

## یادداشت فنی

## محاسبه حداکثر ارتفاع موج محتمل طی عمر طراحی سکوهای دریایی واقع در خلیج فارس

علی‌رضا فیاضی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر آقاچوک<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a.fayazi@modares.ac.ir  
<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a\_gha@modares.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

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 خلیج فارس پیشنهاد می‌کند. در روش اول از یک تابع توزیع احتمال مشترک دراز مدت وابسته به ارتفاع و پریرود موج و در روش دوم از یک تابع توزیع احتمال مشترک بر حسب یک تابع احتمالاتی و مجموعه‌ای از توابع احتمال شرطی، بهره‌گیری 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.

ناریخچه 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

پریرود تقاطع صفر با شیب مثبت

عمر طراحی

خلیج فارس

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

Ali Reza Fayyazi<sup>1\*</sup>, Ali Akbar Aghakouchak<sup>2</sup><sup>1</sup> PhD student, Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University; a.fayazi@modares.ac.ir<sup>2</sup> Professor, Civil and Environmental Faculty Tarbiat Modares University; a\_gha@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.

حالت دریا<sup>۱</sup>، 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

## 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

صورت ساده شده با استفاده از ارتفاع مشخصه‌ای نظیر  $H_{1/10}$  یا  $H_{1/3}$  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 تجهیزات نظیر گوی شناور و یا به صورت 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<sup>۲</sup> 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، ۶ و ۷]. در خلیج فارس 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 جان‌سواپ 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 پیروید 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 پیروید موج پرداخته‌اند. در تشریح رفتار احتمالاتی حداکثر ارتفاع موج، در سال ۱۹۸۵ مدل توزیع احتمالاتی ریلی ارائه شد [۱۲]. در سال ۱۹۷۸ تابع توزیع فوریتال 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<sup>۳</sup> جهت استخراج مقادیر حداکثر ارتفاع موج ارائه شد [۱۴].

در سال ۱۹۵۲ تابع توزیع گاما به‌منظور تشریح رفتار احتمالاتی پیروید موج ارائه شد [۱۵]. در سال ۱۹۵۹ نیز مدل برش‌نایدر و در سال ۱۹۸۵ مدل ریلی برای این منظور پیشنهاد شد [۱۶ و ۱۷]. 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 پیرویدهای موج در سواحل جنوبی هند دارد [۱۸]. برخی از محققین تابع توزیع احتمالاتی کوتاه مدتی را برای پیروید تقاطع صفرباشیب مثبت<sup>۴</sup> ارائه داده‌اند که در آن احتمال وقوع پیروید متوسط موج به شرط وقوع ارتفاع مشخصه موج بر اساس تابع توزیع نرمال بیان می‌شود [۱۹، ۲۰ و ۲۱]. برخی از محققین نیز پیشنهاد نموده‌اند که برای پیروید تقاطع صفرباشیب مثبت، 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 پیروید تقاطع صفرباشیب مثبت 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 خلیج فارس (با عمق بیش از ۶۰ متر و با مختصات تقریبی  $26^{\circ}46'20''N$  و  $52^{\circ}05'59''E$ ) 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

### ۳- مدل احتمالاتی دراز مدت موج

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

$$f_{H_s T_z}(h_s, t_z) = f_{T_z|H_s}(t_z|h_s) \cdot f_{H_s}(h_s) \quad (1)$$

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 تقاطع صفرباشیب مثبت به شرط وقوع ارتفاع مشخصه موج.

استخراج خواهد شد. به این منظور اطلاعات آماری مربوط به توزیع مشترک ارتفاع مشخصه موج و پریود تقاطع صفرباشیب مثبت مربوط به آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و سپس حداکثر ارتفاع موج تخمین زده می‌شود. به منظور 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 تقاطع صفرباشیب مثبت 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 تقاطع صفرباشیب مثبت،  $T_z$ ، بر حسب میزان وقوع در سال برای ترکیب تمامی جهت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول‌هایی مشابه با این جدول، همین اطلاعات برای ۸ جهت اصلی و فرعی جغرافیایی ارائه گردیده است.

