

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

حمید متین نیکو^{۱*}، مصطفی زین الدینی^۲، همایون استکانچی^۳

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)^۱ 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^۲ 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^۳ 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 به صورت 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. Zeinodini², H. Estekanchi³

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

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

۱- 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 به منظور ارزیابی عملکرد سکوه‌های 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 نظر گرفتن پدیده اثر موج برعرشه^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 توأثرهای 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 توأثر ثابت ممکن است منتج به مقدار حداکثر پاسخ DNV-RP-C205 از این روست که مطابق [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 (سه ساعته، 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 سکوه‌های 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 سکوه‌های دریایی نوع جاکت برقرار

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

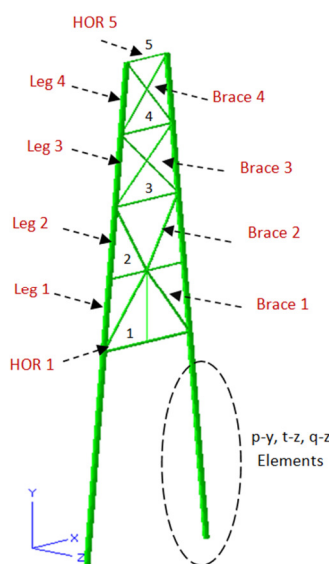
در این مطالعه به منظور معرفی و مدل سازی تاریخچه-های زمانی بلندمدت (سه ساعته) و کوتاه مدت (مدل موج نو مقید شده) امواج تصادفی و محاسبه نیروی حاصل از آن به سازه، تعدادی زیربرنامه^۸ به زبان فرترن تدوین گردیده است که قابلیت پردازش موازی با ماشین محاسباتی ABAQUS را دارا می باشد. زیربرنامه قادر است در هر گام محاسباتی مقادیر سرعت و شتاب ذرات را جهت استفاده در رابطه موريسون 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 کوتاه شده را (مطابق طیف های جان - سوآپ و پیرسون - موسکویتز و بر اساس سرعت باد یا ارتفاع موج مؤثر) فراهم می آورد.

جدول ۲- مشخصات خاک بستر.

φ(deg)	c _u (kPa)	γ'(kN/m ³)	لایه
۲۵	-	۶/۵	۱
-	۴۵	۷/۵	۲
۳۰	-	۸	۳
-	۵۰	۸	۴
۳۰	-	۸	۵
-	۴۰	۷/۵	۶
-	۱۱۰	۷/۵	۷
۳۰	-	۸	۸
-	۱۸۰	۹/۵	۹
۳۰	-	۸	۱۰
-	۳۰۰	۹	۱۱

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

در جداول ۱ و ۲ به ترتیب 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 می باشد. شایان ذکر است این مقادیر می تواند از مشخصات فولاد متداول در سکوهای خلیج فارس تا حدودی قوی تر باشد.



شکل ۱- مشخصات هندسی و نحوه مدل خاک اطراف شمع سکوی مورد مطالعه.

۳- شبیه‌سازی‌های امواج بلندمدت و کوتاه‌مدت تصادفی

مطالعات قبلی انجام شده بر روی روش تحلیل موج افزایشی بر تئوری امواج منظم استوار بوده است [۵، ۶]. 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 امواج تدریجاً رشد یافته، 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 شکل گرفته است، مورد تردید خواهد بود. با توجه به موارد ذکر شده مطلوب به نظر می‌رسد که اثر پیشینه و سیر شکل‌گیری 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 [۱۰، ۱۴، ۱۵، ۱۶]) 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 کوتاه‌مدت 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 پیشینه مورد انتظار

نیز می‌باشند. تئوری موج‌نو^۹ و موج‌نو مقیدشده^{۱۰} نمونه‌ای از تاریخچه‌های امواج کوتاه‌مدت تصادفی می‌باشند [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 [۱۴، ۱۵، ۲۰].

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 مدل‌های کوتاه‌مدت مقیدشده نیز در تحلیل موج افزایشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴- رویکرد احتمالاتی پیشنهاد شده در این تحقیق برای بدست آوردن ظرفیت نهایی سکوه‌های 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 در نظر 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 شبیه‌سازی امواج تصادفی انجام شده و پاسخ‌های سازه شامل

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 $18m$ ($H_s=2\sim 18m$) 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 ($10 \times 17 = 170$) 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 یافت.

