

کاربرد تئوری قابلیت اطمینان جهت بررسی پایداری و تحلیل حساسیت لایه آرمور محافظ موج شکن توده سنگی

مجتبی کریمائی طبرستانی

Karimaei@sru.ac.ir

استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

چکیده

مسئله شکست و خسارت وارده بر لایه آرمور موج شکن های توده سنگی بسیار پیچیده بوده و موارد عدم قطعیت زیادی در برآورد پارامترهای موثر در طراحی اندازه آرمور وجود دارند. در تحقیق حاضر اقدام به بررسی پایداری لایه آرمور موج شکن توده سنگی با استفاده از دو روش تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه اول و روش شبیه سازی مونت کارلو می گردد. همچنین از اطلاعات موج شکن های بندر نوشهر نیز به عنوان مطالعه موردی استفاده می شود. نتایج نشان داد که با توجه به موارد عدم قطعیت های موجود در پارامترهای موثر، لایه آرمور پیش بینی شده در محل مطالعه موردی بر اساس روش قطعی پایداری مناسبی ندارد. در ادامه بررسی ارتباط مابین ضریب ایمنی در طراحی کلاسیک قطعی و شاخص قابلیت اطمینان نشان داد که یک ارتباط خطی مستقیم مابین این دو پارامتر برقرار است. بر اساس این ارتباط مشخص شد که با توجه به عدم قطعیت های زیاد پارامترهای موثر، مقدار ضریب ایمنی متناظر با شاخص قابلیت اطمینان هدف ۳ برابر با ۳/۶ است. در ادامه تحلیل حساسیت پارامترهای موثر نشان داد که مهمترین پارامتر در قابلیت اطمینان لایه آرمور، ارتفاع موج شاخص می باشد که نیازمند تمهیدات ویژه برای برآورد دقیق آن لازم است. در نهایت اثر میزان عدم قطعیت پارامترهای موثر بر روی قابلیت اطمینان لایه آرمور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر چه میزان عدم قطعیت پارامترها بیشتر باشد، قابلیت اطمینان لایه آرمور کاهش می یابد به طوریکه با افزایش میزان ضریب تغییرات پارامتر ارتفاع موج شاخص از مقدار ۰/۵ تا ۰/۵، شاخص قابلیت اطمینان به میزان حدوداً ۷۰ درصد کاهش می یابد.

واژگان کلیدی: موج شکن، لایه آرمور، قابلیت اطمینان مرتبه اول، شبیه سازی مونت کارلو، شاخص قابلیت اطمینان، تحلیل حساسیت.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۱۱/۲۳

۱- مقدمه

طراحی بهینه و اقتصادی سازه‌های دریایی نظیر موج‌شکن یک بخش حیاتی از مهندسی سواحل و سازه‌های دریایی می‌باشد. بیشتر موج‌شکن‌هایی که در دنیا ساخته می‌شود از نوع موج‌شکن‌های توده سنگی هستند [۱] که نیاز به اجرای یک لایه آرمور محافظ جهت مقابله با نیروی امواج بر روی بدنه آن‌ها است. اجرای این لایه پرهزینه است و طراحی ایمن آن که مستقیماً بر ایمنی موج‌شکن تاثیر دارد یک چالش مهندسی محسوب می‌شود. طراحی این لایه معمولاً به صورت قطعی و با استفاده از روابط تجربی انجام می‌شود. در حالیکه عدم قطعیت‌های زیادی در برآورد پارامترهای مختلف موثر بر طراحی آرمور پایدار وجود دارد و نیاز به کاربرد روش‌های جدیدتر نظیر تحلیل قابلیت اطمینان با لحاظ نمودن این عدم قطعیت‌ها وجود دارد. در نتیجه با استفاده از این روش‌ها ضمن در اختیار داشتن برآوردی از میزان اعتماد پذیری سازه موج‌شکن می‌توان انتظار سازه‌ای ایمن‌تر و اقتصادی‌تر را داشت.

اخیراً استفاده از روش‌های تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان با توجه به قابلیت بالای آن‌ها در بهینه نمودن طرح‌های مهندسی و بالابردن توان مدیریتی پروژه‌ها مورد توجه ویژه جامعه علمی و مهندسی قرار گرفته است. شکست در سازه‌های هیدرولیکی و دریایی از جمله خرابی پل‌ها، بندهای انحرافی در مسیر جریان رودخانه و یا موج‌شکن‌ها در پهنه‌های دریایی نتیجه تأثیرات متقابل اتفاقی بودن بار خارجی و عدم قطعیت‌های مختلف در تحلیل، طراحی، ساخت و بکارگیری سازه است. تحلیل‌های قابلیت اطمینان یک چهارچوب منظم و سازمان‌دهی شده را برای کمی کردن عدم قطعیت‌های مدل فراهم می‌کند. علاوه بر این، به طراح اجازه می‌دهد تا نقش هر کدام از پارامترهای ورودی مسئله را در عدم قطعیت خروجی مدل مشخص کند. این آگاهی برای تشخیص پارامترهای مهم به منظور توجه بیشتر به آن‌ها برای دستیابی دقیق‌تر به اندازه و تأثیر آن‌ها و در نهایت کاهش عدم قطعیت‌های خروجی بسیار مهم است. مدت‌هاست استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان و دیگر روش‌های احتمالاتی در تحلیل مسائل مختلف علم هیدرولیک مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه تلاش‌های محدودی

برای تحلیل قابلیت اطمینان پایداری سازه موج‌شکن انجام شده است. مول و همکاران (۱۹۸۴) ضمن اشاره به عدم دقت روش‌های قطعی سنتی، نتیجه گرفتند که بکارگیری تحلیل قابلیت اطمینان در طراحی موج‌شکن‌ها به عنوان یک نیاز در مهندسی سواحل مطرح می‌باشد [۲]. هانزاوا و همکاران (۱۹۹۶) یک روش طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MC) جهت تعیین سطح شکست مورد انتظار برای بلوک‌های آرمور در یک موج‌شکن کامپوزیتی افقی ارائه نمودند [۳].

ارجین و بالاس (۲۰۰۲) با استفاده از دو روش تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه دوم (SORM) و روش شبیه‌سازی MC اقدام به برآورد سطح ایمنی یک موج‌شکن توده سنگی در کشور ترکیه نمودند [۴]. در این تحقیق اثرات سونامی به همراه امواج ناشی از طوفان و جذر و مد مورد بررسی قرار گرفت. کیم و پارک (۲۰۰۵) نشان دادند که با تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و تحلیل قابلیت اطمینان می‌توان به نتایج بهتری نسبت به روش سنتی قطعی دست یافت [۵]. ایشان از روش شبیه‌سازی MC با تعداد ۲۰۰۰۰ چرخه شبیه‌سازی در تحقیق خود استفاده نمودند. کیم و سو (۲۰۱۱) یک روش تحلیل قابلیت مرتبه اول (FORM) برای تحلیل مسئله رانش در موج‌شکن‌های صندوقه‌ای ارائه نمودند [۶].