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

پریود تقاطع صفرباشیب مثبت										
گروه‌بندی ارتفاع‌های مشخصه موج (متر)										
ثابته	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

پارامترهای این تابع با توجه به داده‌های موجود به روش MLE قابل محاسبه است. در تحقیق حاضر برای منطقه مورد نظر در

خلیج فارس، از داده‌های مندرج در گزارش گلن و جدول‌های مشابه جدول ۱ مربوط به تمامی جهت‌ها استفاده شده و پارامترهای تابع ویبول برای هشت جهت به شرح جدول ۲ استخراج گردیده‌اند. به منظور تعیین و محاسبه توزیع احتمال مشروط پریود تقاطع صفرباشیب مثبت موج به شرط وقوع ارتفاع مشخصه موج، توزیع لگ نرمال مطابق رابطه (۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$f_{T_z|H_s}(t_z|h_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln T_z} t_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t_z - \mu_{\ln T_z}}{\sigma_{\ln T_z}}\right)^2\right\} \quad (4)$$

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 و ۲۶].

$$f_{H_s}(h) = \frac{\beta_{H_s}}{\alpha_{H_s}} \left(\frac{h - \gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}-1} \exp\left\{-\left(\frac{h - \gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right\} \quad (2)$$

در عبارت فوق  $\alpha_{H_s}$ ، پارامتر مقیاس،  $\beta_{H_s}$  پارامتر شکل و  $\gamma_{H_s}$  موسوم به پارامتر موقعیت است. با توجه به تابع چگالی احتمال فوق، تابع توزیع تجمعی ویبول به صورت کلی زیر می‌باشد.

$$F_{H_s}(h) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{h - \gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu_{ln T_z} &= a_0 + a_1 (h_s)^{a_2} \\ \sigma_{ln T_z} &= b_0 + b_1 \exp(b_2 h_s) \end{aligned} \quad (5)$$

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 به دست آمده است.

$$\begin{aligned} \mu_{ln T_z} &= 0.8314 + 0.5816 (h_s)^{0.4852} \\ \sigma_{ln T_z} &= 0.1339 + 0.2618 \exp(-0.4157 h_s) \end{aligned} \quad (6)$$

#### 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].

$$F_{H_{max}|H_s, \theta}(h_{max}|h_s, \theta) = [F_{H|H_s, \theta}(h_{max}|h_s, \theta)]^{N_{wave}} \quad (7)$$

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.

$$N_{wave} = \Delta t / T_z \quad (8)$$

که در آن  $\Delta t$  مدت زمان تداوم حالت دریاست که برای انجام محاسبات مربوط به حداکثر ارتفاع موج در حالات دریای طوفانی با

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 پیروی تقاطع صفرباشیب مثبت 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 پیروی تقاطع صفرباشیب مثبت 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 پیروی اشاره گردیده است. لذا با توجه به اینکه به منظور 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 به منظور محاسبه مقادیر میانگین و انحراف معیار پیروی تقاطع صفرباشیب مثبت مربوط به ارتفاع‌های مشخصه موج بیش از ۴ متر، از روابط تجربی موجود استفاده شده است [۲۴ و ۲۷]. 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 خلیج فارس استخراج می‌شود و به منظور محاسبه مشخصات آماری مربوط به مقادیر پیروی تقاطع صفرباشیب مثبت در محدوده ارتفاع مشخصه موج بین ۴ متر تا ۱۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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
$\gamma_{H_s}$	۰	-۰/۱۰۴	-۰/۰۸	-۰/۱۰۵	-۰/۰۹	-۰/۱۵	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۱۰۶
$\beta_{H_s}$	۱/۱۸۹	۱/۳۵۲	۱/۳۲۵	۱/۳۲۶	۱/۳۵۲	۱/۴۳۵	۱/۳	۱/۲۱	۱/۲۹۵
$\alpha_{H_s}$	۰/۶۶۲	۰/۷۱۸	۰/۷۱۸	۰/۹۴۵	۰/۹۳۲	۰/۸۳۲	۰/۸۲۵	۰/۸۳۱	۰/۹۷۵

$$F_{H|H_s, \theta}(h|h_s, \theta) = 1 - \exp\left\{-2.26 \left(\frac{h}{h_s}\right)^{2.13}\right\} \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} F_{H_{max}|H_{s, max}, \theta}(h_{max}|h_{s, max}, \theta) \\ = \exp\left\{-N_{wave} \exp\left[-2.26 \left(\frac{h_{max}}{h_{s, max}}\right)^{2.13}\right]\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

#### ۵- استخراج حداکثر ارتفاع موج سالانه - روش اول

به منظور 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 و ۲۶]

دوره‌های بازگشت طولانی، این مدت تداوم برابر ۳ ساعت در نظر گرفته می‌شود [۲۶، ۲۵ و ۲۷]. پارامتر  $T_z$  مبین پیروی تقاطع صفرباشیب مثبت است.