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:

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

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

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

$k_n = \frac{\omega_n^2}{g}$ 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

جابه‌جایی بالای عرشه سکو^{۱۴} و برش پایه (متناظر با پارامتر اندازه خرابی^{۱۵} 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^{۱۶} ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ استخراج شده‌اند. در نهایت با رسم زوج داده‌های بدست آمده برای مقادیر صعودی شدت بار، منحنی ظرفیت سازه بدست می‌آید.

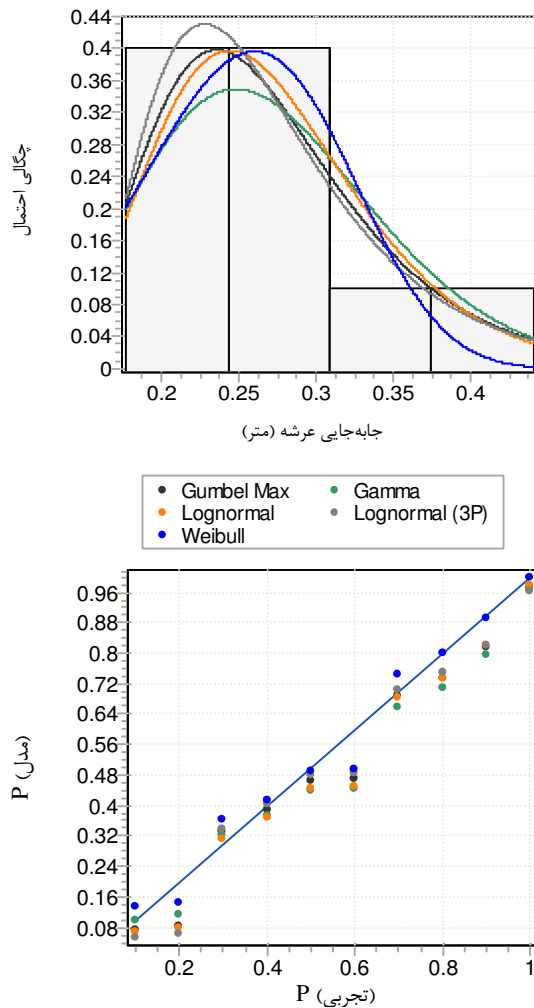
۵- روش انجام تحقیق

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 سکوهاى 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 شبیه‌سازی-های امواج تصادفی بلندمدت (۳ ساعته).
- روش تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی-های 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 شبیه‌سازی-های 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



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 $H_s=14m$.

در جدول ۳ نتایج آزمون نکویی توابع توزیع پاسخ جابه-جایی عرشه به کمک آزمون K-S^{۱۸} آمده است.

جدول ۳- نتایج آزمون نکویی برای پاسخ جابه جایی عرشه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته.

آزمون K-S ترتیب نکویی	پارامتر	تابع توزیع احتمال
۱	$\sigma = 0.06 \quad \mu = 0.23$	Gumbel Max
۲	$\sigma = 0.44 \quad \mu = 1.89 \quad \gamma = 0.1$	Lognormal (3P)
۳	$\sigma = 0.26 \quad \mu = 1.34$	Lognormal (2P)
۴	$\alpha = 11/91 \quad \beta = 0.02$	Gamma
۵	$\alpha = 4/36 \quad \beta = 0.27$	Weibull

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

مطابق رویکرد معرفی شده در بخش ۴، به منظور شناسایی بهترین توابع توزیع منطبق با پارامترهای نیاز، در این مطالعه از ۹ 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]:

$$k = \sqrt{n} \quad (3)$$

$$k = 5(\log n) \quad (4)$$

$$k = 1 + \log_2 n \quad (5)$$

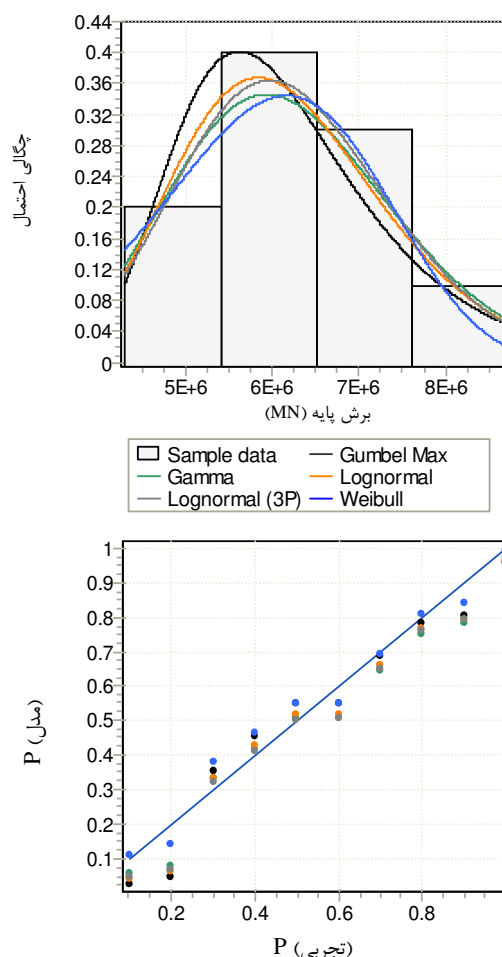
که k معرف تعداد نوار یا دسته‌های تفکیک‌شده داده‌ها و n تعداد داده‌ها می‌باشد که در این بخش برابر با ۱۰ است. بنابراین روابط فوق بترتیب مقادیر $\sqrt{10} \cong 3.2$ ، $5 \log 10 = 5$ و $1 + \log_2 10 \cong 4.35$ را به عنوان تعداد مناسب گروه‌ها اعلام می‌کنند. در این تحقیق بطور میانگین مقدار k برابر ۴ در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ هر پنج تابع توزیع برازش شده به مقادیر پاسخ جابه‌جایی عرشه در سطح شدت $H_s=14m$ 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].

در شکل ۴ منحنی ظرفیت سکوی مورد مطالعه برای هر ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه-سازی‌های 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 به دست آمده است. بنابراین به کمک ۱۷ مقدار پاسخ ($H_s=2\sim 18m$) یک منحنی ظرفیت استخراج شده است. خلاصه نتایج بدست آمده شامل مقادیر برش پایه ظرفیت، جابه‌جایی عرشه متناظر با آن و ارتفاع موج شکست^{۱۹} (CWH) در آستانه وقوع حد CP^{۲۰} (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 سکوهاى دریایی، مشابه آنچه در سازه‌های مستقر در خشکی در برابر نیروی زلزله وجود دارد، نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد.

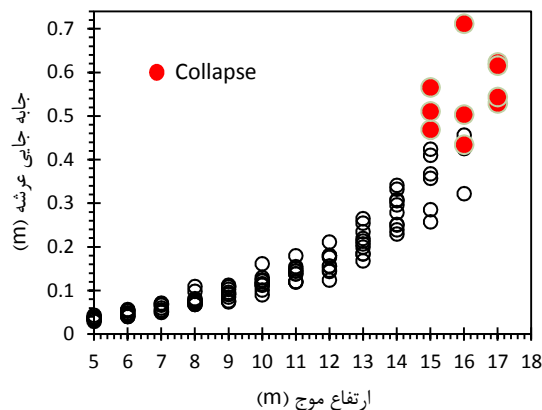
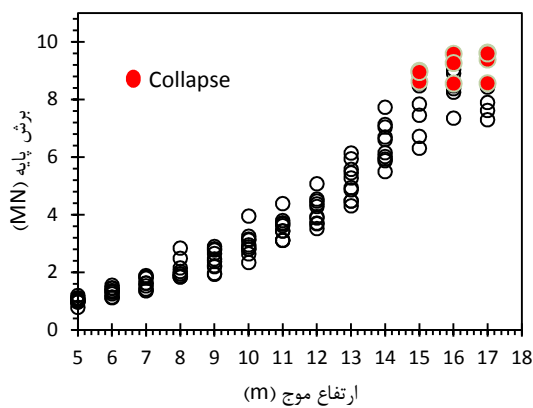
جدول ۴- خلاصه نتایج ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی به کمک امواج تصادفی ۳ ساعته.

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

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 $H_s=14m$ 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 شده است، انتظار می‌رود با افزایش تعداد تحلیل‌ها دقت برازش توابع احتمالاتی نیز دقیق‌تر شود.

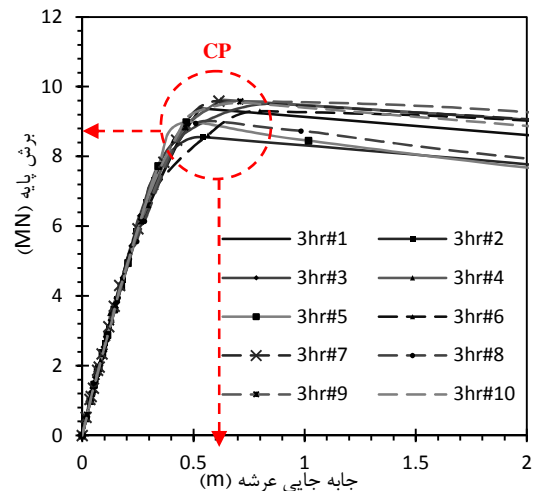


شکل ۳- توابع احتمالاتی برازش داده شده به مقادیر برش پایه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته (بالا) و منحنی P-P (پائین) در سطح شدت $H_s=14m$.