لی و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل تحلیل قابلیت اطمینان جهت ارزیابی ظرفیت عملکرد سازه‌ای وابسته به زمان یک موج‌شکن توده سنگی تحت بارهای مختلف ارائه نمودند [۷]. همچنین این محققین پایداری عملکردهای سازه‌ای در طول عمر آن با توجه به شرایط سرویس یا حالت حدی نهایی را بررسی نمودند. بالی و همکاران (۱۳۹۶) اقدام به طراحی لایه آرمور در موج‌شکن توده سنگی بندر نوشهر بر اساس روش شبیه‌سازی MC نمودند [۸]. در این تحقیق وزن پایدار آرمور با توجه به احتمال شکست ارائه شد. در مورد ارزیابی ریسک روگذری آب از روی موج‌شکن آلیسیس و همکاران (۲۰۱۴) یک روش جهت ارزیابی سطح ریسک مرتبط با خطرات روگذری در یک سال خاص از طول عمر سازه ارائه نمودند [۹].

³ First Order Reliability Method

¹ Monte Carlo

² Second Order Reliability Method

احتمال شکست هدف یا حالت حدی در مراحل مختلف ساخت و بهره‌برداری از سازه می‌باشد. در مطالعه حاضر، شکست حالت حدی بیشتر شدن اندازه لایه آرمور لازم با توجه به شرایط بارهای ورودی نسبت به اندازه طراحی است. یک تابع حالت حدی، نماینده‌ی ریاضی از یک شکست حالت حدی خاص می‌باشد. این تابع در شرایط حاد شکست مقادیر صفر و منفی به خود می‌گیرد و در شرایط ایمنی مقادیر تابع مثبت خواهد بود. در نتیجه احتمال شکست تابع حالت حدی یا به عبارت دیگر احتمال شکست لایه آرمور به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P_f = P[g(X) \leq 0] \quad (1)$$

که در آن $g(X)$ تابع حالت حدی و X بردار متغیرهای تصادفی پایه مربوط به پارامترهای موثر بر طراحی سازه است. بر این اساس، در صورتیکه W_{rs} وزن لایه آرمور مورد نیاز با توجه به بارهای ورودی (تقاضای سیستم) و W_{rp} وزن لایه آرمور موجود طراحی شده (ظرفیت سیستم) باشند، تابع حالت حدی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$g(X) = W_{rp} - W_{rs} \quad (2)$$

همانگونه که از این رابطه مشخص است شکست لایه آرمور و در ادامه شکست موج‌شکن زمانی اتفاق می‌افتد که W_{rs} بزرگتر یا مساوی W_{rp} باشد که مقدار تابع $g(X)$ صفر و یا منفی شود.

با توجه به معادله (۲) نیاز به در اختیار بودن رابطه‌ای جهت تعیین وزن لازم برای لایه آرمور موج‌شکن با توجه به پارامترهای موثر ورودی می‌باشد. روابط مختلفی در مراجع نظیر رابطه هادسن [۱۷]، وان در میر [۱۸] و اعتماد شهیدی و بالی [۱] اشاره کرد. در تحقیق حاضر از معادله وان در میر [۱۸] جهت تعیین پارامتر W_{rs} استفاده می‌گردد. این معادله توسط کتاب معتبر منوال سنگ جهت طراحی لایه آرمور توصیه شده است [۱۹]. بر این اساس معادله (۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$g(X) = W_{rp} - \rho_s \times \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{-3} \times H_s^3 \times \lambda^{-3} \times S_d^{-0.6} \times P^{-0.54} \times \left(\frac{T_s}{T_m} \right)^{0.3} \times \left(1.25 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s}} T_m \right)^{1.5} \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی آب، ρ_s چگالی سنگ، H_s ارتفاع موج شاخص، λ ضریب اصلاح مدل، S_d پارامتر بی‌بعد خرابی است

احمدی و نیک‌نژاد (۱۳۹۶) مطالعه‌ای جهت ارزیابی ریسک روگذری موج‌شکن انجام دادند. ایشان در تحقیق خود توابع هدف مختلف و تحلیل حساسیت پارامترهای موثر را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. رومانو و همکاران (۲۰۱۵) عدم قطعیت موجود در مدلسازی فیزیکی پدیده روگذری در موج‌شکن‌های توده سنگی را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. گالیتساتو و همکاران (۲۰۱۸) اقدام به مطالعه بر روی اثرات تغییرات اقلیم و خطرانی که موج‌شکن‌های توده سنگی را در نواحی نزدیک ساحل تهدید می‌کند، نمودند [۱۲].

ابایی و همکاران (۲۰۱۸) یک روش تحلیل قابلیت اطمینان بر مبنای شبکه‌های بیژین جهت تحلیل پایداری و ایمنی موج‌شکن‌های شناور توسعه دادند [۱۳]. در نهایت مالیوری و همکاران (۲۰۱۹) کاربرد روش تحلیل قابلیت اطمینان برای تعیین احتمال پایداری یک موج‌شکن در طول دوران بهره‌برداری از سازه را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثر مدهای مختلف شکست سازه با استفاده از تکنیک درخت خطا ارائه شد [۱۴].

با توجه به مطالعات نسبتاً محدود گذشته نیاز به مطالعه عمیق‌تر ایمنی سازه موج‌شکن و همچنین پایداری لایه آرمور محافظ بر روی آن وجود دارد. به خصوص که اخیراً رهیافت‌های جدیدی در زمینه سازه موج‌شکن نظیر پدیده اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد سازه موج‌شکن و یا احداث سامانه‌های تولید انرژی بر روی موج‌شکن توسط محققین مختلف معرفی و در حال انجام است [۱۵ و ۱۶] که کاربرد روش‌های قابلیت اطمینان در تحلیل این پدیده‌ها و عملکرد کاربری‌های جدید بسیار مفید خواهد بود. بر این اساس در تحقیق حاضر اقدام به بررسی پایداری لایه آرمور موج‌شکن توده سنگی با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان می‌گردد. در این راستا از روش‌های FORM و MC استفاده می‌شود. همچنین ارتباط بین شاخص قابلیت اطمینان و ضریب ایمنی در روش قطعی نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از طرح جدید موج‌شکن توده سنگی بندر نوشهر نیز به عنوان مطالعه مورد استفاده می‌شود.

۲- فرمول‌سازی مسئله بر پایه تحلیل قابلیت اطمینان

مسئله اصلی در تحلیل قابلیت اطمینان لایه محافظ آرمور بر روی موج‌شکن توده سنگی مربوط به تعیین و پیش‌بینی

² Fault Tree

¹ Bayesian Network

واریانس) استفاده می‌شود. نسل اول این روش صرفاً با در نظر گرفتن ممان‌های آماری و بدون توجه به توزیع متغیرها تنها از توزیع نرمال برای هر متغیر استفاده می‌نمود. درحالی‌که در روش‌های پیشرفته‌تر با به‌کارگیری توزیع متغیرها به صورت تبدیل توزیع هر متغیر تصادفی به توزیع نرمال معادل به حل مسئله می‌پردازد.