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 استفاده شده که مطابق رابطه (۹) ارائه می‌گردد.

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}} \sum_{t_{z,j}} v [1 - F_{H_{max}|T_z, H_s}(h|t_z, h_s)] \times f_{T_z, H_s}(t_z|h_s) \cdot f_{H_s}(h_s) \cdot \Delta t_z \Delta h_s \quad (14)$$

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

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}} \sum_{t_{z,j}} v \left[ 1 - \exp\{-N_{wave} \exp[-2 \left(\frac{h_{max}}{h_{s,max}}\right)^2] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln T_z} t_z} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t_z - \mu_{\ln T_z}}{\sigma_{\ln T_z}}\right)^2\right\}}\right] \times \frac{\beta_{H_s}}{\alpha_{H_s}} \left(\frac{h - \gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}-1} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{h - \gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right\} \cdot \Delta t_z \Delta h_s \quad (15)$$

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 شکل ۱ استخراج گردیده است. بر اساس منحنی شکل ۱ 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 شکل ۱ مقادیر مربوط به احتمال فراگذشت یک درصد در هر سال یا به عبارت دیگر حداکثر ارتفاع موج برای دوره بازگشت صدساله در جدول ۳ ارائه شده است.

$$\lambda_{H_{max}}(h) = \int_{h_s} \int_{t_z} v P[\{H_{max} > h | T_z = t_z, H_s = h_s\}] \times f_{T_z, H_s}(t_z, h_s) \cdot d t_z d h_s \quad (11)$$

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 پرپود تقاطع صفرباشیب مثبت است. مقدار  $v$  نیز مبین تعداد حالات دریایی سه ساعته در طی یکسال است که به شرح  $v = 2922 = 365.25 \times 8$  محاسبه می‌شود.

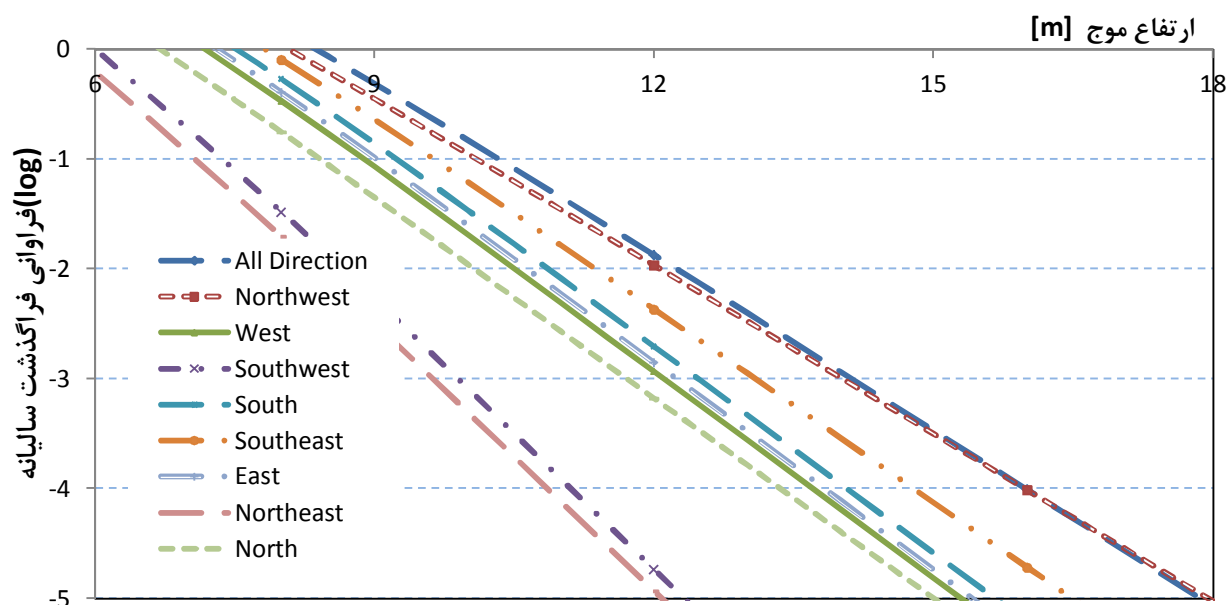
رابطه (۱۱) در شرایطی که با استفاده از داده‌های آماری موجود مورد محاسبه قرار بگیرد به صورت ذیل تغییر می‌یابد.

