ۸۴٪ نیز صادق است. در اینجا نیز چند نکته قابل برداشت است:

- می‌توان مشاهده نمود که با قرارگیری سکو در معرض تعداد بیشتری از حالت‌های ممکن بارگذاری محیطی (شامل امواج نامنظم و جریان)، شاهد رفتارهای متفاوتی از روند خرابی، نوع گسیختگی‌ها و آستانه تحمل شرایط حدی مختلف در سازه خواهیم بود. این پدیده در صورت بکارگیری امواج منظم (با پریود ثابت) اتفاق نخواهد افتاد و مود و مکانیزم‌های خرابی، یکسان و احتمالاً دور از واقعیت خواهند بود. همانطور که از روی منحنی ۱۶٪ می‌توان ملاحضه نمود در یک موقعیت دریایی مشخص، بارگذاری‌های مخرب نادری (با احتمال وقوع کمتر) وجود خواهند داشت که نه تنها در صورت بکارگیری امواج منظم، بلکه با انجام تعداد محدودی شبیه‌سازی ۳ ساعته (مثلاً ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی) قابل شناسایی نیستند. علت بحرانی بودن این بارگذاری‌ها را می‌توان با محتوای فرکانسی، نحوه توزیع فاز امواج منفرد سینوسی ($\theta_{\xi,n}$ در رابطه (۱)) و افزایش احتمال وقوع امواج سرکش[۲۲] در نتیجه افزایش تعداد شبیه‌سازی‌ها (مثلاً ۱۰۰۰ سری تحلیل موج افزایشی) مرتبط دانست. این شرایط بسته به عمق آب و مشخصات فرکانس طبیعی سازه نیز می‌تواند متفاوت باشد.
- اعمال الگوی بارهای مختلف دینامیکی می‌تواند باعث تغییر الگوی خرابی سازه شود. همانگونه که در کارهای محققین دیگر هم گزارش شده است این از مشخصات اساسی بارگذاری‌های دینامیکی است [۲۵]. در اینجا نیز شاهد وقوع الگوی‌های رفتار و خرابی متفاوتی هستیم. همانطور که می‌توان دید با افزایش مقدار صدک (۱۶، ۵۰ و ۸۴٪) بکار گرفته شده در استخراج منحنی ظرفیت، پارامترهای ظرفیت نهایی سازه افزایش و شیب منحنی در بعد از وقوع اولین تسلیم کاهش می‌یابد. بنابراین در یک سطح ثابت شدت ($H_s = const$) مقادیر بزرگتر صدک معرف آن شرایط دریایی (نیمرخ بارگذاری محیطی)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

است که سازه رفتار شکل‌پذیرتری را از خود در مقابل آن نشان می‌دهد و هر چه مقدار صدک، اعمال شده کمتر باشد متناظر با شرایط دریایی است که سازه در مقابل آنها رفتار ترد خواهد داشت. به بیان دیگر، در رویکرد معرفی شده در این تحقیق، کلیه حالت‌های بارگذاری دریایی ـ اعم از حالت‌های بارگذاری بحرانی و مخرب و بارگذاری‌های ملایم و غیر بحرانی ـ با تلاش محاسباتی کمتر و بصورت احتمالاتی مورد شناسایی قرار می‌گیرد.

- در این مطالعه سعی شده است تا حد امکان مفاهیم ارائه شده، به مفاهیم ارزیابی احتمالاتی لرزه‌ای سازه‌ها نزدیک باشد. از اینرو، از مقادیر صدک ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ جهت استخراج منحنی ظرفیت سازه استفاده شده است. مبنای انتخاب این سه مقدار نیز در مطالعات لرزه‌ای تنها برای تابع توزیع لگاریتم نرمال توجیه می‌شود [برای جزئیات بیشتر ۲ و ۲۱ را ببینید]. بدیهی است از هر مقدار دلخواه دیگری نیز می‌توان استفاده کرد و محدودیتی در این مورد وجود ندارد. بنابراین با توجه به نکات گفته شده در بند قبل و اینکه هر چه مقدار صدک انتخابی کوچکتر باشد نتایج حاصله محافظه‌کارانه‌تر و پذیرش ریسک‌پذیری کمتر خواهد بود، بنا به سطح قابل انتظار از نتایج تحلیل می‌توان هر مقدار دلخواه دیگری از مقادیر صدک داده‌ها را مورد استفاده قرار داد.

۵-۲- تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی‌های کوتاه‌مدت

زمان‌بر بودن تحلیل‌های ۳ ساعته از یک سو و نیاز به پردازش‌گرهای پیشرفته به منظور مدل‌سازی دقیق شرایط بلندمدت از سوی دیگر، باعث تلاش‌هایی در جهت کوتاه‌سازی و در عین حال حفظ دقت نتایج شده است. یکی از رویکردهای پیشنهاد شده، مدل موج‌نو مقیدشده تصادفی می‌باشد [۱۹]. رابطه نهایی موج‌نو مقیدشده بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$\xi_c = \xi_R(t) + \rho(t)\left[\alpha - \sum_{n=1}^{N} A_n\right] + \left(\frac{-\dot{\rho}(t)}{\lambda^2}\right)\left[\dot{\alpha} - \sum_{n=1}^{N} \omega_n B_n\right] \quad (۶)$$

در این رابطه؛ $\xi_R(t)$ معرف تراز نامنظم سطح آب با استفاده از رابطه (۱)، $\rho(t)$ تابع خودهمبستگی تراز سطح آب، α تراز تاج مورد انتظار، $\sum_{n=1}^{N} A_n$ رقوم تراز نامنظم اصلی در زمان وقوع تاج مورد انتظار، $\frac{\dot{\rho}(t)}{\lambda^2}$ شیب نیمرخ مدل موج‌نو، $\dot{\alpha}$ شیب تراز مورد انتظار که برای تاج برابر صفر است و $\sum_{n=1}^{N} \omega_n B_n$ شیب تراز نامنظم در زمان وقوع تاج مورد انتظار هستند (برای جزئیات بیشتر و تعریف هر یک از پارامترها به [۲۶] رجوع کنید).