روش SORM احتمال شکست را با تقریب مرتبه دوم بسط تیلور برای تابع سطح شکست محاسبه می‌کند. در این روش تابع سطح شکست می‌تواند غیرخطی باشد و همچنین توزیع متغیرها در محاسبات به صورت دلخواه در نظر گرفته شود. البته این روش تحلیل علاوه بر محاسبات ریاضی پیچیده و گسترده، نیاز به اطلاعات زیادی در مورد پدیده دارد.

در تمام روش‌های تحلیلی تقریبی نیاز به وجود معادله صریح سطح شکست می‌باشد. محاسبه احتمال شکست با استفاده از این روش‌ها نیاز به اطلاعات زیادی از آمار و روش‌های احتمالاتی دارد. درحالی‌که در روش‌های شبیه‌سازی نظیر روش شبیه‌سازی MC، احتمال شکست برای هر دو حالت صریح و یا غیرصریح سطح شکست، با در دسترس داشتن اطلاعات اندکی از آمار و احتمال، می‌توان احتمال شکست را برآورد کرد.

در تحقیق حاضر از دو روش معمول تعیین قابلیت اطمینان یعنی FORM و همچنین روش شبیه‌سازی MC استفاده شده است. مزیت روش FORM سادگی و کوتاهی زمان انجام تحلیل و عیب آن کم بودن دقت به خصوص برای توابع حالت حدی غیرخطی و پیچیده می‌باشد از طرف دیگر مزیت روش شبیه‌سازی MC دقت مناسب و عیب آن زمانبر بودن است. به این ترتیب، همپوشانی مناسبی مابین مزایا و معایب این دو روش وجود دارد. در شکل (۱) فلوجارت تحلیل قابلیت اطمینان بر اساس این دو روش نشان داده شده است. در ادامه به اختصار این دو روش اشاره می‌گردد.

۱-۲- تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه اول (FORM)

به طور خلاصه در این روش، تحلیل قابلیت اطمینان بر اساس برآورد پارامتر قابلیت اطمینان β انجام می‌گیرد. این پارامتر نیز به صورت زیر با احتمال شکست یا احتمال فراگذشت از حالت حدی ارتباط دارد.

که از حاصل تقسیم سطح فرسایش یافته به مربع میانگین اندازه سنگ‌ها بدست می‌آید، P پارامتر میزان نفوذپذیری موج‌شکن، T_s زمان طوفان و T_m دوره تناوب موج طرح و α زاویه شیب جداره موج شکن نسبت به افق می‌باشد. پارامتر X نشان دهنده بردار متغیرهای تصادفی پایه شامل تمامی متغیرهای سمت راست معادله (۳) می‌باشد.

با داشتن تابع حالت حدی، مرحله بعدی تحلیل قابلیت اطمینان وزن پایدار لایه آرمور است. از آنجا که عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و ظرفیت سیستم به صورت تابع چگالی احتمال (PDF) نشان داده می‌شود، بر این اساس احتمال شکست به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۰]

$$P_f = \iiint_{g(\mathbf{x}) < 0} f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) dx_1 dx_2 dx_3 \dots dx_n \quad (4)$$

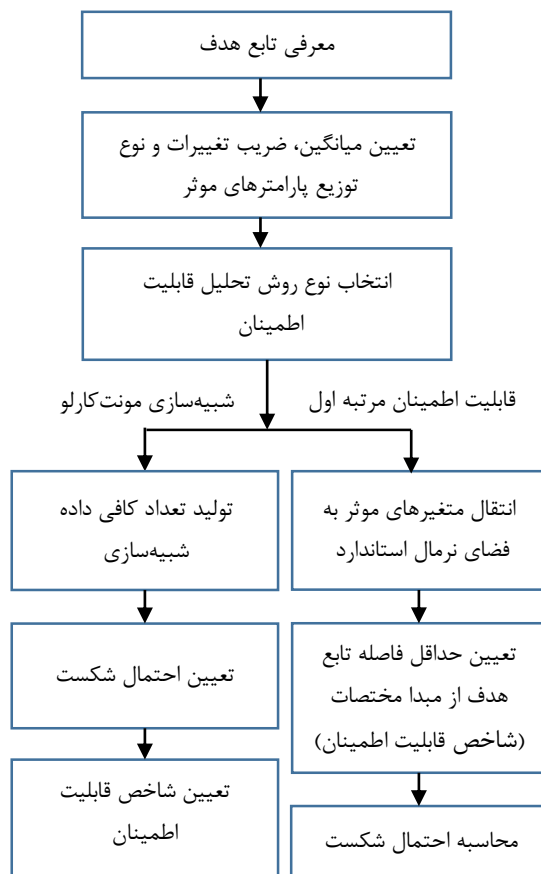
که در آن $f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ تابع چگالی احتمال ترکیبی برای متغیرهای تصادفی پایه X_1, X_2, \dots, X_n است و انتگرال‌گیری روی تمام سطح شکست انجام می‌شود. اگر متغیرهای تصادفی ناهمبسته باشند، تابع چگالی احتمال ترکیبی به حاصل ضرب توابع چگالی احتمال به وجود آمده از تک‌تک متغیرها تبدیل می‌شود. معادله فوق یک معادله عمومی برای حل تمامی مسائل قابلیت اطمینان می‌باشد و به نام معادله اساسی قابلیت اطمینان شناخته می‌شود. در عمل بدست آوردن تابع چگالی احتمال ترکیب غیرممکن است. همچنین انتگرال‌گیری مورد نظر نیز چندان ساده نخواهد بود. برای رفع این مشکل، از روش‌های تقریبی استفاده می‌شود. این روش‌ها به دو نوع کلی روش‌های تحلیلی تقریبی^۲ به عنوان نمونه روش‌های FORM و SORM و همچنین روش‌های شبیه‌سازی^۳ نظیر روش شبیه‌سازی MC تقسیم می‌شوند [۲۰].

در حالت کلی معادله سطح شکست ممکن است تابعی خطی یا غیرخطی از متغیرهای پایه باشد. اگر سطح شکست تابع خطی از متغیرهای ناهمبسته نرمال و یا یک تابع غیرخطی ولی با تقریب خطی (درجه اول) قابل قبول از متغیرهایی شبیه نرمال باشد، روش FORM در محاسبه انتگرال اساسی قابلیت اطمینان مناسب خواهد بود. در این روش ضمن استفاده از تقریب مرتبه اول سری تیلور برای تابع سطح شکست، از اطلاعات ممان‌های اول و دوم آمار (میانگین و

³ Simulation Method

¹ Probability Density Function

² Analytical Approximations Methods



شکل (۱) فلوجارت تحلیل قابلیت اطمینان

واریانس احتمال شکست تخمینی را می توان در صورت فرض هر چرخه شبیه سازی مشابه با یک آزمایش برنولی تعیین نمود. بنابراین تعداد شکست در N آزمایش را می توان به صورت یک توزیع دوجمله ای در نظر گرفت. سپس واریانس احتمال شکست به طور تقریبی برابر است با [۲۱]:

$$\text{Var}(P_f) = (1 - P_f) P_f / N \quad (9)$$

بر این اساس دقت برآورد پارامتر P_f را می توان بر اساس ضریب تغییرات (COV) که به صورت نسبت انحراف از معیار به میانگین تعریف می شود به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\text{COV}(P_f) \cong \sqrt{(1 - P_f) P_f / N} / P_f \quad (10)$$

هر چه COV^1 کوچکتر باشد، دقت P_f تخمینی بیشتر است. از معادلات (۹) و (۱۰) مشخص است در صورتی که N به سمت بی نهایت میل کند، $\text{Var}(P_f)$ و $\text{COV}(P_f)$ به سمت صفر میل می کنند. پیشنهاد می شود که جهت کاربردی نمودن موضوع، تعداد چرخه شبیه سازی به گونه ای انتخاب شود که $\text{COV}(P_f)$ کوچکتر از ۵٪ باشد [۲۲].

