یادداشت فنی

محاسبه حداکثر ارتفاع موج محتمل طی عمر طراحی سکوهای دریایی واقع در خلیج‌فارس

علی‌رضا فیاضی[۱*]، علی اکبر آقاکوچک[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a.fayazi@modares.ac.ir
[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a_agha@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۰۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:
ارتفاع مشخصه موج
حداکثر ارتفاع موج
پریود تقاطع صفر با شیب مثبت
عمر طراحی
خلیج فارس

چکیده

پیش‌بینی حداکثر ارتفاع موج به‌عنوان پارامتری اساسی در طراحی و ارزیابی سازه‌های دریایی با عدم قطعیت همراه است. مقاله حاضر دو الگوریتم را برای محاسبه حداکثر ارتفاع موج محتمل با توجه به داده‌های آماری موجود در منطقه خلیج‌فارس پیشنهاد می‌کند.

در روش اول از یک تابع توزیع احتمال مشترک دراز مدت وابسته به ارتفاع و پریود موج و در روش دوم از یک تابع توزیع احتمال مشترک بر حسب یک تابع احتمالاتی و مجموعه‌ای از توابع احتمال شرطی، بهره گیری می‌شود.

در پایان نیز با در نظر گرفتن عمر طراحی سکوهای دریایی، ارتفاع موجی که در مدت عمر طراحی این سکوها دارای احتمال فراگذشت‌های متفاوت می‌باشد، محاسبه گردیده است.

Calculation of probable extreme wave height during life time of offshore platforms in the Persian Gulf

Ali Reza Fayyazi[1*], Ali Akbar Aghakouchak[2]

[1] PhD student, Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University; a.fayazi@modares.ac.ir
[2] Professor, Civil and Environmental Faculty Tarbiat Modares University; a_agha@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Feb. 2013
Accepted: 11 Mar. 2014
Available online: 19 Mar. 2014

Keywords:
significant wave height
maximum wave height
zero-up crossing period
lifetime
Persian Gulf

ABSTRACT

Prediction of maximum wave height as the fundamental parameter for assessment and design of offshore structures are faced with uncertainties. This paper proposes two algorithms for calculation of the probable extreme wave height in the Persian Gulf with respect to existing statics data in the South Pars region .

A long-term joint distribution model of the corresponding wave height and wave period is needed in the first method and in the second method, a joint density function is defined in terms of a marginal distribution and a series of conditional density functions.

Finally some curves have been derived which may be used for estimating exceedance probability of maximum wave height for life time of offshore structures.

۱- مقدمه

ارتفاع امواج حادث در هر نقطه از دریا تابع شرایط محیطی منطقه از قبیل سرعت باد و مدت تداوم آن، طول بادگیر و عمق آب می‌باشد. این ارتفاع در کوتاه مدت یعنی در مدت زمان وقوع یک حالت دریا[۱]، که ممکن است چند ساعت ادامه داشته باشد، و نیز در دراز مدت یعنی در طول یک ماه و یا یک سال و یا در مدت زمان عمر طراحی یک سازه که چند ده سال است، متغیر می‌باشد. ارتفاع امواج در هر حالت دریا را می‌توان با استفاده از طیف آن و یا به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]

صورت ساده شده با استفاده از ارتفاع مشخصه‌ای نظیر $H_{1/3}$ یا $H_{1/10}$ توصیف نمود. در طراحی انواع سازه‌های دریایی، بسته به نوع سازه و نوع تحلیل، می‌توان از یکی از توصیف‌های فوق‌الذکر استفاده نمود. در خصوص سکوهای دریایی چنانچه زمان تناوب اصلی سازه از حدود ۳ ثانیه تجاوز ننماید، در مناطقی از قبیل خلیج فارس، که حالات دریای محتمل دارای انرژی قابل ملاحظه‌ای در حوالی این زمان تناوب نمی‌باشند، آیین‌نامه‌های طراحی اجازه می‌دهند این سازه‌ها با یک روش شبه استاتیکی در برابر امواج طرح تحلیل و طراحی شوند. امواج طرح در این حالت، حداکثر ارتفاع محتمل موج، H_{max}، می‌باشند. لیکن از آنجا که این ارتفاع در طولانی مدت، یک متغیر تصادفی بوده و بسته به مدت زمان در نظر گرفته شده دارای مقادیر مختلف است، آیین‌نامه‌های طراحی استفاده از مقادیر متناظر با دوره‌های بازگشت یک و صد سال را برای طراحی سازه در حالات بهره‌برداری و طوفان طرح توصیه می‌نمایند.

یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها در انجام محاسبات مربوط به ارتفاع موج طرح، استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر اطلاعات آماری و سنجش‌های میدانی است. اطلاعات آماری ممکن است به صورت داده‌های ثبت شده‌ی تغییرات سطح آب با استفاده از تجهیزاتی نظیر گوی شناور و یا به‌صورت داده‌های سرعت باد باشد. به‌طور مثال در تحقیقات صورت گرفته توسط سازمان بنادر و دریانوردی ایران، با استفاده از آمار شبیه‌سازی شده باد و کالیبراسیون محاسبات به‌وسیله داده‌های آماری بویه‌های موجود در نواحی ساحلی و اطلاعات ماهواره‌ای به استخراج پارامترهای دراز مدت موج پرداخته شده است [۱]. در این حالت ضروری است از روش‌های محاسبات عددی وابسته به دادههای آماری موج[۲] برای تبدیل این داده‌ها به اطلاعات موج استفاده شود[۲]. تحلیل‌های آماری در نهایت منتهی به حصول پارامترهای اساسی موج از جمله ارتفاع‌های مشخصه موج می‌شود[۳].

از جمله مهمترین منابع جمع‌آوری اطلاعات آماری موج، مراجعه به مشاهده‌های عینی دریانوردان است که طی سفرهای دریایی مختلف ثبت گردیده‌اند. برای اولین بار در سال ۱۹۶۷ داده‌های مربوط به اروپا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و روابط ساده‌ای به‌منظور محاسبه مقادیر مشخصه موج ارائه شد [۴]. طی دهه نود میلادی تحقیقات معتبری بر اساس داده‌های عینی به انجام رسیده که سهم بسزایی در استخراج مشخصات فیزیکی موج‌ها در شرایط و مناطق مختلف جغرافیایی و البته در طراحی کشتی‌ها داشته‌اند[۵،۶و۷و۸]. در خلیج‌فارس نیز مهمترین منبع استخراج داده‌های مختلف محیطی، گزارش گلن است که در سال ۱۹۹۳ و بر اساس داده‌های حاصل از مشاهده‌های عینی جمع‌آوری شده و مرجع طراحی بسیاری از سکوهای واقع در این منطقه است[۹].