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 توجهی 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 دلیل 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



شکل ۶- 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 مؤثر 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.

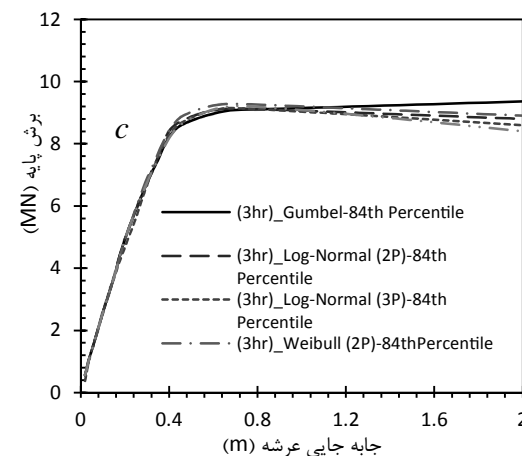
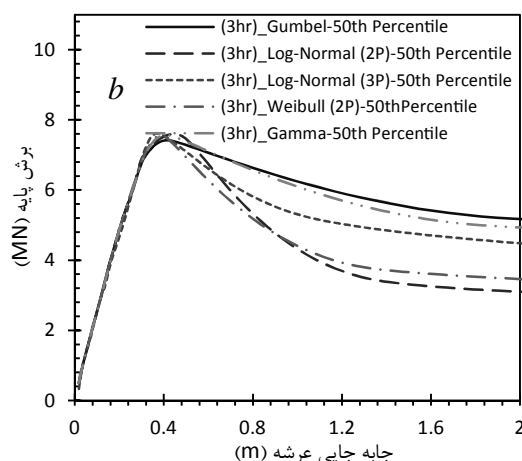
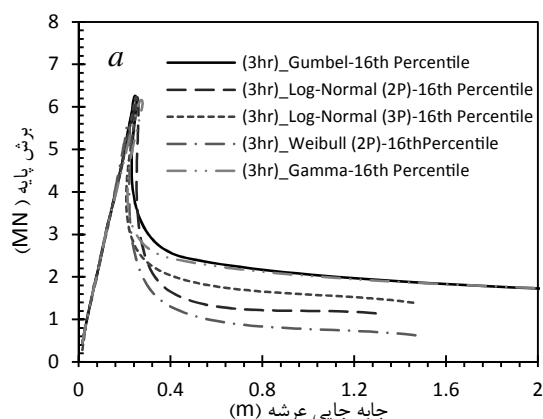
همانطور که انتظار می‌رود مقادیر ظرفیت گزارش شده از منحنی صدک ۱۶٪ کمتر از منحنی ۵۰٪ می‌باشد و این روند برای حالت ۵۰٪ و ۸۴٪ نیز صادق است. در اینجا نیز چند نکته قابل برداشت است:

- 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 پیروید ثابت) اتفاق نخواهد افتاد و مود و مکانیزم‌های خرابی، یکسان و احتمالاً دور از واقعیت خواهند بود. همانطور که از روی منحنی ۱۶٪ می‌توان ملاحظه 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 الگوهای 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)

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 ۶- منحنی‌های ظرفیت استخراج شده با رویکرد تحلیلی بر روی امواج تصادفی بلندمدت ۳ ساعته. (a) صدک ۱۶٪ (b) صدک ۵۰٪ و (c) صدک ۸۴٪.

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، α 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 βH_{\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]:

$$\alpha = \beta H_{\max} \quad (7)$$

$$H_{\max} = 0.707 H_s \sqrt{\ln N} \quad (8)$$

N تعداد امواج سینوسی استخراج شده از طیف امواج می‌باشد که در مقدار حداقل آن طبق [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، به دلیل تصادفی بودن زاویه فاز امواج خطی مداخله کننده، نیمرخ متفاوتی به دست خواهد آمد.