در رابطه (۶)، α معرف ارتفاع تاج موج مورد نظر (ارتفاع دلخواه) می‌باشد که در این مطالعه مقدار آن برابر $\beta H_{\max}$ در نظر گرفته شده است. $H_{\max}$ ارتفاع موج بیشینه در یک وضعیت دریایی است و برابر با مقدار زیر لحاظ گردیده است [۲۷]:

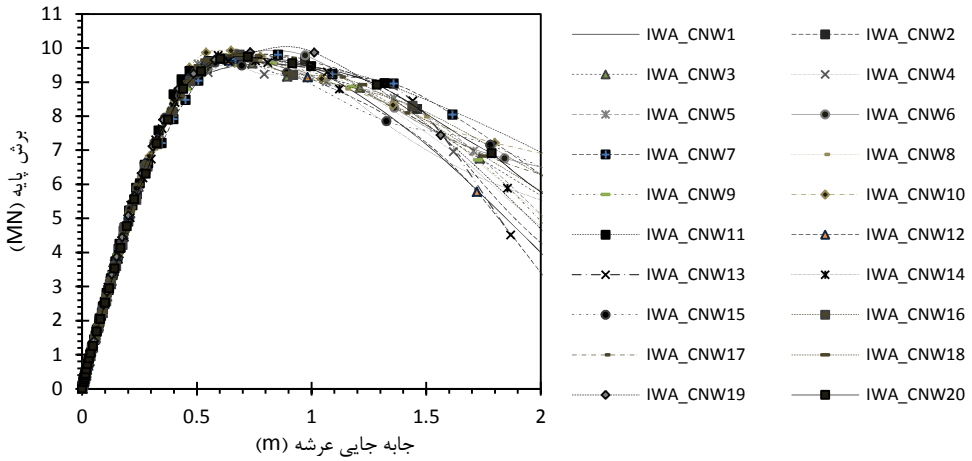
$$\alpha = \beta H_{\max} \quad (۷)$$

$$H_{\max} = 0.707\, H_s \sqrt{\ln N} \quad (۸)$$

N تعداد امواج سینوسی استخراج شده از طیف امواج می‌باشد که در مقدار حداقل ان طیق [۱۰] برابر ۱۰۰۰ می‌باشد. مقدار β نیز با توجه به استفاده از طیف جان سوآپ برابر با ۰/۵۸ در نظر گرفته شده است [۲۸]. شایان ذکر است با هر بار اجرای زیربرنامه تدوین شده، به‌دلیل تصادفی بودن زاویه فاز امواج خطی مداخله کننده، نیمرخ متفاوتی به‌دست خواهد آمد.

در این مطالعه نیز به منظور بررسی کفایت امواج کوتاه‌مدت مقیدشده در تحلیل موج افزایشی، رویکرد مشابه‌ای با بخش (۵-۱) به کمک مدل موج‌نو مقیدشده انجام شده است. برای این منظور، در هر تراز شدت بارگذاری محیطی (H_s)، ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی به کمک مدل موج‌نو مقیدشده انجام شده است (در مجموع ۳۴۰=۱۷×۲۰ تحلیل). سپس به کمک آزمون‌های آماری بهترین تابع توزیع شناسایی شده است. منحنی‌های ظرفیت استخراج شده و خلاصه نتایج حاصل از این ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی بترتیب در شکل ۷ و جدول ۵ آمده است. در اینجا نیز نحوه رسم یک

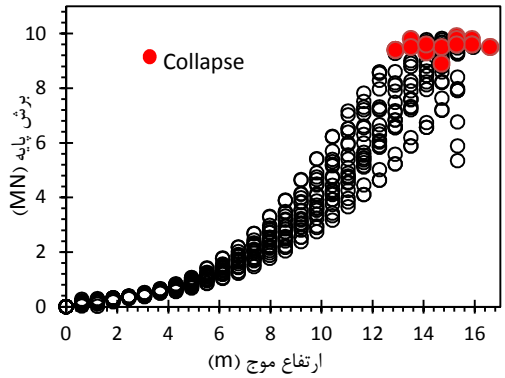
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]



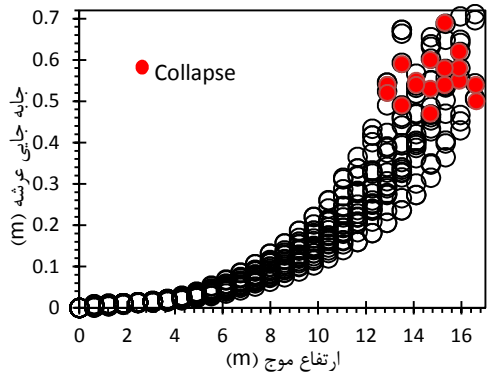
شکل ۷- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده از ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی با استفاده از مدل موج‌نو مقیدشده و استخراج مقادیر متناظر با حد عملکردی CP.