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (5)$$

که در آن P_f احتمال شکست و $\Phi^{-1}(\cdot)$ تابع تجمعی معکوس توزیع نرمال استاندارد است. پارامتر β که به صورت حداقل فاصله از مبدا مختصات تا سطح شکست در فضای نرمال استاندارد تعریف می شود [۲۰]، از طریق یک مسئله بهینه سازی با قید محدودیت به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\text{Minimize } \beta(z) = (X'^T X')^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{Subject to } g(X') = 0$$

که در آن X' بردار متغیرهای تصادفی پایه در فضای استاندارد نرمال (پارامتر تصادفی کاهش یافته) می باشد و $g(X')$ تابع حالت حدی در فضای نرمال استاندارد است. X'_i پارامتر تصادفی کاهش یافته مربوط به پارامتر تصادفی X_i در فضای استاندارد نرمال معادل به صورت زیر تعریف می شود.

$$X'_i = (X_i - \mu_{X_i}) / \sigma_{X_i} \quad (7)$$

که در آن پارامتر X'_i متغیر نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ است. X_i نیز پارامتر تصادفی در فضای معمولی با میانگین μ_{X_i} و انحراف از معیار σ_{X_i} می باشد. حل مسئله بهینه سازی فوق به صورت سعی و خطا انجام می گیرد که امکان دارد در بعضی از مواقع همگرایی به جواب بهینه اتفاق نیافتد.

۲-۲- روش شبیه سازی مونت کارلو

روش شبیه سازی MC به صورت برآورد نمونه های مختلفی از متغیرهای تصادفی پایه با توجه به مشخصات احتمالاتی هر یک و سپس قرار دادن این نمونه ها در تابع حالت حدی انجام می گیرد. همانگونه که قبلا بیان شد شکست زمانی اتفاق می افتد که $g(X) < 0$ باشد، در نتیجه یک برآورد از احتمال شکست P_f می تواند به صورت زیر تعریف گردد

$$P_f = N_f / N \quad (8)$$

که در آن N_f تعداد چرخه های شبیه سازی است که $g(X) < 0$ و N تعداد کل چرخه های شبیه سازی است. اگر N به سمت بی نهایت میل کند، P_f به سمت احتمال شکست واقعی میل خواهد کرد. دقت معادله (۸) را می توان با توجه واریانس آن تعیین نمود. برای یک تعداد کم از چرخه های شبیه سازی، واریانس می تواند نسبتا بزرگ باشد. در نتیجه امکان دارد برای رسیدن به یک دقت قابل قبول نیاز به تعداد زیادی چرخه شبیه سازی باشد.

¹ Coefficient of Variation

۳- مطالعه موردی - بندر نوشهر

بندر نوشهر در ساحل جنوبی دریای خزر و در استان مازندران قرار دارد. این بندر با مساحت ۴۵ هکتار و دارا بودن اسکله‌های تجاری و خدماتی و تجهیزات مناسب خشکی و دریایی و با عمق ۵/۵ متر، سالانه به طور متوسط پذیرای ۵۰۰ فرزند کشتی از کشورهای حوزه دریای خزر است [۲۳]. با توجه به مشکلاتی که این بندر در سالیان اخیر به آن دچار شده است نظیر رسوب‌گذاری شدید در پشت بازوی غربی و عبور و ته‌نشینی آن در مقابل دهانه بندر، طرح اصلاح جانمایی موج‌شکن‌ها به صورت شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به طرح پیشنهادی مشخص می‌شود که بخش‌هایی از بندر نیاز به موج‌شکن توده‌سنگی دارد. در تحقیق حاضر به تحلیل قابلیت اطمینان لایه آرمور مقطع بازوی غربی موج‌شکن اقدام می‌گردد.

در جدول (۱) محدوده داده‌های موثر بر وزن آرمور بازوی غربی موج‌شکن توده سنگی بندر نوشهر با توجه به طوفان با دوره بازگشت ۵۰ سال ارائه شده است [۸]. در این جدول مقدار میانگین و انحراف از معیار داده‌ها به همراه نوع توزیع و همچنین حد بالایی و پایینی متغیرها ارائه شده است. برای تعیین ارتفاع موج حدی از ۳۱ سال داده‌های امواج مدل‌سازی شده در پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور استفاده شده است. این نتایج نشان داد که ارتفاع موج شاخص در محدوده ۲/۱ تا ۴/۲ متر قرار دارد که یک توزیع مثلثی متقارن برای آن در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به ارتباط مابین ارتفاع و زمان تناوب میانگین موج در دریای خزر محدوده تغییرات زمان تناوب

موج مابین ۹/۲ تا ۱۱/۵ ثانیه بدست آمد که برای آن نیز یک توزیع مثلثی متقارن در نظر گرفته شد. از طرفی بررسی‌های انجام شده در مورد زمان طوفان در دریای خزر نشان داده است که زمان وزش طوفان (باد شبیه‌سازی شده در پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل کشور) برای امواج طرح می‌تواند در بازه ۶ ساعت تا ۱۲ ساعت اتفاق بیافتد. علاوه بر عدم قطعیت‌های هیدرودینامیکی ذکر شده، عدم قطعیت‌های موجود در جرم مخصوص سنگ نیز می‌بایست در نظر گرفته شود. بررسی نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی سنگ معادل تغییرات ۲۶۰۰ تا ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب را نشان داده است. سایر داده‌ها نیز با توجه به ماهیت پروژه بدست آمده است. در مورد ضریب اصلاح مدل نیز باید گفت که طبق نظر وان در میر [۱۸] مقدار میانگین پارامتر λ برابر با ۶/۲ و انحراف از معیار آن ۰/۴ است که یک توزیع نرمال برای آن فرض شد. در شرایط طراحی قطعی مقدار میانگین این پارامتر در معادله (۳) لحاظ می‌شود.