در سال‌های اخیر و با استفاده از تکنولوژی‌های ماهواره‌ای، حجم قابل توجهی از داده‌های آماری تولید شده و روش‌های متنوعی نیز برای استفاده از این داده‌ها ارائه شده است[۱۰]. در سال ۲۰۱۱ طیف جان‌سوآپ سازگار با شرایط خلیج فارس نیز بر اساس اطلاعات آماری ۶ ماهه مربوط به ۶ ایستگاه مختلف، ارائه شد[۱۱].

چنانکه قبلاً نیز ذکر شد محاسبه مقادیر حداکثر ارتفاع موج و پریود مربوطه از جمله مهمترین مشخصه‌های اصلی امواج هستند که برای طراحی سازه‌های دریایی و به‌ویژه سازه‌های فراساحل ضروری است. به این منظور مقالات زیادی به موضوع تبیین توزیع‌های احتمالاتی حاکم بر رفتار ارتفاع و پریود موج پرداخته‌اند. در تشریح رفتار احتمالاتی حداکثر ارتفاع موج، در سال ۱۹۸۵ مدل توزیع احتمالاتی ریلی ارائه شد [۱۲]. در سال ۱۹۷۸ تابع توزیع فوریستال بر مبنای ارتفاع‌های موج استخراج شده از گوی شناور مستقر در خلیج مکزیک ارائه گردید [۱۳] و بعدها در سال ۲۰۰۰، روابطی به‌منظور بیان تابع توزیع احتمالاتی ارتفاع امواج بالاتر از سطح معمول آب ارائه شد. در سال ۱۹۹۹ نیز مدل نطف[۳] جهت استخراج مقادیر حداکثر ارتفاع موج ارائه شد [۱۴].

در سال ۱۹۵۲ تابع توزیع گاما بهمنظور تشریح رفتار احتمالاتی پریود موج ارائه شد[۱۵]. در سال ۱۹۵۹ نیز مدل برشنایدر و در سال ۱۹۸۵ مدل ریلی برای این منظور پیشنهاد شد[۱۶و۱۷]. در سال ۱۹۹۳ توابع مختلف چگالی احتمالاتی از جمله گاما، ریلی، برشنایدر و توابع توانی مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که توزیع گاما بهترین تطبیق را با داده‌های عینی مربوط به پریودهای موج در سواحل جنوبی هند دارد[۱۸]. برخی از محققین تابع توزیع احتمالاتی کوتاه مدتی را برای پریود تقاطع‌صفرباشیب مثبت[۴] ارائه داده‌اند که در آن احتمال وقوع پریود متوسط موج به شرط وقوع ارتفاع مشخصه موج بر اساس تابع توزیع نرمال بیان می‌شود [۱۹،۲۰و۲۱]. برخی از محققین نیز پیشنهاد نموده‌اند که برای پریود تقاطع صفرباشیب‌مثبت، به‌ازای ارتفاع‌های مشخصه موج از تابع توزیع احتمالاتی شرطی به‌صورت لگ‌نرمال استفاده شود. در سال ۲۰۱۰ نیز گل‌افشانی و ابراهیمیان با استفاده از مدل‌های مربوط به توابع توزیع مشترک و توزیع احتمال ارتفاع مشخصه موج و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت محاسبات مربوط به حداکثر ارتفاع موج را انجام دادند[۲۴].

۲- داده‌های آماری پایه

در تحقیق حاضر، حداکثر ارتفاع موج در منطقه‌ای دور از ساحل خلیج‌فارس (با عمق بیش از ۶۰ متر و با مختصات تقریبی 26°46'20"N و 52°05'59"E) بر اساس داده‌های آماری موجود در دو حالت *احتمال وقوع در یک سال* و *احتمال وقوع در مدت عمر طراحی* یک سکوی دریایی، برای تمامی ۸ جهت اصلی و فرعی جغرافیایی

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]

استخراج خواهد شد. به این منظور اطلاعات آماری مربوط به توزیع مشترک ارتفاع مشخصه موج و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت مربوط به آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و سپس حداکثر ارتفاع موج تخمین زده می‌شود. به‌منظور استفاده از داده‌های آماری، ارجح است اطلاعات مربوط به تمام جهت‌های محتمل وقوع موجود باشد. در این صورت تابع چگالی احتمال مشترک پارامترهای ارتفاع موج و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت برای تمام جهت‌های موج قابل استخراج خواهد بود. در خصوص خلیج فارس داده‌های آماری موجود در گزارش گلن برای مشخصه‌های حالات مختلف دریا شامل ارتفاع مشخصه موج H_s و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت، T_z، بر حسب میزان وقوع در سال برای ترکیب تمامی جهت‌ها در جدول۱ ارائه شده است. در جدول‌هایی مشابه با این جدول، همین اطلاعات برای ۸ جهت اصلی و فرعی جغرافیایی ارائه گردیده است.

۳- مدل احتمالاتی دراز مدت موج

به‌منظور تخمین مدل احتمالاتی موج، تابع چگالی احتمال مشترک $f_{H_sT_z}(h_s, t_z)$ با توجه به داده‌های آماری ارتفاع مشخصه موج و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت، برای هر جهت خاص مطابق آنچه که در مرجع [۲۵] ارائه شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$f_{H_sT_z}(h_s, t_z) = f_{T_z|H_s}(t_z|h_s)\,.\,f_{H_s}(h_s) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق $f_{H_s}(h_s)$ عبارتست از تابع چگالی احتمال دراز مدت ارتفاع مشخصه موج و $f_{T_z|H_s}(t_z|h_s)$ عبارتست از تابع چگالی احتمال مشروط پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت به شرط وقوع ارتفاع مشخصه موج.