منحنی ظرفیت (معرف یک سری تحلیل موج‌نو مقیدشده افزایشی) به این صورت است که به ازای هر ارتفاع موج مؤثر (شدت بار)، بیشینه مقادیر جابه‌جایی عرشه و برش پایه متناظر به‌دست آمده است. بنابراین به‌کمک ۱۷ مقدار پاسخ (H_s=۲~۱۸m) یک منحنی ظرفیت استخراج شده است.

اشکال ۸ و ۹ مقادیر برش پایه و جابه‌جایی سکو به ازای اندازه شدت بار امواج مختلف حاصل از تحلیل موج‌نو مقیدشده افزایشی را نشان می‌دهند. همچنین محدوده ارتفاع امواج عامل خرابی گزارش شده در طی ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی بر روی شکل نشان داده شده‌اند.



شکل ۸- مقادیر ۲۰ سری تحلیل چندگانه نواری به کمک مدل موج‌نو مقیدشده افزایشی، حاصل از ۱۷×۲۰ تحلیل (بر حسب برش پایه)



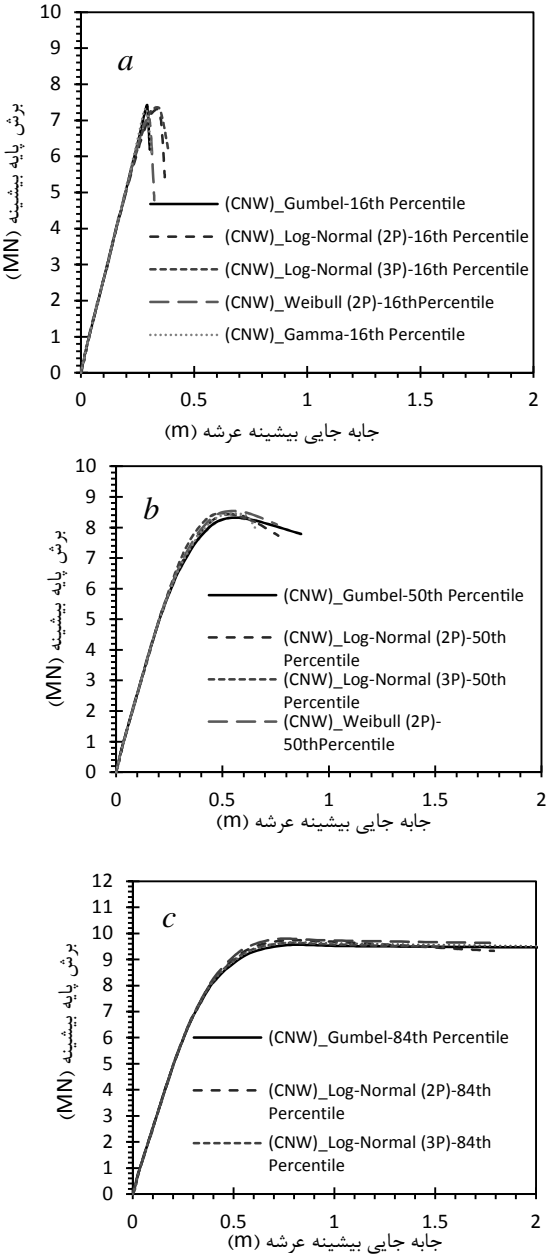
شکل ۹- مقادیر ۲۰ سری تحلیل چندگانه نواری به کمک مدل موج‌نو مقیدشده افزایشی، حاصل از ۱۷×۲۰ تحلیل (بر حسب جابه‌جایی عرشه)

جدول۵- خلاصه نتایج ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی به کمک مدل موج‌نو مقیدشده.

شماره تحلیل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
برش پایه ظرفیت (MN)	۸/۹	۹/۴	۹/۵	۹/۳	۹/۵	۹/۴	۹/۶	۹/۴	۹/۸	۹/۹	۹/۶	۹/۶	۹/۵	۹/۸	۹/۶	۹/۸	۹/۵	۹/۶	۹/۶	۹/۷
جابه جایی عرشه خرابی (m)	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۵	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۶۹	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۶
ارتفاع موج بیشنه شکست (m)	۲۴	۲۱	۲۳	۲۴	۲۷	۲۱	۲۸	۲۱	۲۶	۲۵	۲۶	۲۵	۲۷	۲۲	۲۶	۲۵	۲۲	۲۳	۲۵	۲۴
ارتفاع موج موثر شکست (m)	۱۴/۷	۱۲/۹	۱۴/۱	۱۴/۷	۱۶/۶۲	۱۲/۹	۱۷/۲	۱۲/۹	۱۵/۹	۱۵/۳	۱۵/۹	۱۵/۳	۱۶/۶	۱۳/۵	۱۵/۹	۱۵/۳	۱۳/۵	۱۴/۱	۱۵/۳	۱۴/۷

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

شکل ۱۰ منحنی‌های ظرفیت استخراج شده با رویکرد احتمالاتی را برای مقادیر صدک ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ نشان می‌دهد. مشابه با حالت امواج طیفی ۳ ساعته، در اینجا نیز با افزایش مقدار صدک، مقادیر ظرفیت و شکل‌پذیری سازه نیز بیشتر گزارش می‌شود.



شکل۱۰- منحنی‌های ظرفیت استخراج شده با رویکرد تحلیلی بر روی ۲۰ سری تحلیل. a) صدک ۱۶٪ b) صدک ۵۰٪ و c) صدک ۸۴٪.