در این مطالعه نیز به منظور بررسی کفایت امواج کوتاه-مدت مقیدشده در تحلیل موج افزایشی، رویکرد مشابه-ای 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 $20 \times 17 = 340$ تحلیل). سپس به کمک آزمون‌های آماری بهترین تابع توزیع شناسایی شده است. منحنی-های 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

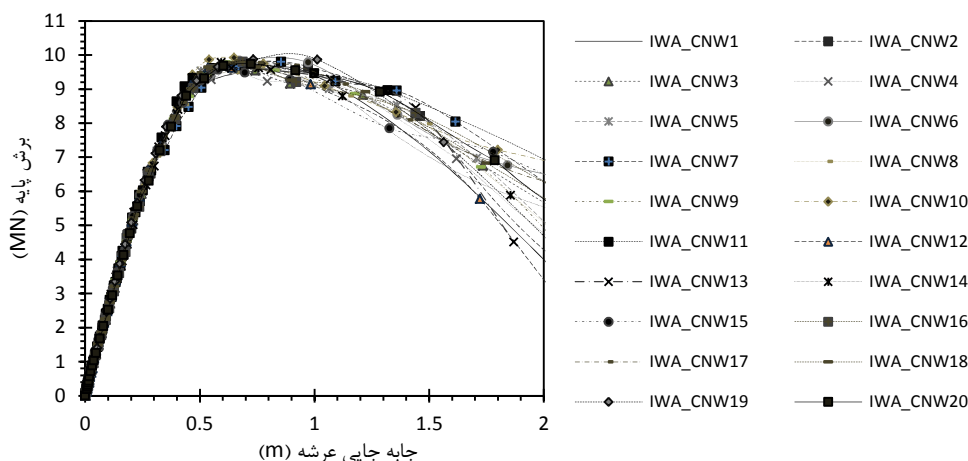
است که سازه رفتار شکل‌پذیرتری را از خود در مقابل آن نشان می‌دهد و هر چه مقدار صدک، اعمال شده کمتر باشد متناظر با شرایط دریایی است که سازه در مقابل آنها رفتار ترد خواهد داشت. به بیان دیگر، در رویکرد معرفی شده در این تحقیق، کلیه حالت‌های بارگذاری دریایی - اعم از حالت‌های بارگذاری بحرانی و مخرب و بارگذاری‌های ملایم و غیر بحرانی - 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 شبیه-سازی‌های 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:

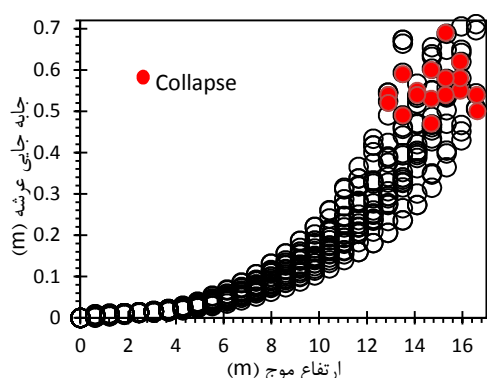
$$\xi_c = \xi_R(t) + \rho(t) \left[\alpha - \sum_{n=1}^N A_n \right] + \left(\frac{-\dot{\rho}(t)}{\lambda^2} \right) \left[\alpha - \sum_{n=1}^N \omega_n B_n \right] \quad (6)$$



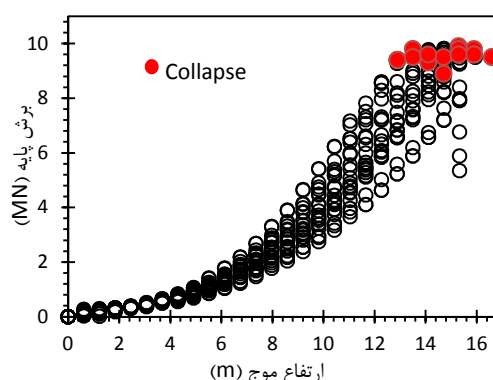
شکل ۷- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده از ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی با استفاده از مدل موج‌نو مقیدشده و استخراج مقادیر متناظر با حد عملکردی CP.

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.

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 به دست آمده است. بنابراین به کمک ۱۷ مقدار پاسخ ($H_s=2\sim 18m$) یک منحنی ظرفیت استخراج شده است.



شکل ۸- مقادیر ۲۰ سری تحلیل چندگانه نواری به کمک مدل موج‌نو مقیدشده افزایشی، حاصل از 20×17 تحلیل (بر حسب جابه‌جایی عرشه)



شکل ۹- مقادیر ۲۰ سری تحلیل چندگانه نواری به کمک مدل موج‌نو مقیدشده افزایشی، حاصل از 20×17 تحلیل (بر حسب برش پایه)

جدول ۵- خلاصه نتایج ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی به کمک مدل موج‌نو مقیدشده.