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}} \sum_{t_{z,j}} v P[H_{max} > h | T_z = t_{z,j}, H_s = h_{s,i}] \Delta F_{T_z, H_s}(t_z, h_s) \quad (12)$$

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

$$\lambda_{H_{max}}(h) \cong \sum_{h_{s,i}} \sum_{t_{z,j}} v P[H_{max} > h | T_z = t_{z,j}, H_s = h_{s,i}] \cdot P[t_{z,j} < T_z < t_{z,j+1} | H_s = h_{s,i}] \cdot P[H_s = h_{s,i}] \quad (13)$$

رابطه (۱۳) به صورت زیر قابل بازنویسی 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

## 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.

$$F_{H_{s,max}|\theta}(h_{s,max}|\theta) = [F_{H|\theta}(h_{s,max}|\theta)]^{N_{storm}|\theta} \quad (16)$$

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.

$$F_{H_{max}|H_s,\theta}(h_{max}|h_s,\theta) = [F_{H|H_s,\theta}(h_{max}|h_s,\theta)]^{N_{wave}} \quad (17)$$

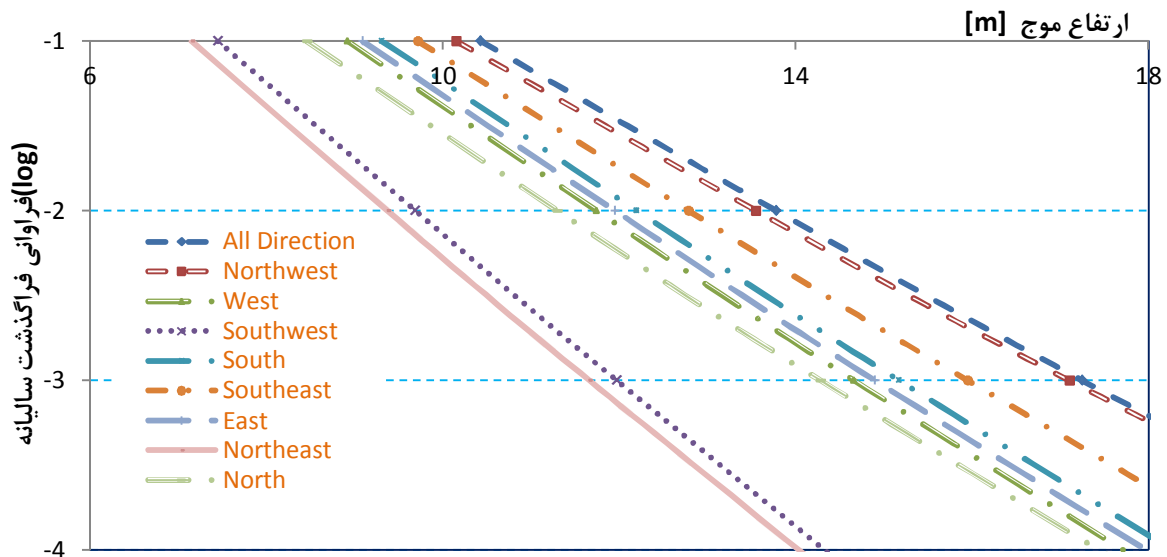
در رابطه فوق،  $N_{wave}$  عبارت است از تعداد موج‌ها در مدت تداوم طوفان مربوط به حالت دریایی در نظر گرفته شده برای محاسبه حداکثر ارتفاع موج که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

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 پیروی تقاطع صفرباشیب‌مثبت 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 پیروی تقاطع صفرباشیب‌مثبت  $T_Z$  را می‌توان از طیف پیرسون موسکوویچ استاندارد و یا با استفاده از طیف جان‌سوآپ سازگار با شرایط خلیج فارس استخراج نمود. در طیف پیرسون موسکوویچ استاندارد روابط زیر برقرار است.

$$\begin{aligned} T_p &= T_Z/0.77 \\ T_Z &= T_s/1.14 \end{aligned} \quad (18)$$

پیروی 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 به واسطه 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