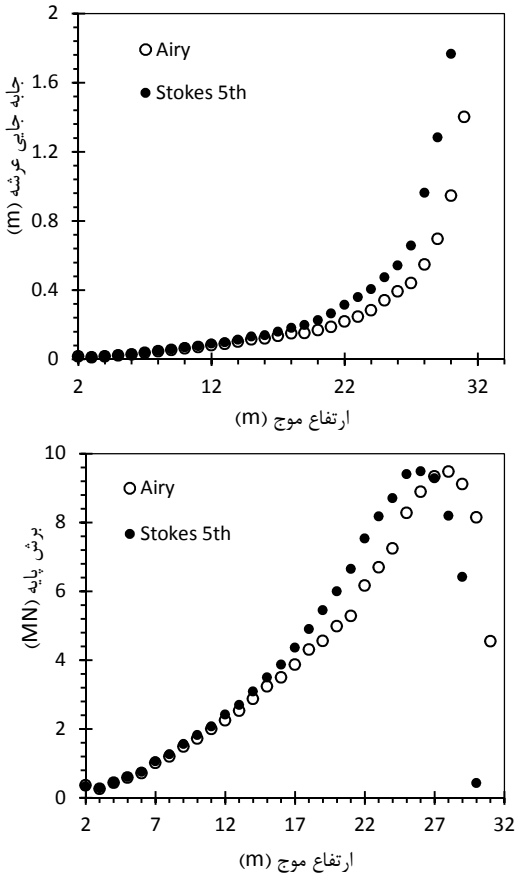
۵-۳- تحلیل موج افزایشی با به‌کارگیری تئوری امواج منظم

در این بخش، تحلیل موج افزایشی با استفاده از امواج منظم ایری و استوکس مرتبه ۵ انجام می‌شود. به منظور رعایت تناسب میان پریود امواج با ارتفاع امواج حدی، مطابق DNV-RP-C205 [۱۰] از رابطه زیر استفاده شده است:

$$T_{H\max} = a.H_{\max}^{b} \qquad (۹)$$

در این رابطه a و b مقادیر تجربی هستند که برای فلات نروژ برابر با $a=2.94$ و $b=0.5$ می‌باشند. به علت نزدیکی این دو مقدار با مشاهدات منطقه خلیج فارس [۶]، در این مقاله نیز از مقادیر فوق استفاده شده است.

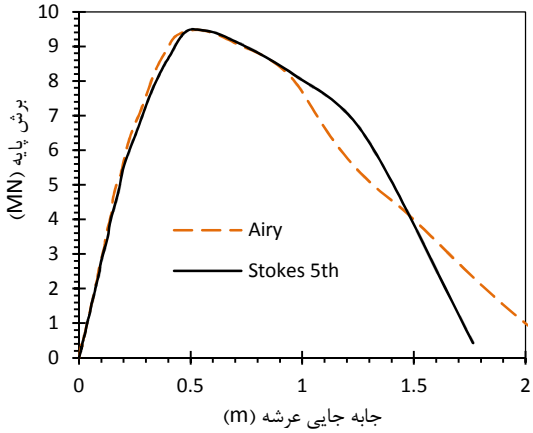
اشکال ۱۱ و ۱۲ منحنی‌های تحلیل موج افزایشی و ظرفیت سکوی مورد نظر به کمک امواج ایری و استوکس مرتبه ۵ نشان را می‌دهند.



شکل ۱۱- منحنی‌های نواری تحلیل موج افزایشی با استفاده از تئوری امواج منظم ایری و استوکس مرتبه ۵.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

علت نزولی شدن منحنی شکل ۱۱ آنست که با تسلیم شدن اعضای سازه‌ای در اثر افزایش ارتفاع امواج، سازه مقاومت خود را از دست داده و شاهد تغییر شکل‌های بزرگ خواهیم بود که این امر کاهش شدید مقادیر برش پایه را به‌همراه خواهد داشت. به بیان دیگر انرژی ورودی به سیستم صرف تغییر شکل اعضاء شده و سهم کمتری از آن به برش پایه منتقل می‌شود



شکل ۱۲- منحنی ظرفیت تحلیل موج افزایشی با استفاده از امواج منظم

همانطور که از روی شکل ۱۲ می‌توان دید، با استفاده از تئوری امواج ایری و استوکس، مقادیر تقریباً یکسان و برابری برای ظرفیت سازه بدست آمده است و تنها تفاوت آن‌ها در رفتار سازه بعد از نقطه شکست است. علت این امر تفاوت الگوی بارگذاری در تئوری‌های ایری و استوکس مرتبه ۵ است. در جدول۶ مقادیر ظرفیت سکوی مورد مطالعه به‌کمک تحلیل امواج منظم افزایشی آمده است.

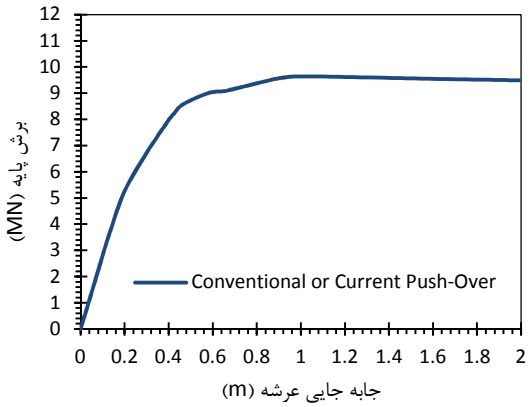
جدول٦- خلاصه نتایج تحلیل موج منظم افزایشی به‌کمک تئوری موج ایری و استوکس مرتبه ۵.