نکته دیگر اینکه مهندسان مشاور طرح گسترش بندر نوشهر اقدام به طراحی قطعی وزن آرمور موج شکن نمودند نتایج این محاسبات نشان می‌دهد که مقدار تناژ تخمینی برابر با $W_{mp} = 8362 \text{ kg}$ است [۸]. این مقدار در تحقیق حاضر به عنوان وزن لایه آرمور موجود (طراحی شده) در نظر گرفته شده و اقدام به تحلیل قابلیت اطمینان لایه آرمور می‌گردد. بر این اساس یک ضریب تغییرات کوچک برابر با ۱ درصد برای این پارامتر در نظر گرفته می‌شود که مقدار انحراف از معیار آن برابر با ۸۳/۶۲ بدست می‌آید و همچنین یک توزیع نرمال نیز برای این پارامتر لحاظ می‌شود.

جدول (۱) محدوده داده‌های موثر بر وزن آرمور در موج‌شکن توده سنگی بندر نوشهر

پارامتر	حد پایینی	حد بالایی	توزیع فرض شده	میانگین (μ)	انحراف معیار (σ)
$\rho_w \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	1010	1025	یکنواخت	1017.5	4.3
$\rho_s \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	2600	2800	یکنواخت	2700	57.6
$H_s \text{ (m)}$	2.1	4.2	مثلثی	3.15	0.5
$T_m \text{ (s)}$	9.2	11.5	مثلثی	10.35	0.41
$t_s \text{ (hr)}$	6	12	مثلثی	9	1.23
S_d	2	5	یکنواخت	3.5	0.87
P	0.3	0.5	نرمال	0.4	0.05
$\tan \alpha$	-	-	نرمال	0.667	0.05
λ	-	-	نرمال	6.2	0.4

حاصل از روش شبیه‌سازی MC است که این موضوع صحت نتایج FORM را نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان از این روش برای تحلیل وزن پایدار لایه آرمور استفاده نمود. در تحقیق حاضر از روش FORM برای تحلیل قابلیت اطمینان وزن آرمور موج‌شکن جدید بندر نوشهر استفاده گردید. از آنجا که مبنای روش FORM سعی و خطا و شیب-پایه‌آمی باشد به گونه‌ای که نیاز است یک مسئله بهینه‌سازی جهت رسیدن به کمترین فاصله تا تابع هدف حل شود در نتیجه امکان دارد در بعضی مواقع مسئله دچار واگرایی شده و جوابی بدست ندهد. در نتیجه در تحقیق حاضر هر جا که روش FORM جهت تعیین شاخص قابلیت اطمینان دچار واگرایی شد از نتایج روش شبیه‌سازی MC استفاده گردید.

با توجه به نتایج جدول (۲) احتمال شکست لایه آرمور پیشنهادی توسط مشاور در صورتیکه طوفان ۵۰ ساله در محل بندر نوشهر رخ دهد، نزدیک به ۴۰ درصد است که معمولاً در طرح‌های مهندسی قابل پذیرش نیست و شاخص قابلیت اطمینان آن $\beta = 0.262$ است که این مقدار بسیار کم است. از آنجا که طبق نظر کمیته ایمنی سازه^۳ شاخص قابلیت اطمینان هدف یا مورد قبول در اعضای سازه‌ای باید نزدیک به ۳ باشد، در نتیجه مقدار فوق بسیار کم است و نیاز به اصلاح دارد. در نتیجه با اینکه در محاسبه وزن لایه آرمور از مقادیر متوسط پارامترهای موثر استفاده شده است که روشی معمول در تحلیل‌های قطعی است ولی قابلیت اطمینان پایداری لایه آرمور در محدوده مطلوب قرار ندارد. در واقع در صورتیکه همه پارامترهای موثر ثابت بمانند، وزن لایه آرمور طرح شده نیاز به افزایش دارد تا شاخص قابلیت اطمینان در محدوده قابل قبول (نزدیک به ۳) قرار گیرد.

۴-۲- تحلیل حساسیت

جهت تعیین میزان تاثیر پارامترهای تصادفی مختلف بر روی قابلیت اطمینان لایه آرمور موج‌شکن از تحلیل حساسیت استفاده می‌گردد.

جدول (۲) نتایج تحلیل قابلیت اطمینان لایه آرمور موج‌شکن نوشهر با روش‌های مختلف

روش FORM		روش شبیه‌سازی MC	
β	P_f	β	P_f
0.286	0.386	0.275	0.391



شکل (۲) نمایی از طرح توسعه بندر نوشهر.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- ارزیابی دقت روش FORM

با استفاده از داده‌های نشان داده شده در جدول (۱) اقدام به محاسبه پارامتر قابلیت اطمینان و احتمال شکست لایه آرمور موج‌شکن بندر نوشهر می‌گردد. برای انجام این کار، یک برنامه به زبان ویژوال بیسیک (VB) در محیط نرم‌افزار اکسل نوشته شد. در جدول (۲) مقدار پارامتر β و P_f مربوط به روش FORM و روش شبیه‌سازی MC ارائه شده است. جهت تعیین تعداد چرخه شبیه‌سازی در روش شبیه‌سازی MC از معادله (۱۰) و احتمال شکستی که با استفاده از روش FORM محاسبه شده بود، استفاده گردید. با در نظر گرفتن ضریب $COV(P_f) = 0.05$ ، حداقل تعداد چرخه شبیه‌سازی نزدیک به ۱۳۰۰۰ محاسبه می‌گردد. جهت اطمینان از نتایج بدست آمده، تعداد چرخه شبیه‌سازی در تحقیق حاضر برابر با ۲۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شد.

همانگونه که قبلاً بیان شد در صورتیکه تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی در روش شبیه‌سازی MC کافی باشد این روش نتایج دقیق را بدست می‌دهد و می‌توان از آن برای بررسی دقت روش‌های دیگر استفاده نمود در حالیکه روش FORM یک روش تقریبی است که از تقریب مرتبه اول بسط تیلور استفاده می‌کند. از طرفی روش FORM یک روش سریع است و حجم محاسبات به مراتب کمتری نسبت به روش شبیه‌سازی MC دارد. همانگونه که در جدول (۲) مشخص است نتایج حاصل از روش FORM بسیار نزدیک به نتایج

³ Joint Committee on Structural Safety (JCSS)

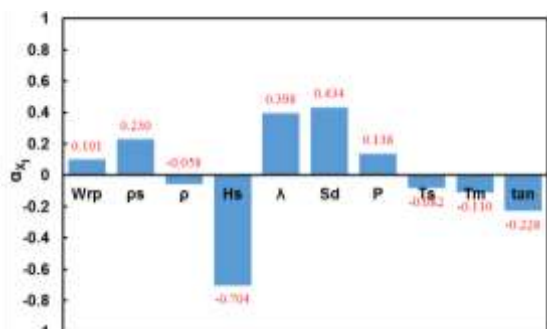
¹ Visual Basic

² Gradient-Based

نقطه‌ای که شامل همه میانگین‌های پارامترهای تصادفی باشد را می‌توان به عنوان فرض اولیه برای نقطه طراحی پذیرفت. بدیهی است نقطه طراحی نهایی با استفاده از روش سعی و خطا و همان مسیری که در روش FORM دنبال شد، بدست می‌آید.