جدول ۴- ارتفاع موج با احتمال فراگذشت یک درصد در هر سال برای جهت‌های مختلف با توجه به طیف پیرسون موسکوویچ - روش دوم

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

خلیج فارس استفاده نمود. لذا با در نظر گرفتن کرانه‌های بالا و پایین برای  $T_p$ ، پارامتر  $T_Z|h_{s,max}$  و به واسطه 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 جدول ۵ به دست آمده است. مقایسه جدول‌های ۴ 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، جدول ۶ که مقادیر مذکور را در گزارش گلن نشان می‌دهد، ارائه شده است.

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 شکل ۲ محاسبه گردیده است. مقادیر مربوط به حداکثر ارتفاع موج سالیانه با استفاده از این روش، به ترتیب جدول ۴ به دست آمده است. چنان که ذکر شد در این روش می‌توان در محاسبات مربوط به پریرود تقاطع صفرباشیب مثبت  $T_Z$ ، از طیف جان سوآپ سازگار با شرایط

جدول ۵- 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	۱۰/۸۴	۸/۹۹	۱۱/۴۶	۱۲/۲۶	۱۱/۵۴	۹/۲۹	۱۱/۲۶	۱۲/۹۹	۱۳/۲۱
Hmax (m) سالیانه	۱۲/۵ × H <sub>s</sub> <sup>0.5</sup>	۹/۴۷	۱۲/۰۷	۱۲/۹۱	۱۲/۱۷	۹/۷۸	۱۱/۸۶	۱۳/۶۹	۱۳/۹۲

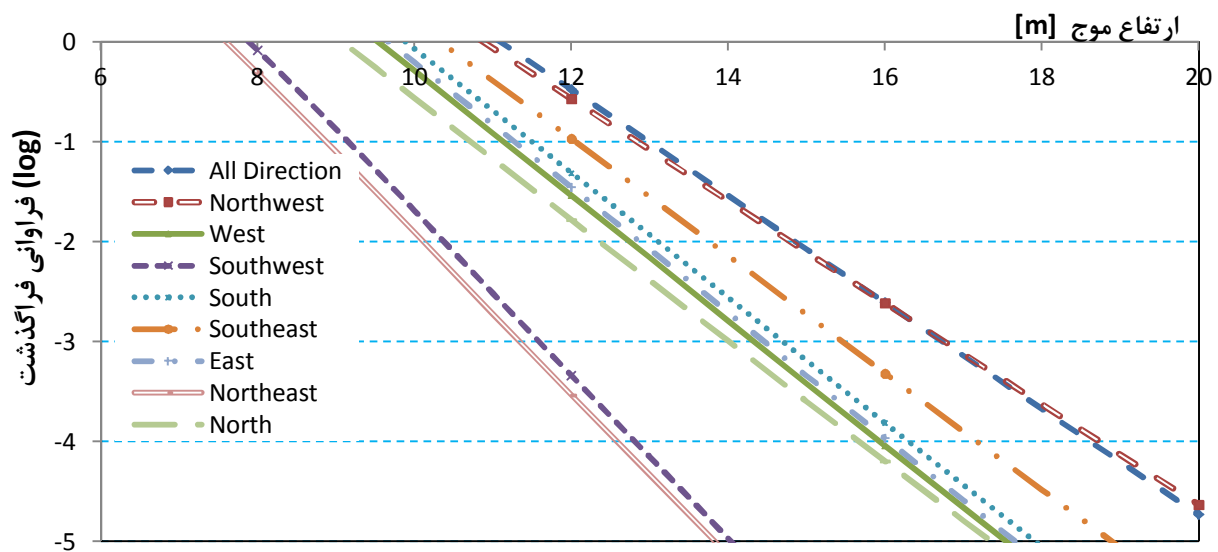
جدول ۶- ارتفاع موج ۱۰۰ ساله برای جهت‌های مختلف مندرج در گزارش گلن