	ارتفاع موج شکست (m)	جابه جایی عرشه متناظر با خرابی (m)	برش پایه ظرفیت (MN)
موج ایری	۲۷	۰/۴۴	۹/۳
استوکس مرتبه ۵	۲۵	۰/۴۷	۹/۴

۴-۵ تحلیل بار افزون

روش تحلیل بار افزون به دو صورت انجام می‌گیرد؛ تحلیل بصورت کنترل بار و تحلیل بصورت تغییر مکان. انجام تحلیل بصورت کنترل بار بسیار بیشتر از حالت کنترل تغییر مکان مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوی بار ناشی از پخش امواج در ترازها و المان‌های مختلف سکو مناسب‌ترین الگوی بارگذاری محیطی دریا می‌باشد.

در این تحقیق نیز تحلیل بار افزون مرسوم به منظور مقایسه با نتایج بدست آمده از سایر روش‌ها انجام شده است. برای این منظور از الگوی بار متناسب با موجی به ارتفاع $12m$ (متناظر با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و بر اساس گزارش مشخصات دریایی منطقه پارس جنوبی) استفاده شده است. شکل ۱۳ منحنی ظرفیت بدست آمده از تحلیل بار افزون مرسوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- منحنی ظرفیت تحلیل بار افزون مرسوم.

۶- مقایسه نتایج

نتایج در سه بخش ارائه می‌شوند. قبلاً مشاهده گردید که پس از اتخاذ رویکرد احتمالاتی در استخراج منحنی‌های ظرفیت سکو، هر پنج تابع توزیع برازش داده شده تقریباً مقادیر یکسانی را به عنوان ظرفیت اعلام می‌کنند. بنابراین در ادامه تنها منحنی‌های بدست آمده از تابع توزیع لگاریتم نرمال ۳ پارامتری مورد مقایسه با سایر نتایج قرار گرفته‌اند.

۶-۱- منحنی ظرفیت حاصل از صدک ۱۶٪

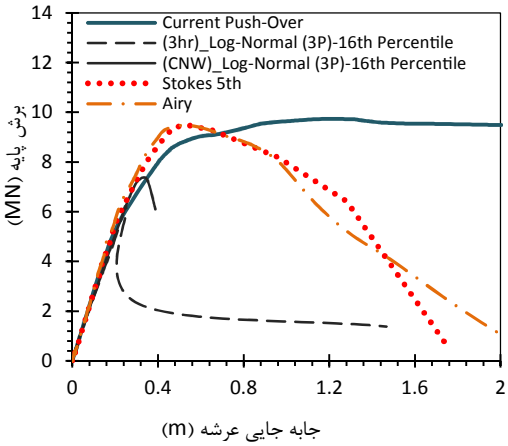
قبلاً اشاره گردید که این منحنی در واقع محافظه‌کارانه‌ترین شرایط بارگذاری محیطی است و انتخاب آن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

به عنوان ظرفیت سازه معرف پذیرش حداقل ریسک-پذیری خواهد بود. شکل ۱۴ و جدول ۷ منحنی ظرفیت و نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف را نشان می-دهد.

جدول ۷- مقادیر ظرفیت احتمالاتی صدک ۱۶٪ و سایر روش‌ها

		جابه جایی عرشه متناظر با خرابی (m)	ظرفیت نهایی (MN)
تحلیل بار افزون		۰/۴۶	۸/۵
موج ایری		۰/۴۴	۹/۳
استوکس مرتبه ۵		۰/۴۷	۹/۴
شبیه-سازی ۳ ساعته	صدک ۱۶	۰/۲۸	۶/۳
موجنو مقید شده	صدک ۱۶	۰/۳۷	۷/۲

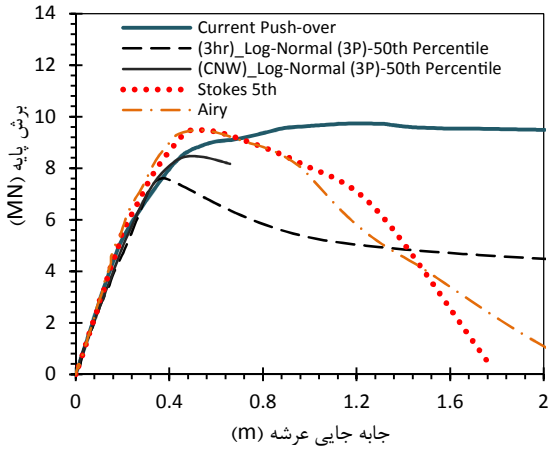


شکل۱۴- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۱۶٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم

می‌توان مشاهده نمود که مقادیر ظرفیت اعلام شده از امواج طیفی ۳ ساعته و روش موجنو مقیدشده به مراتب کمتر از تحلیل بار افزون مرسوم و تحلیل موج افزایشی به کمک امواج منظم می‌باشد. همچنین از شکل ۱۴ می‌توان ملاحضه نمود که تحلیل استاتیکی بار افزون، گزارش خرابی متفاوتی را در مقایسه با تحلیل دینامیکی موج افزایشی (چه منظم و چه نامنظم) نشان می‌دهد.