جدول ۱- داده‌های ارتفاع مشخصه و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت حالت‌های دریا برای ترکیب تمامی جهت‌ها [۹]

پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت	گروه‌بندی ارتفاع‌های مشخصه موج (متر)									
ثانیه	۰-۰/۴	۰/۵-۰/۹	۱/۰-۱/۴	۱/۵-۱/۹	۲/۰-۲/۴	۲/۵-۲/۹	۳/۰-۳/۴	۳/۵-۳/۹	۴/۰ و بیشتر	مجموع
۰-۲/۴	۵۹	۳۳	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۶
۲/۵-۳/۴	۶۲	۹۵	۴۵	۱۲	۱	۰	۰	۰	۰	۲۱۵
۳/۵-۴/۴	۵۳	۹۷	۷۰	۳۴	۸	۱	۰	۰	۰	۲۶۳
۳/۵-۵/۴	۱۹	۵۹	۷۱	۴۱	۲۰	۶	۱	۰	۰	۲۱۷
۵/۵-۶/۴	۷	۱۸	۲۵	۳۳	۲۵	۱۴	۵	۱	۰	۱۲۸
۶/۵-۷/۴	۳	۷	۹	۹	۱۱	۹	۷	۳	۲	۶۰
۷/۵-۸/۴	۱	۴	۴	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱۸
۸/۵-۹/۴	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۳
۹/۵-۱۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰/۵-۱۱/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱/۵-۱۲/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۲۰۴	۳۱۳	۲۲۹	۱۳۴	۶۷	۳۱	۱۴	۵	۳	۱۰۰۰

از میان روش‌های متنوع و مختلف برای در نظر گرفتن تابع توزیع دراز مدت ارتفاع مشخصه موج، در تحقیق حاضر از تابع توزیع ویبول سه پارامتری استفاده شده است. فرم کلی تابع توزیع ویبول سه پارامتری به شکل زیر است [۲۵ و۲۶].

$$f_{H_s}(h) = \frac{\beta_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\left(\frac{h-\gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}-1} exp\left\{-\left(\frac{h-\gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right\} \qquad (۲)$$

در عبارت فوق α_{H_s}، پارامتر مقیاس، β_{H_s} پارامتر شکل و γ_{H_s} موسوم به پارامتر موقعیت است. با توجه به تابع چگالی احتمال فوق، تابع توزیع تجمعی ویبول به صورت کلی زیر می‌باشد.

$$F_{H_s}(h) = 1 - exp\left\{-\left(\frac{h-\gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right\} \qquad (۳)$$

پارامترهای این تابع با توجه بـه داده‌هـای موجـود بـه روش MLE قابل محاسبه است. در تحقیق حاضر برای منطقه مورد نظر در خلیج فارس، از داده‌های مندرج در گزارش گلن و جدول‌های مشابه جدول۱ مربوط به تمامی جهت‌ها استفاده شده و پارامترهـای تـابع ویبول برای هشت جهت به شـرح جـدول۲ اسـتخراج گردیـده‌انـد. بـه‌منظـور تعیـین و محاسـبه توزیـع احتمـال مشـروط پریـود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت موج به شرط وقـوع ارتفـاع مشخصـه مـوج، توزیع لگ نرمال مطابق رابطه (۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$f_{T_z|H_s}(t_z|h_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma_{ln\,T_z}\ t_z}\ exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{ln\,t_z - \mu_{ln\,T_z}}{\sigma_{ln\,T_z}}\right)^2\right\} \qquad (۴)$$

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]

در رابطه فوق، عبارات $\mu_{ln\,T_z}$ و $\sigma_{ln\,T_z}$ به ترتیب مبین میانگین و انحراف از معیار مقادیر متغیر تصادفی هستند. مقادیر $\mu_{ln\,T_z}$ و $\sigma_{ln\,T_z}$، به‌ازای ارتفاع مشخصه‌های مختلف به صورت جداگانه و با استفاده از مقادیر مندرج در جدول‌های نظیر جدول ۱ مربوط به ارتفاع مشخصه و پریودتقاطع‌صفرباشیب‌مثبت برای جهت‌های هشت‌گانه در گزارش گلن محاسبه و استخراج گردیده است. لازم به ذکر است که در گزارش گلن چنانکه در جدول ۱ دیده می‌شود برای مقادیر مندرج با عنوان ارتفاع مشخصه و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت موج، سقفی تعیین نشده و صرفاً برای مقادیر حدی به محدوده *بیش از* ۴ متر برای ارتفاع مشخصه و معیار *بیش از* ۱۲/۵ ثانیه برای مقادیر پریود اشاره گردیده است. لذا با توجه به‌اینکه به‌منظور محاسبه اعداد مربوط به حداکثر ارتفاع موج با استفاده از رابطه (۱)، در نظر گرفتن اثر مقادیر حدی در محاسبات نیز ضروری است، در تحقیق حاضر به‌منظور محاسبه مقادیر میانگین و انحراف معیار پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت مربوط به ارتفاع‌های مشخصه موج *بیش از* ۴ متر، از روابط تجربی موجود استفاده شده است [۲۴و۲۷]. برای این منظور پارامترهای مندرج در روابط (۵) که در آیین‌نامه‌های معتبر ارائه شده[۲۵] با توجه به مقادیر موجود مندرج در جدول ۱ برای شرایط محیطی خلیج‌فارس استخراج می‌شود و به‌منظور محاسبه مشخصات آماری مربوط به مقادیر پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت در محدوده ارتفاع مشخصه موج بین ۴ متر تا ۱۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\mu_{ln\,T_z} = a_0 + a_1\ (h_s)^{a_2}$$
$$\sigma_{ln\,T_z} = b_0 + b_1\ exp(b_2\ h_s) \quad (۵)$$

در روابط فوق پارامترهای a_i و b_i با استفاده از داده‌های موجود و ملحوظ داشتن محدوده نیم متر برای ارتفاع مشخصه موج و فاصله زمانی یک ثانیه محاسبه شده و به ترتیب زیر به‌دست آمده است.

$$\mu_{ln\,T_z} = 0.8314 + 0.5816\ (h_s)^{0.4852}$$
$$\sigma_{ln\,T_z} = 0.1339 + 0.2618\ exp(-0.4157\ h_s) \quad (۶)$$

۴- توزیع احتمال حداکثر ارتفاع موج

توزیع تجمعی احتمال وقوع حداکثر ارتفاع موج در یک حالت دریای معین که ارتفاع مشخصه موج آن معلوم باشد، از رابطه زیر استخراج می‌شود [۲۶].

$$F_{H_{max}|H_s,\theta}(h_{max}|h_s,\theta) = \left[F_{H|H_s,\theta}(h_{max}|h_s,\theta)\right]^{N_{wave}} \quad (۷)$$

در رابطه فوق N_{wave} عبارت است از تعداد موج‌ها در بازه زمانی مشخص مربوط به محاسبه حداکثر ارتفاع موج و از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$N_{wave} = {}^{\Delta t}/_{T_z} \quad (۸)$$

که در آن Δt مدت زمان تداوم حالت دریاست که برای انجام محاسبات مربوط به حداکثر ارتفاع موج در حالات دریای طوفانی با دوره‌های بازگشت طولانی، این مدت تداوم برابر ۳ ساعت در نظر گرفته می‌شود [۲۵،۲۶و۲۷] . پارامتر T_z مبین پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت است.