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

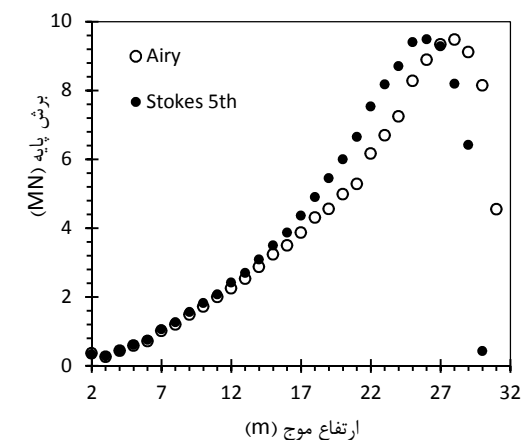
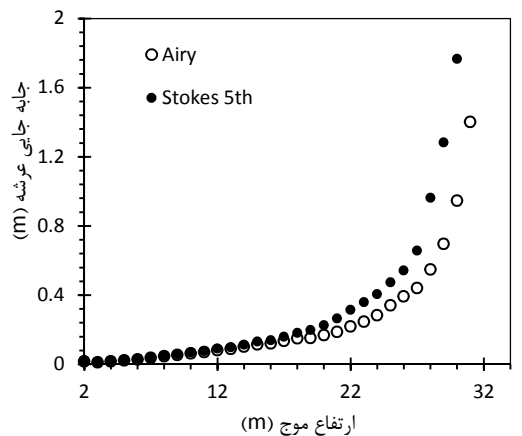
۵-۳- تحلیل موج افزایشی با به کارگیری تئوری امواج منظم

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

$$T_{H\max} = a \cdot H_{\max}^b \quad (9)$$

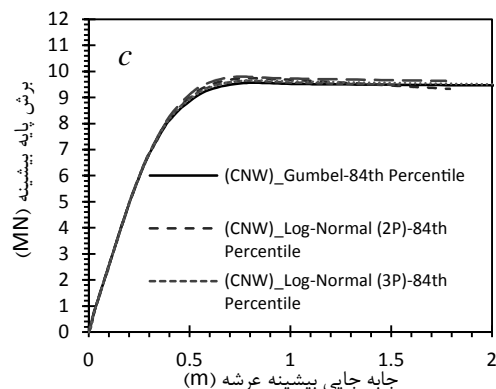
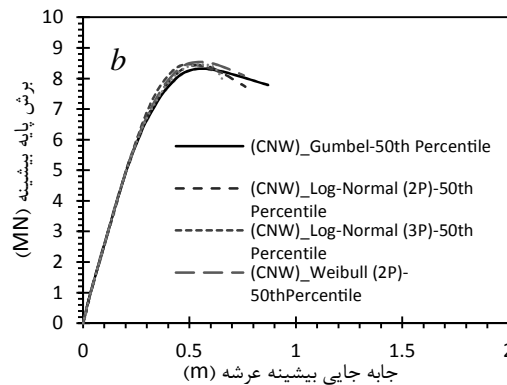
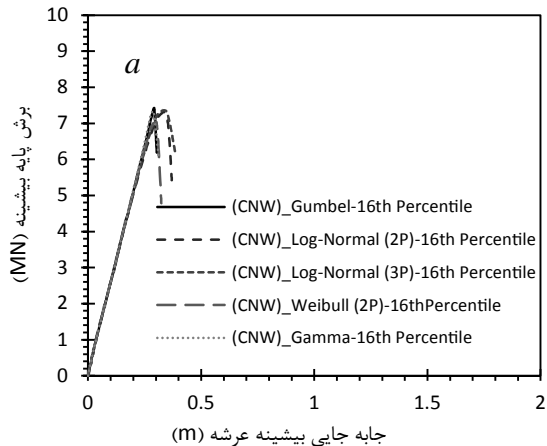
در این رابطه a و b مقادیر تجربی هستند که برای فلات نروژ برابر با $a = 2.94$ و $b = 0.5$ می‌باشند. به علت نزدیکی این دو مقدار با مشاهدات منطقه خلیج فارس [۶]، در این مقاله نیز از مقادیر فوق استفاده شده است.

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.

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 شکل پذیری سازه نیز بیشتر گزارش می‌شود.