۶-۲- منحنی ظرفیت حاصل از صدک ۵۰٪

با توجه به بینابین بودن نتایج بدست آمده از مقادیر صدک ۵۰٪، منطقی است مقادیر حاصل از آن را به عنوان پاسخ احتمالاتی سازه (پاسخ به تعداد بسیار زیادی شبیه‌سازی امواج تصادفی) در نظر بگیریم. شکل ۱۵ و جدول ۸ منحنی ظرفیت و نتایج بدست آمده از سایر روش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۵۰٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم

جدول ۸- مقادیر ظرفیت احتمالاتی صدک ۵۰٪ و سایر روش‌ها

		جابه جایی عرشه متناظر با خرابی (m)	ظرفیت نهایی (MN)
تحلیل بار افزون		۰/۴۶	۸/۵
موج ایری		۰/۴۴	۹/۳
استوکس مرتبه ۵		۰/۴۷	۹/۴
شبیه‌سازی ۳ ساعته	صدک ۵۰	۰/۴۰	۷/۶
موجنو مقید شده	صدک ۵۰	۰/۴۷	۸/۴

چند نکته قابل برداشت است:

- در این حالت نیز برش پایه ظرفیت گزارش شده از امواج نامنظم (طیفی ۳ ساعته و موجنو مقیدشده) کمتر از مدل امواج منظم می‌باشد. شایان ذکر است در این تحقیق سکوی مورد نظر بصورت دو بعدی مدل شده است، انتظار می‌رود با در نظر گرفتن شرایط سه بعدی اختلاف مقادیر برش پایه ظرفیت افزایش یابد.
- علیرغم اختلاف مقادیر برش پایه ظرفیت، هر پنج روش، جابه‌جایی عرشه متناظر با خرابی را تقریباً یکسان گزارش می‌کنند. می‌توان نتیجه گرفت شناسایی حالات حدی مختلف در سکوهای دریایی،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

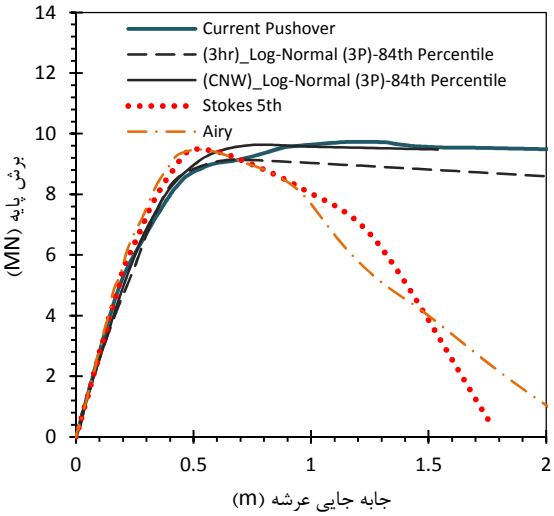
بطور مثال، مشابه آنچه در FEMA برای ساختمان-ها تعریف می‌شود [۲۹]، نیاز به تحقیقات جامع و مبسوط‌تری خواهد داشت.

- همچنان رفتار سازه بعد از وقوع حد CP در سکو (مطابق تعریف ارائه شده در بخش ۵-۱)، در روش تحلیل بار افزون مرسوم نسبت به روش تحلیل موج افزایشی متفاوت است.

۶-۳- منحنی ظرفیت حاصل از صدک ۸۴٪

این منحنی می‌تواند معرف آن دسته از شرایط بارگذاری محیطی باشد که برای سازه چندان بحرانی تلقی نمی‌شود و درواقع معرف پذیرش ریسک‌پذیری بالاتری نسبت به منحنی‌های صدک ۱۶٪ و ۵۰٪ خواهد بود. شکل ۱۶ و جدول ۹ منحنی ظرفیت و نتایج بدست آمده از سایر روش‌ها را نشان می‌دهند.

- با توجه به اینکه منحنی ۸۴٪ رفتار سکو را شکل-پذیرتر در نظر می‌گیرد (با مقایسه اشکال ۱۴،۱۵، ۱۶ و افقی شدن منحنی پس از نقطه تسلیم)، مشاهده می‌شود که منحنی بار افزون مرسوم بسیار نزدیک به رویکرد احتمالاتی شده است.



شکل ۱۶- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۸۴٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم

جدول ۹- مقادیر ظرفیت احتمالاتی صدک ۸۴٪ و سایر روش‌ها

		جابه جایی عرشه متناظر با خرابی (m)	ظرفیت نهایی (MN)
تحلیل بار افزون		۰/۴۶	۸/۵
موج ایری		۰/۴۴	۹/۳
استوکس مرتبه ۵		۰/۴۷	۹/۴
شبیه-سازی ۳ ساعته	صدک ۸۴	۰/۵۱	۹/۱
موجنو مقید شده	صدک ۸۴	۰/۵۴	۹/۳

- علیرغم نزدیک شدن مقادیر ظرفیت برش پایه برای امواج منظم و نامنظم، باید توجه نمود که پارامتر CWH در رویکرد استفاده از امواج نامنظم طیفی و موجنو مقیدشده به مراتب بیشتر از مقدار آن در صورت بکارگیری امواج منظم است. مطابق مرجع [۵]، انتظار می‌رود استفاده از تئوری امواج منظم منجر به نتایج محافظه‌کارانه شود. برای مثال مقدار CWH به‌کمک تئوری منظم استوکس برابر ۲۵m، و با استفاده از امواج نامنظم سه‌ساعته به‌طور میانگین برابر ۳۰m بدست آمده است. این روند در مورد مقادیر جابه‌جایی متناظر با خرابی نیز صادق است. اما نتایج متعین حاصل برای مقدار برش پایه متناظر با حد خرابی بسیار حائز اهمیت می‌باشد (ستون آخر جدول ۱۰). با استفاده از تئوری موج منظم استوکس، برش پایه ظرفیت برابر با مقدار ثابت ۹.۴MN و با استفاده از امواج نامنظم در محدوده ۸/۵MN تا ۹/۶ و میانگین ۹/۱MN بدست آمده است. شایان ذکر است سکوی دو بعدی مدل شده در این مطالعه فرکانسی کمتر از ۳ ثانیه دارد و انتظار می‌رود با افزایش پریود طبیعی سازه (اصطلاحاً دینامیکی شدن رفتار سیستم) پاسخ‌های متفاوت‌تری نیز حاصل شود.