جدول ۲- پارامترهای تابع توزیع ویبول سه پارامتری برای جهت‌های مختلف موج در خلیج فارس

پارامتر ویبول	شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی	تمام جهت‌ها
γ_{H_s}	۰	-۰/۱۰۴	-۰/۰۸	-۰/۱۰۵	-۰/۰۹	-۰/۱۵	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۱۰۶
β_{H_s}	۱/۱۸۹	۱/۳۵۲	۱/۳۲۵	۱/۳۲۶	۱/۳۵۲	۱/۴۳۵	۱/۳	۱/۲۱	۱/۲۹۵
α_{H_s}	۰/۶۶۲	۰/۷۱۸	۰/۷۱۸	۰/۹۴۵	۰/۹۳۲	۰/۸۳۲	۰/۸۲۵	۰/۸۳۱	۰/۹۷۵

تابع $F_{H|H_s,\theta}$ بیانگر تابع توزیع تجمعی احتمال ارتفاع امواج منفرد در کوتاه مدت و یا به عبارت دیگر یک حالت دریایی است که ارتفاع مشخصه آن H_s است. اگر چه در برخی موارد برای ساده‌سازی و در جهت محافظه‌کاری با فرض باریک بودن عرض طیف امواج یک حالت دریا از تابع توزیع احتمال رایلی برای این منظور استفاده می‌شود، در زمان‌هایی که دقت بیشتری در بخش انتهایی تابع توزیع نیاز باشد، استانداردها تابع توزیع ویبول را پیشنهاد نموده‌اند. در این بخش از تحقیق و در غیاب هر گونه اطلاعات کامل‌تر، از تابع توزیع ویبول با در نظر گرفتن مفروضات پیشنهاد شده در خصوص منطقه دریای شمال استفاده‌شده که مطابق رابطه(۹) ارائه می‌گردد.

$$F_{H|H_s,\theta}(h|h_s,\theta) = 1 - \exp\left\{-2.26\ (\frac{h}{h_s})^{2.13}\right\} \quad (۹)$$

با توجه به روابط فوق، توزیع احتمال مربوط به حداکثر ارتفاع امواج در یک شرایط طوفان یا به‌عبارت دیگر یک حالت دریایی مشخص که در آن $H_s = H_{s,max}$ باشد از رابطه ذیل استخراج خواهدشد.

$$F_{H_{max}|H_{s,max},\theta}(h_{max}|h_{s,max},\theta) = \exp\left\{-N_{wave}\ \exp\left[-2.26\ (\frac{h_{max}}{h_{s,max}})^{2.13}\right]\right\} \quad (۱۰)$$

۵- استخراج حداکثر ارتفاع موج سالانه - روش اول

به‌منظور ارزیابی حداکثر ارتفاع موج سالانه در یک محل مشخص رابطه (۱۱) مطابق آنچه که در DNV RP – C205 ارائه شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۲۴، ۲۵ و۲۶]

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]

$$\lambda_{H_{max}}(h) = \int_{h_s}\int_{t_z} \upsilon\, P[\{H_{max} > h | T_z = t_z, H_s = h_s\}] \times f_{T_z,H_s}(t_z,h_s).d_{t_z}d_{h_s} \quad (۱۱)$$

در این رابطه $\lambda_{H_{max}}(h)$ عبارتست از فراوانی فراگذشت ارتفاع موج از مقدار h در طول مدت یک سال و $f_{T_z,H_s}(t_z,h_s)$ مبین تابع توزیع احتمال مربوط به ارتفاع مشخصه موج و پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت است. مقدار υ نیز مبین تعداد حالات دریایی سه ساعته در طی یکسال است که به شرح $\upsilon = 365.25 \times 8 = 2922$ محاسبه می‌شود.

رابطه (۱۱) در شرایطی که با استفاده از داده‌های آماری موجود مورد محاسبه قرار بگیرد به صورت ذیل تغییر می‌یابد.

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}}\sum_{t_{z,j}} \upsilon\, P[H_{max} > h | T_z = t_{z,j}, H_s = h_{s,i}]\, \Delta F_{T_z,H_s}(t_z,h_s) \quad (۱۲)$$

با بازنویسی رابطه (۱۲) بر مبنای حاصلضرب تابع توزیع احتمال و تابع توزیع احتمال مشروط پریود

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}}\sum_{t_{z,j}} \upsilon\, P[H_{max} > h | T_z = t_{z,j}, H_s = h_{s,i}].P[t_{z,j} < T_z < t_{z,j+1} | H_s = h_{s,i}].P[H_s = h_{s,i}] \quad (۱۳)$$

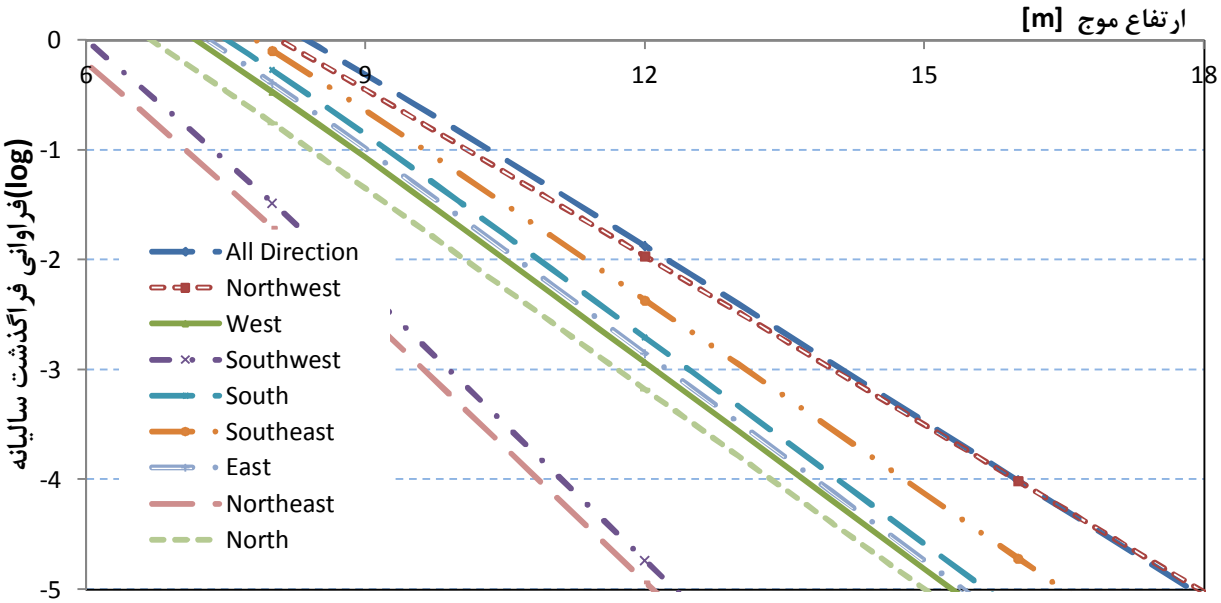
رابطه (۱۳) به‌صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}}\sum_{t_{z,j}} \upsilon\, [1 - F_{H_{max}|T_z,H_s}(h|t_z,h_s)] \times f_{T_z|H_s}(t_z|h_s).f_{H_s}(h_s).\Delta t_z \Delta h_s \quad (۱۴)$$