پارامترهای موجود در جدول (۱) به عنوان متغیرهای تصادفی در تحلیل حساسیت مشارکت داده شدند. علاوه بر آن پارامتر W_{Tp} با میانگین ۸۳۶۲ و ضریب تغییرات ۱٪ و توزیع نرمال در محاسبات تحلیل حساسیت مشارکت داده شد. ضریب حساسیت α_{X_i} که در معادله (۱۱) تعریف شده است دارای خصوصیات مختلفی است نظیر: (۱) هر چه مقدار α_{X_i} کوچکتر باشد، تاثیر آن پارامتر بر روی قابلیت اطمینان لایه آرمور کمتر است. (۲) مقدار مثبت پارامتر α_{X_i} مربوط به متغیرهای مقاومت و مقدار منفی آن مربوط به متغیرهای بار می‌باشند. متغیرهای مقاومت شامل متغیرهایی هستند که افزایش آنها موجب بهبود قابلیت اطمینان لایه آرمور می‌شوند و بلعکس این تعریف برای متغیرهای بار صادق است. (۳) جذر مجموع توان دوم ضرایب حساسیت متغیرهای تصادفی برابر با واحد می‌باشد.

در تحقیق حاضر از روش فوق برای تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی موثر بر وزن لایه آرمور موج‌شکن بندر نوشهر استفاده شد. یکی از قابلیت‌های روش فوق اینست که بدون نیاز به تحلیل پارامتریک دیگر و تنها با انجام همان مسیر انجام روش FORM و تعیین پارامترهای α_{X_i} می‌توان به اثر هر پارامتر بر روی قابلیت اطمینان لایه آرمور دست یافت. شکل (۳) نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی موثر بر لایه آرمور موج‌شکن جدید بندر نوشهر را نشان می‌دهد.



شکل (۳) ضریب حساسیت متغیرهای تصادفی موثر بر لایه آرمور موج‌شکن جدید بندر نوشهر.

این اثر با استفاده از ضریب حساسیت α_{X_i} که در آن اندیس X_i مربوط به پارامتر تصادفی i -ام است، به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۱]:

$$\alpha_{X_i} = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial X'_i}\right)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n=10} \left(\frac{\partial g}{\partial X'_i}\right)^{2*}}} \quad (11)$$

مشتقات $\partial g / \partial X'_i$ در معادله (۱۱) مولفه‌های بردار شیب تابع هدف در فضای استاندارد نرمال و علامت * نشان‌دهنده نقطه با حداکثر احتمال وقوع و یا نقطه طراحی روی تابع هدف می‌باشند. این مشتقات با استفاده از قانون زنجیره‌ای مشتق و انتقال به فضای معمولی به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$\frac{\partial g}{\partial X'_i} = \frac{\partial g}{\partial X'_i} \times \frac{\partial X'_i}{\partial X_i} = \frac{\partial g}{\partial X_i} \times \sigma_{X_i}^N \quad (12)$$

که در آن مشتقات $\partial g / \partial X_i$ در فضای معمولی تعریف می‌شوند. با قرار دادن معادله (۱۲) در معادله (۱۱) می‌توان نوشت:

$$\alpha_{X_i} = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right) \sigma_{X_i}^N}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \sigma_{X_i}^N\right)^2\right]^{1/2}} \quad (13)$$

که در آن $\sigma_{X_i}^N$ انحراف از معیار پارامتر نرمال معادل می‌باشد. در این معادله اگر متغیر تصادفی X_i خود نرمال باشد، $\sigma_{X_i}^N$ برابر با همان انحراف معیار این پارامتر خواهد بود. در غیر این صورت با استفاده از تئوری انتقال نرمال معادل^۱ که توسط راکویتز و فیسلر [۲۴] ارائه شد پارامتر $\sigma_{X_i}^N$ عبارت خواهد بود از:

$$\sigma_{X_i}^N = \frac{\phi\left\{\Phi^{-1}\left[F_{X_i}(x_i^*)\right]\right\}}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (14)$$

که در آن ϕ و Φ^{-1} تابع چگالی احتمال و تابع معکوس چگالی تجمعی برای متغیر استاندارد نرمال معادل و f_{X_i} و F_{X_i} تابع چگالی احتمال و تابع چگالی تجمعی برای متغیر غیر نرمال اولیه می‌باشد. x_i^* همان کمترین فاصله از نقطه مبدا تا تابع هدف یا همان نقطه طراحی می‌باشد که از طریق روش FORM محاسبه می‌شود. در غیاب وجود فرضی بهتر،

¹ Equivalent Normal Transformation Theorem

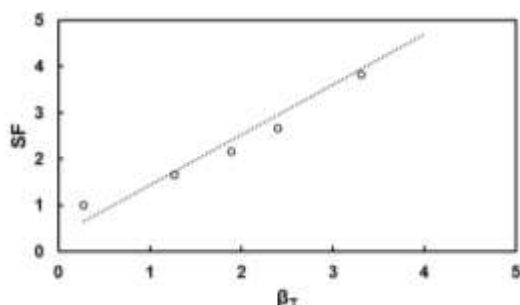
۷۸۶۹ کیلوگرم می‌توان به مقدار ضریب ایمنی (SF) جدید دست یافت. در نهایت با انجام تحلیل قابلیت اطمینان، شاخص قابلیت اطمینان هدف β_T محاسبه می‌گردد. بعد از انجام این کار، نموداری مابین ضریب SF و شاخص β_T رسم شده و ارتباط مابین این دو پارامتر برآورد می‌گردد. شکل (۴) این نمودار را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است با افزایش شاخص β_T ، مقدار ضریب SF نیز افزایش می‌یابد. پس از انجام تحلیل رگرسیون، رابطه زیر مابین SF و β_T حاصل می‌گردد.

$$SF = 1.081\beta_T + 0.361 \quad (15)$$

به کمک معادله (۱۵) می‌توان مقدار مناسب ضریب ایمنی را با توجه به شاخص قابلیت اطمینان هدف محاسبه نمود. برای مثال معادله فوق مقدار ضریب ایمنی متناظر با شاخص اطمینان هدف $\beta_T = 3$ را برابر با $3/6$ بدست می‌دهد. این مقدار ضریب ایمنی زیاد به دلیل تغییرات نسبتاً زیاد پارامترهایی نظیر H_s نسبت به مقدار میانگین می‌باشد.

۴-۴- تاثیر عدم قطعیت بر قابلیت اطمینان

در این قسمت تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به تغییر در میزان عدم قطعیت یک پارامتر تصادفی که با ضریب تغییرات پارامتر بیان می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهایی نظیر وزن آرمر موجود W_{rp} ، ارتفاع موج شاخص H_s ، زمان طوفان T_s ، نفوذپذیری موج‌شکن P ، شیب موج شکن $\tan \alpha$ و ضریب اصلاح مدل λ در این تحلیل مشارکت داده شدند. در تحلیل حاضر ضریب تغییرات پارامترهای تصادفی از $0/5$ تا $0/5$ افزایش داده شد و در هر مرحله مقدار شاخص قابلیت اطمینان لایه آرمر محاسبه شد. شکل (۵) تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به ضریب تغییرات پارامترهای موثر بر وزن آرمر موج‌شکن بندر نوشهر را نشان می‌دهد.