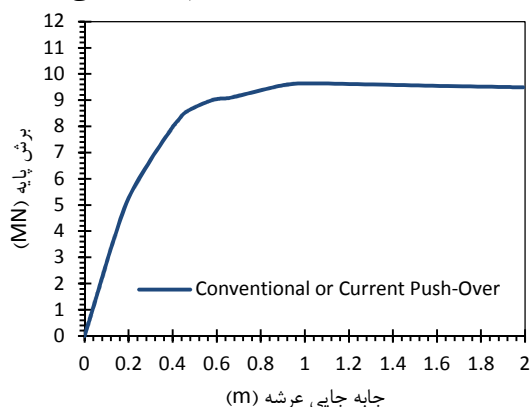


شکل ۱۰- منحنی‌های ظرفیت استخراج شده با رویکرد تحلیلی بر روی ۲۰ سری تحلیل. (a) صدک ۱۶٪ (b) صدک ۵۰٪ و (c) صدک ۸۴٪.

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.

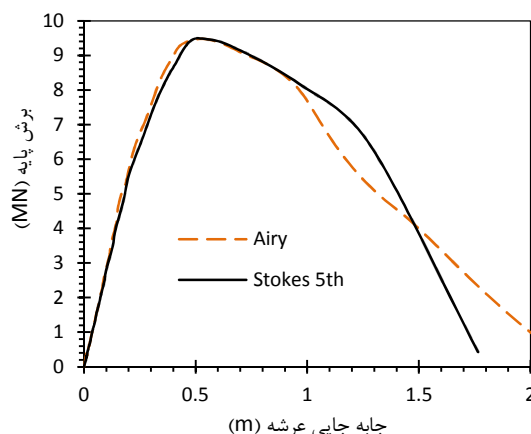
۶- مقایسه نتایج

نتایج در سه بخش ارائه می‌شوند. قبلاً مشاهده گردید که پس از اتخاذ رویکرد احتمالاتی در استخراج منحنی‌های ظرفیت سکو، هر پنج تابع توزیع برآزش 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 محافظه-کارانه‌ترین شرایط بارگذاری محیطی است و انتخاب آن

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 به همراه 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

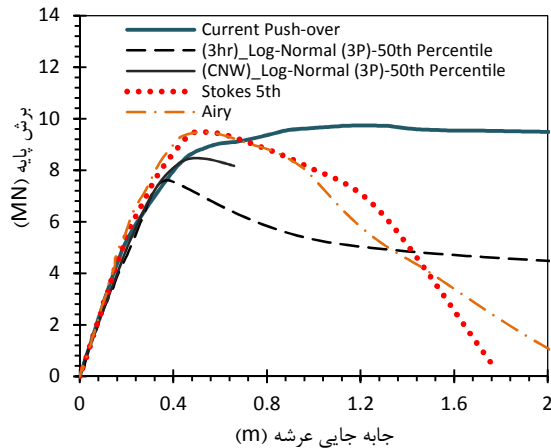
همانطور که از روی شکل ۱۲ می‌توان دید، با استفاده از تئوری امواج ایری و استوکس، مقادیر تقریباً یکسان و برابری برای ظرفیت سازه بدست آمده است و تنها تفاوت آن‌ها در رفتار سازه بعد از نقطه شکست است. علت این امر تفاوت الگوی بارگذاری در تئوری‌های ایری و استوکس مرتبه ۵ است. در جدول ۶ مقادیر ظرفیت سکوی مورد مطالعه به کمک تحلیل امواج منظم افزایشی آمده است.

جدول ۶- خلاصه نتایج تحلیل موج منظم افزایشی به کمک 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	موج ایری
۲۵	۰/۴۷	۹/۴	استوکس مرتبه ۵

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 می‌دهد.

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.



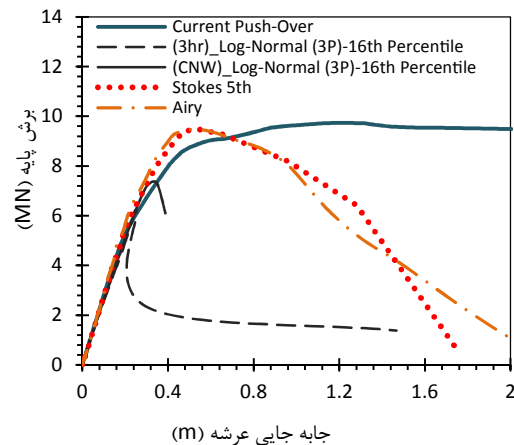
شکل ۱۵- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۵۰٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم

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

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

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

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



شکل ۱۴- منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۱۶٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم

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 سکوهایی دریایی،

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 ملاحظه نمود که تحلیل استاتیکی بار افزون، گزارش خرابی متفاوتی را در مقایسه با تحلیل دینامیکی موج افزایشی (چه منظم و چه نامنظم) نشان می‌دهد.