با جایگذاری روابط (۲) و (۴) در رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}}\sum_{t_{z,j}} \upsilon \left[1 - \exp\{-N_{wave}\exp[-2(\frac{h_{max}}{h_{s,max}})^2]\right].\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\ln T_z}\,t_z}.exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t_z - \mu_{\ln T_z}}{\sigma_{\ln T_z}}\right)^2\right\} \times \frac{\beta_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\left(\frac{h-\gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}-1}.exp\left\{-\left(\frac{h-\gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right\}.\Delta t_z \Delta h_s \quad (۱۵)$$

باتوجه به رابطه فوق، منحنی حداکثر ارتفاع موج سالیانه با احتساب احتمال فراگذشت‌های مختلف، با استفاده از داده‌های ارائه شده در تحقیق حاضر، برای حالات مختلف به شرح شکل۱ استخراج گردیده است. بر اساس منحنی شکل۱ از نقطه نظر احتمالاتی، موجهایی با ارتفاع بسیار زیاد نیز در این منطقه احتمال وقوع دارند گرچه این احتمال بسیار کم است. لیکن به صورت فیزیکی با توجه وقوع پدیده‌هایی از قبیل شکست موج، مشاهده امواج با ارتفاع بسیار زیاد عملاً غیر محتمل است. در هر صورت با توجه به شکل۱ مقادیر مربوط به احتمال فراگذشت یک درصد در هرسال یا به عبارت دیگر حداکثرارتفاع موج برای دوره بازگشت صدساله در جدول۳ ارائه شده است.



شکل ۱- فراوانی فراگذشت سالیانه ارتفاع موج برای جهت‌های مختلف - روش اول

جدول ۳- ارتفاع موج با احتمال فراگذشت یک درصد در هر سال برای جهت‌های مختلف- روش اول

جهت		شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی	تمام جهت‌ها
حداکثر ارتفاع موج سالیانه	Hmax (m)	۱۰/۰۶	۸/۳۸	۱۰/۶۴	۱۱/۳۸	۱۰/۸۶	۸/۶۵	۱۰/۵	۱۲/۰۶	۱۲/۲۴

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]

۶- استخراج حداکثر ارتفاع موج سالانه - روش دوم

استخراج حداکثر ارتفاع موج در این روش، بر اساس محاسبه تابع توزیع تجمعی مربوط به احتمال وقوع بیشترین ارتفاع‌های موج در یک طوفان مشخص که بر پایه مقادیر مربوط به بیشترین ارتفاع‌های مشخصه موج در طول یک سال انتخاب می‌شود، صورت می‌پذیرد. به عبارتی در اولین قدم مقدار ارتفاع مشخصه موج حداکثر سالیانه مطابق آنچه که در مرجع[۲۶] ارائه شده، از رابطه (۱۶) استخراج می‌شود.

$$F_{H_{s,max}|\theta}(h_{s,max}|\theta) = \left[F_{H|\theta}(h_{s,max}|\theta)\right]^{N_{storm|\theta}} \quad (۱۶)$$

در رابطه فوق، $N_{storm|\theta}$ عبارت است از تعداد طوفان‌های با مدت تداوم مشخص (به طور مثال ۳ ساعته) در یک سال و در یک جهت مشخص. در گام بعدی مقدار حداکثر ارتفاع موج در طوفان مشخصی که دارای ارتفاع مشخصه موج گام قبل است با استفاده از رابطه (۱۷) استخراج می‌شود.

$$F_{H_{max}|H_s,\theta}(h_{max}|h_s,\theta) = \left[F_{H|H_s,\theta}(h_{max}|h_s,\theta)\right]^{N_{wave}} \quad (۱۷)$$

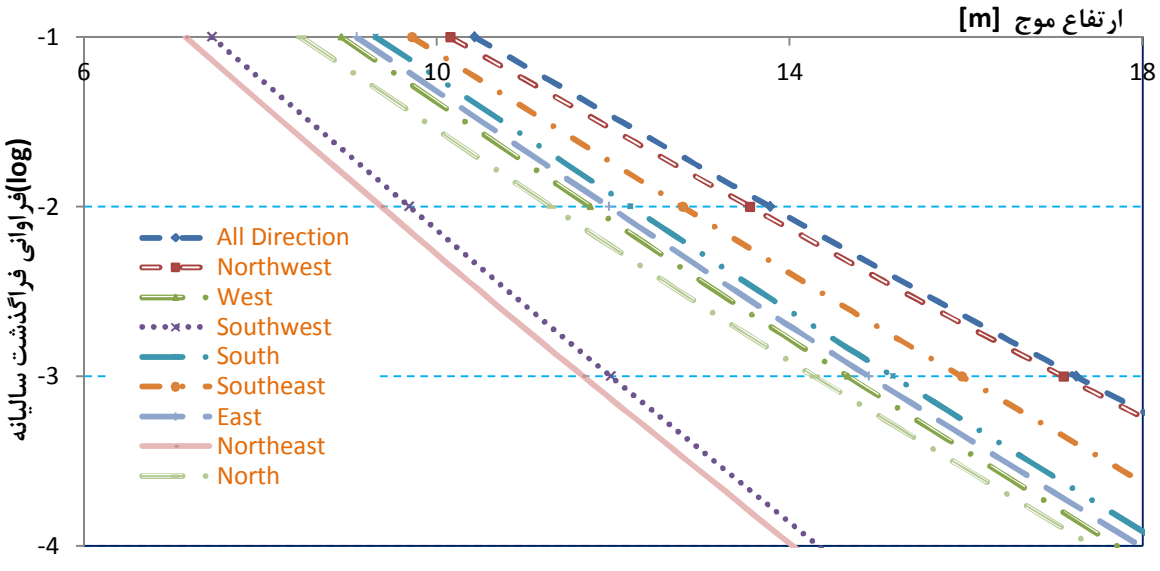
در رابطه فوق، N_{wave} عبارت است از تعداد موج‌ها در مدت تداوم طوفان مربوط به حالت دریایی در نظر گرفته شده برای محاسبه حداکثر ارتفاع موج که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

برای استفاده از رابطه (۸) مقدار T_z باید برابر $T_z|h_{s,max}$ ، که بر اساس داده‌های آماری به دست می‌آید، در نظر گرفته شود. در این روش بر اساس آنچه که پیشتر و طی روابط (۳) و (۱۰) ارائه شد، با کاربرد مستقیم روابط (۱۶) و (۱۷) که در آن $H_s = H_{s,max}$ قرار داده می‌شود و همچنین دانستن پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت به ازای ارتفاع مشخصه‌های مختلف مربوط به شرایط خلیج فارس پارامتر $T_z|h_{s,max}$ و به واسطه آن حداکثر ارتفاع موج محاسبه خواهد شد.