شکل (۴) تغییرات ضریب ایمنی نسبت به شاخص قابلیت اطمینان برای وزن آرمر موج‌شکن بندر نوشهر.

همانگونه که در شکل (۳) مشخص است ضریب حساسیت α_{X_i} مربوط به پارامترهای وزن لایه آرمر موجود W_{rp} به همراه بعضی از پارامترهای موثر بر وزن سنگ مورد نیاز شامل چگالی سنگ ρ_s ، ضریب اصلاح مدل وان در میر λ ، خرابی S_d و نفوذپذیری موج‌شکن P مثبت هستند و مربوط به بخش مقاومت مدل طراحی وزن آرمر هستند.

پارامترهای چگالی آب ρ ، ارتفاع موج شاخص H_s ، زمان طوفان T_s ، زمان تناوب متوسط موج T_m ، و شیب جداره موج شکن $\tan \alpha$ دارای ضریب حساسیت α_{X_i} منفی بوده و مربوط به بخش بار معادله حالت حدی می‌باشند. همچنین اندازه ضریب حساسیت α_{X_i} نشان می‌دهد که پارامتر H_s بیشترین تاثیر را بر تغییرات قابلیت اطمینان وزن آرمر دارد و پس از آن پارامترهای S_d ، λ و $\tan \alpha$ به ترتیب بیشترین تاثیر را بر قابلیت اطمینان لایه آرمر دارند. همچنین کمترین تاثیر نیز مربوط به پارامترهای T_s ، T_m و ρ است.

۳-۴- ارائه ضریب ایمنی بر مبنای قابلیت اطمینان

معمولاً در یک روش سنتی قطعی برای طراحی هیدرولیکی لایه آرمر، یک ضریب ایمنی مناسب با توجه قضاوت مهندسی و تجربیات انتخاب می‌گردد. در واقع این ضریب ایمنی برای اعمال اثرات عدم قطعیت در طراحی سازه مورد نظر است. در نتیجه بدون شناسایی و کمی‌سازی معقول عدم قطعیت‌ها، می‌توان انتظار داشت که انتخاب بیش از حد ضریب ایمنی منجر به طرحی غیر اقتصادی شود و مقدار کم آن کاهش ایمنی سازه را به دنبال داشته باشد. از طرفی تحلیل قابلیت اطمینان، چارچوبی مهندسی جهت کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها را بدست می‌دهد که می‌توان این مفهوم را در انتخاب ضریب ایمنی مناسب به کار برد. برای انجام این کار لازم است یک ارتباطی مابین شاخص قابلیت اطمینان و ضریب ایمنی حاصل گردد.

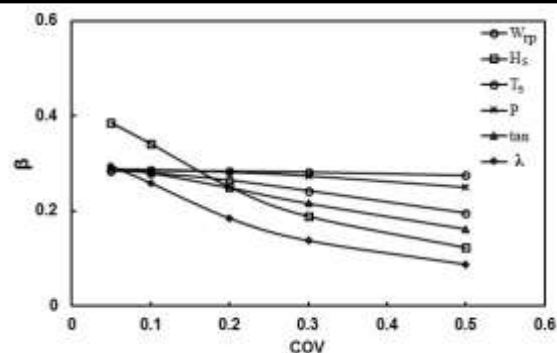
از آنجا که معمولاً در روش‌های قطعی از میانگین داده‌ها استفاده می‌شود با اعمال میانگین داده‌ها در جدول (۱) مقدار وزن آرمر برابر با ۷۸۶۹ کیلوگرم بدست می‌آید. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که ضریب ایمنی مربوط به وزن تخمینی آرمر توسط مهندسین مشاور طرح توسعه بندر نوشهر یعنی $W_{rp} = 8362 \text{ kg}$ برابر با $SF = 1.06$ است. در ادامه اقدام به افزایش پارامتر W_{rp} در تحلیل قابلیت اطمینان می‌گردد به گونه‌ای که با نسبت مقدار جدید آن به مقدار

طراحی وان در میر [۱۸] به عنوان تابع حالت حدی در تحلیل قابلیت اطمینان استفاده شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که احتمال شکست لایه آرمور انتخابی با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای موثر نسبتا بالاست و نیازمند تمهیدات بهره‌برداری ویژه بعد از وقوع طوفان طراحی ۵۰ ساله وجود دارد. سپس به منظور کمی‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای موثر بر ضریب ایمنی طراحی به روش قطعی، تغییرات ضریب ایمنی طراحی لایه آرمور نسبت به شاخص قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج نشان داد که یک رابطه خطی بین این دو پارامتر برقرار است. در نتیجه می‌توان با انتخاب شاخص قابلیت اطمینان مناسب که در مراجع تعریف می‌شود، اقدام به تعیین ضریب ایمنی در طراحی قطعی نمود. در ادامه با استفاده از تحلیل حساسیت، اقدام به مطالعه اثرات متغیرهای تصادفی مختلف بر میزان تغییر قابلیت اطمینان وزن آرمور موج‌شکن بندر نوشهر شد.

نتایج نشان داد که ارتفاع موج شاخص، پارامتر خرابی، ضریب اصلاح مدل و شیب موج‌شکن به ترتیب بیشترین تاثیر را بر قابلیت اطمینان لایه آرمور موج‌شکن بندر نوشهر دارند که نیاز به تمهیدات بیشتری برای تعیین دقیق‌تر این پارامترها به خصوص ارتفاع موج شاخص وجود دارد. در نهایت اقدام به بررسی اثر میزان عدم قطعیت پارامترهای موثر که با ضریب تغییرات هر پارامتر تعریف شد بر قابلیت اطمینان لایه آرمور گردید. نتایج نشان داد که در همه موارد با افزایش ضریب تغییرات هر یک از پارامترهای تصادفی میزان قابلیت اطمینان لایه آرمور کاهش می‌یابد به طوری که در بدترین حالت با افزایش ضریب تغییرات ارتفاع موج شاخص از ۰/۰۵ تا ۰/۵، شاخص قابلیت اطمینان لایه آرمور به میزان حدوداً ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. برای انجام تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که توابع هدف دیگر مورد بررسی قرار گیرد و همچنین با استفاده از روش‌های قابلیت احتمال سیستم، احتمال پایداری ترکیب مدهای مختلف شکست موج‌شکن و یا لایه آرمور انجام شود.

۶- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق قرارداد شماره ۲۸۱۵۵ مورخ ۱۳۹۸/۱۱/۲۱ انجام گردیده است.



شکل (۵) تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به ضریب تغییرات پارامترهای موثر بر وزن آرمور موج‌شکن بندر نوشهر.