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

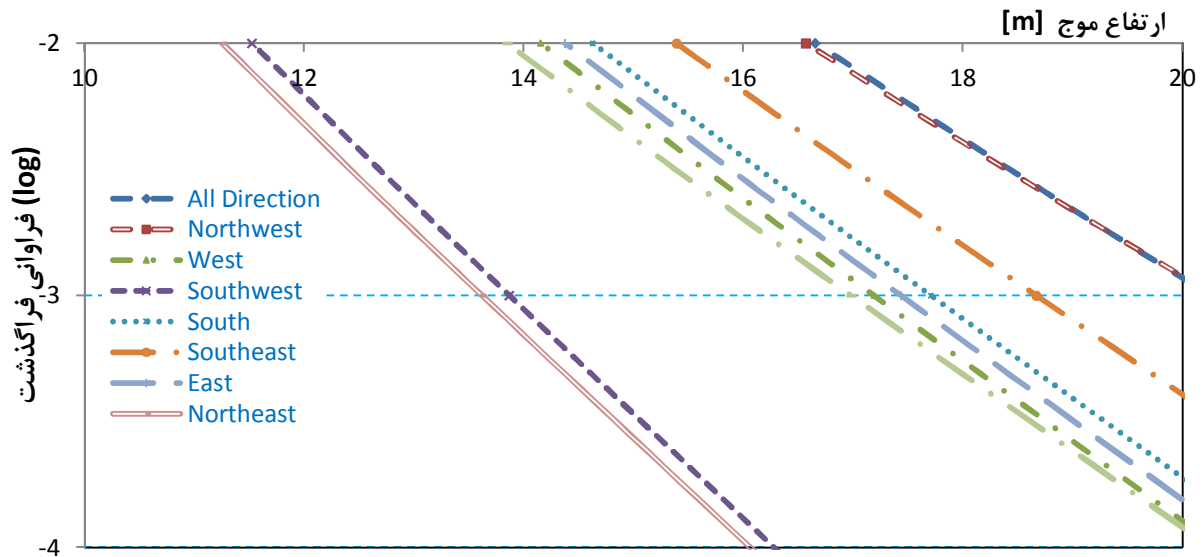
در روش اول، یعنی  $73050 = 25 \times 365.25 \times 8 = v$  و در روش دوم با ملحوظ داشتن اثر مربوطه در تعداد طوفان‌ها به صورت  $N_{storm}|\theta = 25 \times 1000$ ، فراوانی فراگذشت ارتفاع موج در مدت ۲۵ سال عمر طراحی سازه محاسبه و در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه گردیده است. با توجه به این شکل‌ها، مقادیر مربوط به ارتفاع موجی که در مدت عمر طراحی سازه احتمال فراگذشت یک درصد دارد در جدول ۷ ارائه شده است.

#### 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



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



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

جدول ۷- 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	روش دوم
۱۲/۳۶	۱۰/۱۱	۱۲/۹	۱۳/۷۶	۱۳/۱۱	۱۰/۳۸	۱۲/۷	۱۴/۸۰	۱۴/۸۷	حداکثر ارتفاع موج	
۱۳/۸۵	۱۱/۲۵	۱۴/۳	۱۵/۳۹	۱۴/۶۳	۱۱/۵۲	۱۴/۱	۱۶/۵۷	۱۶/۵۷	Hmax (m)	

## 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 (جدول ۷) است. به این 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 خلیج فارس 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. به این ترتیب محاسبات انجام شده به روش دوم موید عدم محافظه کارانه بودن مقادیر ارتفاع موج مندرج در گزارش گلن است.

۳. محاسبات انجام شده در خصوص محدوده ارقام به دست آمده برای ارتفاع موج حداکثر سالیانه در جهت‌های مختلف نشان می‌دهد تطابق نسبتاً مناسبی بین ارقام قطعی حاصل از جدول ۴ که با استفاده طیف پیرسون موسکویچ استاندارد محاسبه شده و نتایج محدوده مندرج در جدول ۵ که با استفاده طیف جان سوآپ سازگار با خلیج فارس 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 جدول ۷ می‌شود، که موید اختلاف قابل توجه بین مقادیر ارتفاع موج حداکثر ملحوظ در طراحی‌ها (جدول ۶) با مقادیر محتمل در مدت عمر طراحی این دسته از سازه‌ها است.

۵. اگر چه در طراحی سازه‌های جدید، به دلیل 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، معذک 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. شکل‌های ۴ و ۵ و اعداد جدول ۷ 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*, 2<sup>nd</sup> Indian National Conference on Harbour and Ocean Engineering, Thiruvananthapuram, India, vol. 1, p. 1-12.



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, 25<sup>th</sup> April 2003.
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 Meteorological-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.