در این روش پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت T_z را می‌توان از طیف پیرسون موسکویچ استاندارد و یا با استفاده از طیف جان‌سوآپ سازگار با شرایط خلیج فارس استخراج نمود. در طیف پیرسون موسکوویچ استاندارد روابط زیر بر قرار است.

$$T_p = {}^{T_z}/_{0.77}$$
$$T_z = {}^{T_s}/_{1.14} \quad (۱۸)$$

پریود طیفی حداکثر (T_p) در طیف جان‌سوآپ ارائه شده برای شرایط خلیج فارس، در محدوده $3.2 \times H_s^{0.5}$ تا $12.5 \times H_s^{0.5}$ واقع شده است [۱۱] و لذا پارامتر $T_z|h_{s,max}$ و به‌واسطه آن حداکثر ارتفاع موج نیز به‌ازای کران بالا و پایین ارائه شده محاسبه و گزارش خواهد شد.



شکل ۲- فراوانی فراگذشت سالیانه ارتفاع موج برای جهت‌های مختلف - روش دوم

جدول۴- ارتفاع موج با احتمال فراگذشت یک درصد در هر سال برای جهت‌های مختلف با توجه به طیف پیرسون موسکویچ – روش دوم

جهت	شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی	تمام جهت‌ها
حداکثر ارتفاع موج سالیانه (m) Hmax	۱۱/۳	۹/۳۷	۱۱/۹۵	۱۲/۷۸	۱۲/۲	۹/۶۹	۱۱/۷	۱۳/۵۵	۱۳/۷۸

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]

پس از محاسبه مقدار $h_{s,max}$ از رابطه (۱۶)، مقدار $T_z|h_{s,max}$ با استفاده از طیف پیرسون موسکویچ و روابط فوق برای منطقه پارس جنوبی محاسبه خواهد شد. با محاسبه این پارامتر، حداکثر ارتفاع موج به راحتی از رابطه (۱۷) میسر خواهد شد. باتوجه به روابط فوق، نمودار مربوط به حداکثر ارتفاع موج سالیانه با احتساب احتمال فراگذشت‌های مختلف، برای حالات مختلف به شرح شکل۲ محاسبه گردیده‌است. مقادیر مربوط به حداکثر ارتفاع موج سالیانه با استفاده از این روش، به ترتیب جدول۴ به دست‌آمده‌است. چنان که ذکر شد در این روش می‌توان در محاسبات مربوط به پریود تقاطع‌صفرباشیب‌مثبت T_z، از طیف جان‌سوآپ سازگار با شرایط خلیج فارس استفاده نمود. لذا با در نظر گرفتن کرانه‌های بالا و پایین برای T_p، پارامتر $T_z|h_{s,max}$ و به‌واسطه آن حداکثر ارتفاع موج نیز دارای کران بالا و پایین خواهد بود. مقادیر مربوط به حداکثر ارتفاع موج سالیانه با استفاده از این روش به شرح جدول۵ به‌دست آمده است. مقایسه جدول‌های۴ و ۵ نشان دهنده تطابق نسبتاً مناسب بین ارقام است. به منظور فراهم شدن امکان مقایسه اعداد حاصل از محاسبات به روش‌های فوق برای پیش بینی حداکثر ارتفاع موج سالیانه، جدول۶ که مقادیر مذکور را در گزارش گلن نشان می‌دهد، ارائه شده است.

جدول۵- محدوده ارتفاع موج با احتمال فراگذشت یک درصد در هر سال برای جهت‌های مختلف با توجه به طیف جان سوآپ اصلاح شده برای خلیج فارس– روش دوم

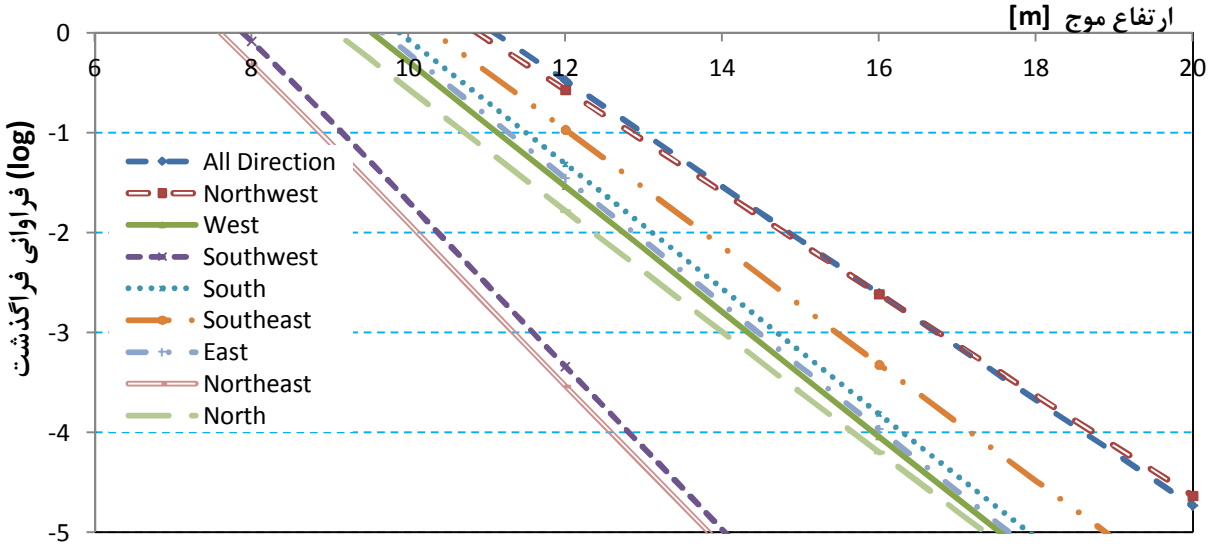
جهت		شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی	تمام جهت‌ها
حداکثر ارتفاع موج سالیانه Hmax (m)	$3/2\times H_s^{0.5}$	۱۰/۸۴	۸/۹۹	۱۱/۴۶	۱۲/۲۶	۱۱/۵۴	۹/۲۹	۱۱/۲۶	۱۲/۹۹	۱۳/۲۱
	$12/5\times H_s^{0.5}$	۱۱/۴۱	۹/۴۷	۱۲/۰۷	۱۲/۹۱	۱۲/۱۷	۹/۷۸	۱۱/۸۶	۱۳/۶۹	۱۳/۹۲