- بطور کلی می‌توان ملاحظه نمود که نتایج مدل موجنو مقیدشده، نزدیک به پاسخ‌های بدست آمده از شبیه-سازی‌های بلندمدت (۳ ساعته) می‌باشد. بنابراین مدل موجنو مقیدشده می‌تواند جایگزین مناسبی برای شبیه-سازی بلندمدت باشد (به مدت زمان لازم جهت انجام تحلیل‌های مورد نظر در جدول ۱۱ نیز نگاه کنید) .

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

جدول ۱۰- مقادیر متعین ظرفیت نهایی سکوی مورد نظر با رویکردهای متفاوت.

		ارتفاع موج بیشینه شکست (m)	ارتفاع موج موثر شکست (m)	جابه جایی عرشه خرابی (m)	ظرفیت نهایی (MN)
تحلیل پوش‌آور		۲۲/۳	۱۲	۰/۴۶	۸/۵
موج ایری		۲۷	۱۴/۵	۰/۴۴	۹/۳
استوکس مرتبه ۵		۲۵	۱۳/۵	۰/۴۷	۹/۴
شبیه‌سازی ۳ ساعته	کمینه	۲۸	۱۵	۰/۴۳	۸/۵
	بیشینه	۳۱/۶	۱۷	۰/۷۱	۹/۶
	میانگین	۳۰	۱۶	۰/۵۵	۹/۱
موجنو مقید شده	کمینه	۲۴	۱۲/۹	۰/۴۷	۸/۹
	بیشینه	۳۲	۱۷/۱	۰/۶۹	۹/۹
	میانگین	۲۸	۱۵	۰/۵۶	۹/۵

- بر اساس مقادیر گزارش شده در جدول ۱۰، نتایج روش‌های متعین (تحلیل امواج منظم افزایشی) تقریباً منطبق با غیرمحافظه‌کارانه‌ترین (صدک ۸۴٪) نتایج حاصل از تحلیل امواج طیفی نامنظم خواهد بود. شایان ذکر است تنها با انجام ۱۰ سری تحلیل موج سه‌ساعته پراکندگی محدوده پاسخ‌ها در جدول ۱۰ کاملاً مشهود است (به‌طور مثال برش پایه ظرفیت در محدوده ۸.۵ تا ۹.۶ و جابه‌جایی عرشه در محدوده ۰/۴۳ تا ۰/۷۳ متر)، بنابراین انتظار می‌رود با انجام اصطلاحاً بی‌نهایت تحلیل (یعنی همان استخراج توابع توزیع پاسخ) پراکندگی نتایج بیشتر شود.

جدول ۱۱- زمان محاسبات انجام شده با تئوری امواج مختلف

	روش تحلیل موج افزایشی (IWA)					
	موج ایری و استوکس		موجنو مقید شده		شبیه‌سازی ۳ ساعته	
زمان انجام یک تحلیل	۴ دقیقه		۱۵ دقیقه		۲۸۸۰ دقیقه	
تعداد تحلیل	۶۰		۳۴۰		۱۷۰	
زمان کل	روز	دقیقه	روز	دقیقه	روز	دقیقه
	---	۲۴۰	~۴	۵۱۰۰	۳۴۰	۴۸۹۶۰۰

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر امواج با فرکانس و پریودهای مختلف بر روی ظرفیت نهایی سکوهای دریایی نوع جاکت به‌کمک تحلیل دینامیکی موج افزایشی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، یک سکوی دو بعدی نوع جاکت در معرض تعداد زیادی شبیه‌سازی امواج طوفانی ۳ ساعته، امواج نامنظم کوتاه‌شده و امواج منظم ایری و استوکس مرتبه ۵ قرار گرفته و نتایج بدست آمده، با نتایج حاصل از تحلیل بار افزون مرسوم مورد مقایسه قرار گرفته است. درنهایت، با الهام از مطالعات لرزه‌ای ساختمان‌ها، یک رویکرد احتمالاتی برای استخراج منحنی ظرفیت سکوهای دریایی پیشنهاد گردید که به‌کمک آن می‌توان مقادیر احتمالاتی ظرفیت سازه را استخراج نمود و از آن جهت ارزیابی احتمالاتی سکوهای دریایی استفاده نمود.

شایان ذکر است در این مطالعه از یک نمونه سکوی دو-بعدی نوع جاکت استفاده شده است که جهت دستیابی به نتایج مطلوب‌تر و وارد شدن اثر پدیده موج‌برعرشه در نتایج، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی و مدل‌سازی بخش عرشه ضرورت خواهد یافت.