همانگونه که در این شکل مشخص است ضریب تغییرات پارامترهای تصادفی نقش مهمی را در میزان قابلیت اطمینان سازه موج‌شکن ایفا می‌کند به طوری که میزان این تاثیر تابعی از شدت نقش آن پارامتر در تغییر قابلیت اطمینان سازه که در تحلیل حساسیت بیان شد، می‌باشد. در نتیجه اگر بتوان با مراقبت‌های بیشتر به همراه کنترل کیفیت اطلاعات ورودی، ضریب تغییرات پارامترهای تصادفی را کاهش داد، می‌توان میزان قابلیت اطمینان نهایی سازه را افزایش داد. در همه موارد افزایش COV هر یک از پارامترهای تصادفی موجب کاهش شاخص β می‌شود به طوری که در بدترین حالت با افزایش میزان COV پارامتر ارتفاع موج شاخص از ۰/۰۵ تا ۰/۵، شاخص β به میزان حدوداً ۷۰ درصد کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان به عنوان یکی از روش‌های نوین طراحی و تحلیل سازه‌های مهندسی روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در این روش با استفاده از تئوری احتمالات اقدام به کمی‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در یک مسئله مهندسی می‌گردد و به این ترتیب اطلاعات مفیدی در مورد پایداری و یا شکست سازه مهندسی طرح شده بدست می‌آید.

در مقاله حاضر اقدام به مطالعه قابلیت اطمینان لایه آرمور موج‌شکن توده‌سنگی جدید مربوط به طرح توسعه بندر نوشهر گردید. برای این کار از دو روش یکی روش تقریبی تحلیل قابلیت اطمینان FORM و دومی روش شبیه‌سازی MC استفاده گردید. علت انتخاب این دو روش همپوشانی مزایا و معایب آنها بود تا به این ترتیب نتایج در زمان کوتاه‌تر و با دقت بیشتری در دسترس قرار گیرد. همچنین از معادله

- [12] Galiatsatou, P., Makris, C., and Prinos, P. "Optimized Reliability Based Upgrading of Rubble Mound Breakwaters in a Changing Climate", *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.6, pp.92, 2018.
- [13] Abaei, M., Abbassi, R., Garaniya, V., Chai, S., and Khan, F., "Reliability Assessment of Marine Floating Structures Using Bayesian Network", *Applied Ocean Research*, Vol.76, pp.51-60, 2018.
- [14] Malliouri, D.I., Memos, C.D., Soukissian, T.H., and Tsoukala, V.K., "Reliability analysis of rubble mound breakwaters An easy-to-use methodology", 1st International Conference on Design and Management of Port, Coastal, and Offshore Works Athens, Greece, 2019.
- [15] Spanos, P. D., F. M. Strati, G. Malara, and F. Arena. "An Approach for Nonlinear Stochastic Analysis of U-shaped OWC Wave Energy Converters" *Probability Engineering Mechanics*, Vol.54, pp.44-52. 2018.
- [16] Vicinanza, D., Lauro, E., Contestabile, P., Gissoni, C., Lara, J., and Losada, I., "Review of Innovative Harbor Breakwaters for Wave-Energy Conversion", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.145, No.4, pp.311-319, 2019.
- [17] Hudson RY., "Design of Quarry-Stone Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters". No. AEWES-RR-2-2 Res. Rpt. 1958.
- [18] Van der Meer JW, Rock slopes and Gravel Beaches under Wave Attack, The Netherlands: Delft University of Technology, Ph.D. dissertation, 1988.
- [19] The Rock Manual, The Use of Rock in Hydraulic Engineering, CIRIA- CUR CETMEF (C683), 2007.
- [20] Nowak A.S. and Collins K.R., *Reliability of Structures*, McGraw Hill, Singapore, 2000.
- [21] Halder A, Mahadevan S, *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley & Son, New York, 304p, 2000.
- [22] Muzzammil M., Siddiqui N, A., and Siddiqui A. F., *Reliability Considerations in Bridge Pier Scouring*. *J. Structural Eng. and Mechanics*, Vol.28, No.1, pp.1-18, 2008.
- [23] سایت سازمان سواحل و دریانوردی کشور، اطلاعات مربوط به بندر نوشهر. www.PMO.ir
- [24] Rackwitz R, and Fiessler B, Note on Discrete Safety Checking When Using Non-Normal Stochastic Models for Basic Variables. Load Project Working Session. Cambridge, MA: MIT, 1976.
- ۷- مراجع
- [1] Etemad-Shahidi A, and Bali M, "Stability of Rubble-Mound Breakwater using H_{50} Wave Height Parameter". *Coastal Eng*, Vol.59, No.1, pp.38-45, 2012.
- [2] Mol A, Groeneveld RL, and Waanders AJ, "Safety and Reliability of Breakwaters". *Proceedings of 19th Conference on Coastal Engineering*, Houston, Texas, 1984.
- [3] Hanzawa M, and Sato H, Takahashi S, Shimosako K, Takayama T, Tanimoto K, "New Stability Formula for Wave-Dissipating Concrete Blocks Covering Horizontally Composite Breakwaters", *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng.*, American Society of Civil Engineering, Orlando, pp.1665-1678, 1996.
- [4] Ergin A, and Balas CE, "Reliability-Based Risk Assessment of Rubble Mound Breakwaters under Tsunami Attack". *J Coastal Res*, Vol.36, pp.266-272, 2002.
- [5] Kim DH, and Park WS, "Neural Network for Design and Reliability Analysis of Rubble Mound Breakwaters", *Ocean Engineering*, Vol.32, pp.1332-1349, 2005.
- [6] Kim SW, and Suh KD., "Evaluation of Target Reliability Indices and Partial Safety Factors for Sliding of Caisson Breakwaters", *Journal of Coastal Research*, SI 64, *Proceedings of the 11th International Coastal Symposium*, pp.622-626, 2011.
- [7] Lee CE, Kim G, and Kim SU, "Stochastic Reliability Analysis of Armor Units of Rubble-Mound Breakwaters under the Multiple Loads". *Journal of Coastal Research*, Vol.65, pp.308-313, 2013.
- [۸] بالی، م.، کریمیایی طبرستانی، م.، جندقی علایی، م.، "طراحی آرمور موج‌شکن‌های توده سنگی بر اساس قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک-مطالعه موردی: بندر نوشهر" *نشریه دریا فنون*، شماره ۴، نسخه ۲، صفحه ۵۳ تا ۶۳، ۱۳۹۶.
- [9] Alises A, Molina R, Gomez R, Pery P, and Castillo C, "Overtopping Hazards to Port Activities: Application of a new methodology to Risk Management (PORT Risk Management Tool), *Reliability Eng & Sys Safety*, Vol.123, pp.8-20, 2014.
- [10] احمدی، ح. و نیک نژاد، آ.، "ارزیابی قابلیت اعتماد موج‌شکن‌های توده سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری امواج" *نشریه دریا فنون*، شماره ۴، نسخه ۳، صفحه ۶۰ تا ۷۲، ۱۳۹۶.
- [11] Romano, A., Bellotti, G., Briganti, R., and Franco, L., "Uncertainties in the Physical Modelling of the Wave Overtopping over a Rubble Mound Breakwater: The Role of the Seeding Number and of the Test Duration", *Coastal Engineering*, Vol.103, pp.15-21, 2015.