جدول۶- ارتفاع موج ۱۰۰ ساله برای جهت‌های مختلف مندرج در گزارش گلن

جهت	شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی
حداکثر ارتفاع موج سالیانه Hmax (m)	۹/۷	۸/۸	۱۰/۸	۱۱/۶	۱۰/۲	۸/۹	۱۰/۸	۱۲/۲

۷- محاسبه حداکثر ارتفاع موج محتمل در مدت عمر طراحی سازه

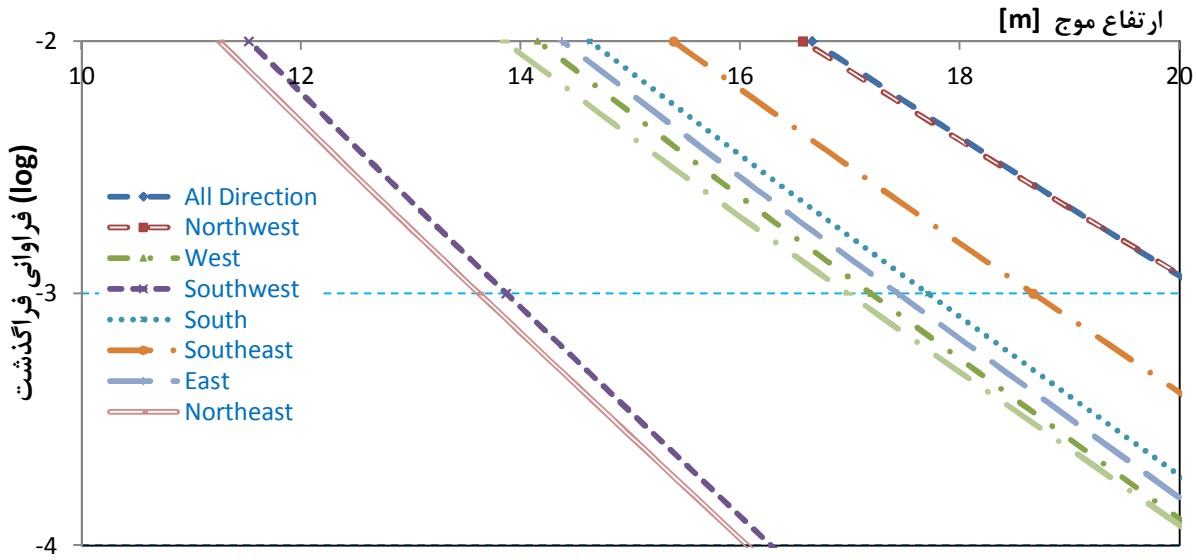
با توجه به اینکه در اکثر طراحی‌های سازه‌های دریایی واقع در منطقه خلیج فارس، عمر طراحی ۲۵ سال در نظر گرفته می‌شود، منظور نمودن طبیعت تصادفی موج در محاسبه حداکثر ارتفاع موجی که در مدت عمر طراحی احتمال حدوث دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور با اعمال تغییرات مورد نیاز در روش اول، یعنی $\upsilon = 25 \times 365.25 \times 8 = 73050$ و در روش دوم با ملحوظ داشتن اثر مربوطه در تعداد طوفان‌ها به صورت $N_{storm|\theta} = 25 \times 1000$، فراوانی فراگذشت ارتفاع موج در مدت ۲۵ سال عمر طراحی سازه محاسبه و در شکل‌های۴ و ۵ ارائه گردیده است. با توجه به این شکل‌ها، مقادیر مربوط به ارتفاع موجی که در مدت عمر طراحی سازه احتمال فراگذشت یک درصد دارد در جدول۷ ارائه شده است.



شکل ۴- فراوانی فراگذشت ارتفاع موج طی عمر مفید سکو برای جهت‌های مختلف - روش اول

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]



شکل ۵- فراوانی فراگذشت ارتفاع موج طی ۲۵ سال عمر سکو برای جهت‌های مختلف - روش دوم

جدول۷- ارتفاع موج با احتمال فراگذشت یک درصد طی ۲۵ سال عمر سکو برای جهت‌های مختلف –روش اول و دوم (بر اساس طیف پیرسون موسکویچ)

		شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی	تمام جهت‌ها
روش اول	حداکثر ارتفاع موج Hmax (m)	۱۲/۳۶	۱۰/۱۱	۱۲/۹	۱۳/۷۶	۱۳/۱۱	۱۰/۳۸	۱۲/۷	۱۴/۸۰	۱۴/۸۷
روش دوم		۱۳/۸۵	۱۱/۲۵	۱۴/۳	۱۵/۳۹	۱۴/۶۳	۱۱/۵۲	۱۴/۱	۱۶/۵۷	۱۶/۵۷

۸- نتایج

۱. مقادیر عددی حاصل از محاسبه ارتفاع موج با دوره بازگشت ۱۰۰ سال مندرج در جدول ۳، مبین تطابقی نسبتاً دقیق با ارقام حداکثر ارتفاع موج مندرج در گزارش گلن (جدول۷) است. به‌این ترتیب، محاسبات انجام شده به روش اول منجر به نتایجی می‌گردد که معمولاً در طراحی سکوهای دریایی در خصوص ارتفاع موج حداکثر در هر منطقه از خلیج‌فارس در نظر گرفته می‌شود.

۲. برخلاف نتیجه حاصل از روش اول، مقادیر محاسبه شده در جدول ۴ مبین اختلاف محسوس با مقادیر مندرج در گزارش گلن است. به‌این ترتیب محاسبات انجام شده به روش دوم موید عدم محافظه‌کارانه بودن مقادیر ارتفاع موج مندرج در گزارش گلن است.