۸- کلید واژگان

1- Incremental Wave Analysis (IWA)
2- Push-Over Analysis
3- Uncertainty parameter
4- Incremental Dynamic Analysis (IDA)
5- Static or Dynamic Incremental Wave Analysis (SIWA, DIWA)
6- Wave-in-Deck
7- Wave Hazard Level
8- Subroutine
9- NewWave theory
10- Constrained NewWave theory
11- Multiple Strip Analysis (MSA)
12- Significant wave height (H_s)
13- Intensity Measure (IM)
14- Deck Displacement
15- Damage Measure (DM)
16- Percentile
17- Bin
18- Kolmogorov-Smirnov
19- Collapse Wave Height (CWH)
20- Collapse Preventation (CP)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

21- Post ultimate
22- Freak waves

۹- مراجع

1- Zeinoddini, M., Harding, J.E. and Parke G.A.R., (1999), Dynamic behaviour of axially Pre-loaded tubular steel member of offshore structures subjected to impact damage, Journal of Ocean Engineering, Vol.26, p.963–978.
2- Vamvatsikos, D., Cornell, C.A., (2001), Incremental dynamic analysis, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.31, p.491-514.
3- Zeinoddini, M. and Hosseini, S.A., (2008), Assessment of seismic behavior of jacket offshore platform in near-field earthquakes, the 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction-EASEC-11, Taiwan.
4- Zeinoddini, M., Ahmadpour, F. and Matin Nikoo, H., (2011), Seismic assessment of gravity quay-wall structures, subjected to near-fault ground excitations, Procedia Engineering, 14, p. 3221-3228.
5- 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, p.1649-1657.
6- Golafshani, A.A., Ebrahimian, H., Bagheri, V. and Holmas, T., (2011), Assessment of offshore platforms under extreme waves by probabilistic incremental wave analysis, Journal of Constructional Steel Research, Vol.67, p.759-76.
7- Sagrilo, L.V.S., Siqueira, M.Q., Ellwanger, G.B., Lima, E.C.P., Ribeiro, E.J.B. and Lemos C.A.D., (2000), On the extreme response of heave-excited exible risers., Journal of Applied Ocean Research, Vol. 22, p. 225-239.
8- Najafian, G., (2007), Application of system identification techniques in efficient modelling of offshore structural response; Part I: Model development, Journal of Applied Ocean Research, Vol.29, p.1-16.
9- Najafian, G., (2010), Comparison of three different methods of moments for derivation of probability distribution parameters, Journal of Applied Ocean Research, Vol.32, p. 298-307.
[10] DNV-RP-C205, (2007), Environmental Conditions and Environmental Loads, Det Norske Veritas.
11- SIMULIA. ABAQUS theory manuals v.6.6, Dassault Systèmes, Realistic Simulation, Providence, RI, USA.
12- Cassidy, M.J., Martin, C.M. and Houlsby G.T., (2004), Development and application of force resultant models describing jack-up foundation behaviour, Journal of Marine Structures, Vol.17, p. 165-193.
13- API-RP2A, (2000), Recommended practice for planning designing and constructing fixed offshore platform-working stress design, American Petroleum Institute, Washington DC, 21th Ed.
14- Cassidy, M.J., Taylor, R.E. and Houlsby, G.T., (2001), Analysis of jack-up units using a constrained NewWave methodology, Journal of Applied Ocean Reseach. Vol.23, p. 221-234.
15- Cassidy, M.J., Taylor, P.H., Taylor, R.E and Houlsby, G.T., (2002), Evaluation of long-term extreme response statistics of jack-up platforms, Journal of Applied Ocean Reseach, Vol.29, p.1603-163.
16- Baarholm, G.S., Haver, S. and Økland O.D., (2010), Combining contours of significant wave height and peak period with platform response distributions for predicting design response, Journal of Marine Structures, Vol.23, p.147-163.
17- Enderami, S.M., Zeinoddini, M., Shabakhty, N. and Ameryoun, H. (2010), Dynamic non-linear analysis of offshore jacket type platform under extreme wave loads, Proceeding of 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
18- Tromans, P.S., Anaturk, A.R. and Hagemeijer, P., (1991) A new model for the kinematics of large ocean waves-application as a design wave, Proc. of 1st International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.3, p.64-71.
19- Taylor, P.H, Jonathan, P. and Harland, L.A., (1997), Time domain simulation of jack-up dynamics with extremes of a Gaussian process, Journal of Vibration Acoustic, Vol.119, p.624-628.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]

20- Zeinoddini, M., Matin Nikoo, H. and Estekanchi, H., (2012), Endurance Wave Analysis (EWA) and its application for assessment of offshore structures under extreme waves, Journal of Applied Ocean Research, Vol.37, p.98-110.
21- Jalayer, F., (2003), Direct probabilistic seismic analysis: implementing non-linear dynamic assessments. Ph.D. Thesis, Department of Civil Environment Engineering, Stanford University.
22- Ahmadi, H. and Lotfollahi-Yaghin M., A., (2012), A probability distribution model for stress concentration factors in multi-planar tubular DKT-joints of steel offshore structures., Journal of Applied Ocean Research,Vol.34, p.21-32.
23- Lolla, S.V. and Hoberock L.L., On selecting the number of bins for a histogram, School of Mechanical and Aerospace Engineering Oklahoma State University.
24- Park, H.M., (2008), Univariate analysis and normality test using sas, stata and SPSS, Center for Statistical and Mathematical Computing Indiana University.
25- Zeinoddini, M., (2012), In situ quasi-static and dynamic behavior response of steel tubular frames subjected to lateral impact loads, Latin American Journal of Solid Structures, Vol.9, p.383-400.
26- O'Neill, L., Fakas, E., and Cassidy, M., (2006), A methodology to simulate floating offshore operations using a design wave theory, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.128, p.304-313.
27- Sorensen, R.M., (2006), Basic coastal engineering, 3th Ed., Springer.
28- Arena F and Fedele F, (2005), Non-linear space-time evolution of wave groups with a high crest, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.127, p.46-51.
29- FEMA-350, (2000), recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, Washington D.C., Federal Emergency Management Agency.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.2.5]