۲-۶- 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

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

ظرفیت نهایی (MN)	جابه جایی عرشه متناظر با خرابی (m)	
	۸/۵	۰/۴۶
۹/۳	۰/۴۴	موج ابری
۹/۴	۰/۴۷	استوکس مرتبه ۵
۹/۱	۰/۵۱	شبهه- صدک
		سازى ۳ ۸۴ ساعته
۹/۳	۰/۵۴	موج نو صدک
		مقید شده ۸۴

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 به کمک 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 شبهه-سازى‌های بلندمدت (۳ ساعته) می‌باشد. بنابراین مدل موج‌نو مقیدشده می‌تواند جایگزین مناسبی برای شبهه-سازى بلندمدت باشد (به مدت زمان لازم جهت انجام تحلیل‌های مورد نظر در جدول ۱۱ نیز نگاه کنید).

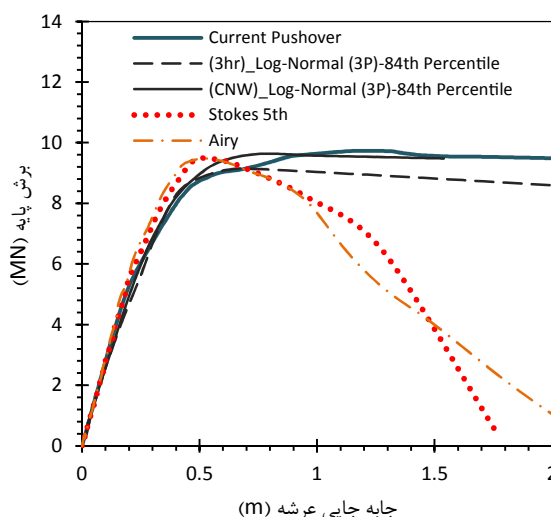
بطور مثال، مشابه آنچه در FEMA برای ساختمان‌ها تعریف می‌شود [۲۹]، نیاز به تحقیقات جامع و مبسوط‌تری خواهد داشت.

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.

۳-۶- 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 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)
۲۲/۳	۱۲	۰/۴۶	۸/۵
۲۷	۱۴/۵	۰/۴۴	۹/۳
۲۵	۱۳/۵	۰/۴۷	۹/۴
۲۸	۱۵	۰/۴۳	۸/۵
۳۱/۶	۱۷	۰/۷۱	۹/۶
۳۰	۱۶	۰/۵۵	۹/۱
۲۴	۱۲/۹	۰/۴۷	۸/۹
۳۲	۱۷/۱	۰/۶۹	۹/۹
۲۸	۱۵	۰/۵۶	۹/۵

بدست آمده، با نتایج حاصل از تحلیل بار افزون مرسوم مورد مقایسه قرار گرفته است. در نهایت، با الهام از مطالعات لرزه‌ای ساختمان‌ها، یک رویکرد احتمالاتی برای استخراج منحنی ظرفیت سکوه‌ای دریایی پیشنهاد گردید که به کمک 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 موج بر عرشه 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 Prevention (CP)

بر اساس مقادیر گزارش شده در جدول ۱۰، نتایج روش‌های متعین (تحلیل امواج منظم افزایشی) تقریباً منطبق با غیرمحافظة کارانه‌ترین (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 ابری و موج‌نو مقید شبیه‌سازی ۳ ساعته		استوکس شده	
زمان انجام یک تحلیل	۴ دقیقه	۱۵ دقیقه	۲۸۸۰ دقیقه
تعداد تحلیل	۶۰	۳۴۰	۱۷۰
زمان کل	۲۴۰	۵۱۰۰	۴۸۹۶۰۰

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر امواج با فرکانس و پریودهای مختلف بر روی ظرفیت نهایی سکوه‌ای دریایی نوع جاکت به کمک 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 ابری و استوکس مرتبه ۵ قرار گرفته و نتایج

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 Housby 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 Housby, G.T., (2001), Analysis of jack-up units using a constrained NewWave methodology, Journal of Applied Ocean Research, Vol.23, p. 221-234.

15- Cassidy, M.J., Taylor, P.H., Taylor, R.E and Housby, G.T., (2002), Evaluation of long-term extreme response statistics of jack-up platforms, Journal of Applied Ocean Research, 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 Hagemeyer, 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.

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., Ahmadvour, 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- Segrilo, 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,

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.
- 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,