۳. محاسبات انجام شده در خصوص محدوده ارقام به‌دست آمده برای ارتفاع موج حداکثر سالیانه در جهت‌های مختلف نشان می‌دهد تطابق نسبتاً مناسبی بین ارقام قطعی حاصل از جدول۴ که با استفاده طیف پیرسون موسکویچ استاندارد محاسبه شده و نتایج محدوده مندرج در جدول۵ که با استفاده طیف جان‌سوآپ سازگار با خلیج‌فارس به دست آمده، وجود دارد.

۴. علیرغم آنچه که در بند ۱ و ۲ اشاره شد، در نظر گرفتن اثر عمر سکوهای دریایی در محاسبات مربوط به حداکثر ارتفاع موج با احتمال فراگذشت یک درصد، منجر به استخراج اعداد مندرج در جدول۷ می‌شود، که موید اختلاف قابل توجه بین مقادیر ارتفاع موج حداکثر ملحوظ در طراحی‌ها (جدول۶) با مقادیر محتمل در مدت عمر طراحی این دسته از سازه‌ها است.

۵. اگر چه در طراحی سازه‌های جدید، به‌دلیل وجود ضرایب اطمینان در طراحی‌ها، استفاده از ارتفاع موج با احتمال فراگذشت ۰/۰۱ یا دوره بازگشت ۱۰۰ سال ممکن است به سازه‌ای با درجه مطلوب قابلیت اطمینان منجر شود، معذلک در هنگام ارزیابی سازه‌های موجود، زمانی که ظرفیت نهایی با حداکثر بارگذاری محتمل موج مقایسه می‌شود، ضروری است امواجی بزرگتر که با توجه به عمر طراحی سازه احتمال فراگذشت معینی را دارند، در نظر گرفته شود. شکل‌های۴ و ۵ و اعداد جدول۷ می‌توانند برای این هدف مورد استفاده قرار گیرند.

کلید واژگان

1. Sea State
2. Wave Hindcast
3. Nataf Model
4. Zero up crossing period

۹- مراجع و منابع

1. Ports & Maritime Organization, (2008), Iranian Seas Wave Modeling Vol 2: Persian Gulf & Oman Seas,
2. Coastal Engineering Research Center, (1984), SHORE PROTECTION MANUAL, 4th ed., 2vols, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Government Printing Office, Washington, DC.
3. Goda, Y., (1997), *Random wave concept as the tool of engineering practice*, 2nd Indian National Conference on Harbour and Ocean Engineering, Thiruvananthapuram, India, vol. 1, p. 1–12.

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]

4. Hogben, N and Lumb, F E., (1967), *Ocean Wave Statistics*, Ministry of Technology National Physical Laboratory, London.
5. Cross, C.G., (1980), *Ocean wave statistics for San Francisco*, Shore Beach 48, p. 26–29.
6. Goldsmith, V. & Sofer, S., (1983), *Wave climatology of the southeastern Mediterranean: an integrated approach*, Journal of Earth Science 32, p. 1–51.
7. Laing, A.K., (1985), *An assessment of wave observations from ships in southern oceans*, Journal of Climate and Applied Meteorology 24, p. 481–494.
8. Soares, C.G., 1986, *Assessment of the uncertainty in visual observations of wave height*, Ocean Engineering 13, p. 37–56.
9. Glenn Report, (1993), *Report on Meteo-Oceanographic conditions affecting design and operation*, South-Pars phase 1 offshore complex.
10. Alves, J.H.G.M. and Young, I.R., (2004), *On estimating extreme wave heights using combined Geosat*, Topex/Poseidon and ERS1 altimeter data. Applied Ocean Research 25 (4), p. 167–186.
11. Mazaheri, S. and Ghaderi, Z., (2011), *Shallow Water Wave Characteristics in Persian Gulf*, Journal of Coastal Research, SI 64, p. 572-575.
12. Næss, A., (1985), *The joint crossing frequency of stochastic processes and its application to wave theory*, Journal of Applied Ocean Research, Vol. 7, No. 1.
13. Forristal, G.Z. (1978), *On the statistical distribution of wave heights in a storm*, J. Geophysical Res., 83, p. 2353-2358.
14. Bitner-Gregersen and Ø. Hagen, (1999), *Extreme value analysis of wave steepness and crest using joint environmental description*, Proc. of OMAE 99 Conference, No. 6033.
15. Putz, R.R.,1952 Statistical distribution for ocean waves, Trans., AGU., 33, 685-692.
16. Bretschneider, C.L., 1959 Wave variability and wave spectra for wind generated gravity waves, Tech. Rep., U S Army Beach Erosion Board. No.118.
17. Baba, M. and Harish, C.M., (1985), *Wave height and period distribution off the southwest coast of India*, Ind. J. Mar. Sci., 14, p. 1-8.
18. Muraleedharan, G., Unnikrishnan Nair, N. and Kurup,P.G., (1999), *Application of Weibull model for redefined significant wave height distributions*, Proc. Indian Acad. Sci.(Earth Planet. Sci.), 108(3), p.149-153.
19. Longuet-Higgins, M.S., (1980), *On the Distribution of Heights of Sea Waves: Some Effects of Non-linearities and Finite Band Width*, Journal of Geophysical Research, Vol. 85, No. C3, p. 1519-1523.
20. Krogstad, H., (1985), *Height and Period Distributions of Extreme Waves*, Applied Ocean Research, 1985; Vol.7, No 3., pp 158-165.
21. Haver, S., (1987), *On the distribution of heights and periods of sea waves*; Ocean Engng. Vol. 14, No. 5, p. 359-376.
22. Bitner-Gregersen, E. (1988), Appendix *Joint Long Term Distribution of Hs, Tp*, DNV Report No. 87-31, "Probabilistic Calculation of Design Criteria for Ultimate Tether Capacity of Snorre TLP" by Madsen, H. O., Rooney, P.,& Bitner-Gregersen, E. Høvik.
23. Bitner-Gregersen, E.M. (2005), *Joint Probabilistic Description for Combined Seas*, Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2005), June 12-17, 2005, Halkidiki, Greece OMAE 2005-67382.
24. Golafshani A.A., Bagheri, and Ebrahimian, H., (2010), *South Pars Phase 1 - SPD2 Platform Probabilistic and Reliability Assessment for Extreme Wave Loading*, Sharif University of Technology, Scientific Research Prepared for NIOC.
25. Recommended Practice DNV-RP-C205, *Environmental Conditions and Environmental Loads*, Oct 2010.
26. Singurdsson, G and Cramer, E., *Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis – Examples for Jacket Platforms*, DNV Report 95-3204.
27. Ditlevsen, O., *Stochastic Wave Loads on Tubular Offshore Structures*, Technical University of Denmark, 25th April 2003.

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.2.6]