

طراحی آرمور موج‌شکن‌های توده سنگی بر اساس قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک - مطالعه موردی: بندر نوشهر

میثم بالی^۱، مجتبی کریمایی طبرستانی^۲، مجید جندقی علایی^۳

Karimaei@srttu.edu

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب (سواحل و بنادر)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
 ۲- استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
 ۳- دکتری مهندسی سواحل و بنادر

چکیده

با توجه به توسعه روزافزون استفاده از موج‌شکن‌های توده سنگی در محیط‌های دریایی، طراحی آرمور برای این موج‌شکن‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. اما مکانیزم خرابی این موج‌شکن‌ها بسیار پیچیده بوده است و عدم قطعیت‌های زیادی در برآورد پارامترهای تعیین اندازه سنگ وجود دارند. عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در این پارامترها باعث می‌گردد تا نیاز به مطالعه جدی برای اطمینان از پایداری موج‌شکن حاصل گردد. در تحقیق حاضر، بعد از بررسی موارد مختلف عدم قطعیت پارامترهای موثر بر پایداری آرمور، طراحی آن به صورت احتمالاتی و بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان مورد توجه قرار می‌گیرد. بر این اساس، پس از ارزیابی عدم قطعیت موجود در پارامترهای هیدرودینامیکی و سازه‌ای، اقدام به طراحی آرمور سنگی در بندر نوشهر به عنوان مطالعه موردی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های وزن آرمور طراحی از یک توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند. با استفاده از داده‌های این توزیع مشخص شد که احتمال پایداری آرموری با وزن ۱۳۰۰۰ کیلوگرم در صورتی که طوفان ۵۰ سال در محل موج‌شکن بندر نوشهر رخ دهد، در حدود ۹۵ درصد است.

واژگان کلیدی: موج‌شکن توده سنگی، وزن آرمور، عدم قطعیت، ارزیابی ریسک، قابلیت اطمینان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۲/۱۲

۱ - مقدمه

عدم قطعیت بعدی که در مسیر طراحی مشاهده می‌شود، تغییرات عمق آب به‌خصوص برای دریاچه‌های بسته مانند دریای خزر می‌باشد. به‌عنوان مثال، بررسی کلی تغییرات دریای خزر نشان داده است که دامنه تغییرات تراز سطح آب در دریای خزر در طی ۱۵۰ سال اخیر، حدود ۴ متر است. کم‌ترین و بیشترین مقدار تراز سطح آب در طی ۱۵۰ سال اخیر به ترتیب در سال ۱۹۸۰ و ۱۸۸۰ بوده است. تراز سطح آب در این سال‌ها به ترتیب ۲۹/۴- و ۲۵/۴- ثبت شده است. همچنین دامنه تغییرات فصلی در طی یک سال به کمتر از یک متر در سال می‌رسد. با توجه به وابستگی ارتفاع موج به تغییرات عمق آب عدم قطعیت‌های بعدی به واسطه عمق آب در ارتفاع موج مشاهده می‌شود.

معمولاً در مسیر طراحی موج‌شکن، پیروی موج طرح بعد از مشخص شدن ارتفاع موج طرح و با رابطه توانی $T_m = aH_s^b$ تعیین خواهد شد. که در آن پارامترهای a و b ضرایب ثابتی هستند که بر اساس موقعیت هر منطقه تعیین می‌شوند و پارامتر H_s ارتفاع موج شاخص می‌باشد. اگر چه در تعیین دقیق این ضرایب ثابت نیز عدم قطعیت‌هایی وجود دارد، اما در این پژوهش از اثر آن صرف‌نظر شده و تنها عدم قطعیت‌های مربوط به تأثیر امواج در محاسبات پیروی لحاظ می‌شود.

پارامتر تأثیرگذار دیگری که در طراحی موج‌شکن‌ها مؤثر است، مدت زمان وزش طوفان می‌باشد. این پارامتر به‌صورت تعداد موج در طراحی موج‌شکن‌ها در نظر گرفته می‌شود. معمولاً تعداد امواج برای طراحی (N_w) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_w = \frac{t}{T_m} \quad (1)$$

در رابطه بالا t زمان وزش طوفان و T_m پیروی موج می‌باشد. هم برای تعیین مدت وزش طوفان و هم برای تعیین مقدار پیروی موج عدم قطعیت وجود دارد که باید تأثیرات آن را در طراحی در نظر گرفت.

در نهایت پارامتر مهم و تأثیرگذار دیگری که تأثیر بسزایی در تعیین مقدار تناژ سنگ‌ها دارد جرم مخصوص سنگ‌های مورد استفاده می‌باشد. برای تهیه سنگ معمولاً از سنگ‌های یک یا چند معدن در منطقه با جرم مخصوص‌های متفاوت استفاده خواهد شد. اما در طراحی سنگ‌ها از یک جرم مخصوص برای سنگ‌ها در نظر گرفته می‌شود. این عدم

امروزه به دلیل توسعه روزافزون در جهت استفاده از منابع دریایی و همچنین رشد صنعت حمل‌ونقل دریایی، تلاش بسیاری در جهت توسعه محیطی امن و آرام برای پهلوگیری شناورها انجام شده است. یکی از مهم‌ترین سازه‌هایی که جهت ایجاد حوضچه آرامش در بندرگاه برای تأمین ورود مطمئن کشتی‌ها به آبراهه‌ها و بنادر ساخته می‌شود موج‌شکن است. موج‌شکن‌ها دارای انواع مختلفی هستند که انتخاب هر یک از انواع آن‌ها بر اساس شرایط مختلف صورت می‌گیرد. در این میان، یکی از پرکاربردترین موج‌شکن‌هایی که در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی هستند. با توجه به هزینه بالای ساخت موج‌شکن‌ها، طراحی صحیح آن‌ها هم از جهت کارایی و هم از نظر اقتصادی کاملاً ضروری به نظر می‌رسد. در موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی، یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی، طراحی لایه سنگ آرمور است که در واقع محافظ لایه‌های زیرین است. طراحی دقیق آرمور با شناخت تمامی عوامل تأثیرگذار بر روی خرابی موج‌شکن، امکان‌پذیر است. اما با شناخت پارامترهای قابل اندازه‌گیری و تأثیرگذار مانند ارتفاع موج، دوره تناوب موج، شیب ساحل، شیب موج‌شکن و جنس سنگ‌ها می‌توان طراحی نسبتاً دقیقی انجام داد. در طراحی موج‌شکن‌های سنتی، تعیین ابعاد قطعات لایه آرمور معمولاً بر اساس محاسبه عدد پایداری صورت می‌گیرد.

اگرچه تعیین دقیق پارامترهای مؤثر می‌تواند در طراحی دقیق سنگ‌های موج‌شکن‌ها مؤثر باشد، اما در واقعیت، این پارامترها معمولاً با عدم قطعیت‌های بسیاری روبه‌رو هستند. این عدم قطعیت‌ها در تعیین پارامترهای تأثیرگذاری مانند ارتفاع موج، عمق آب، پیروی موج، جرم مخصوص سنگ و زمان طوفان دیده می‌شود.

برای تعیین امواج طراحی از توزیع‌های مختلف احتمالاتی استفاده می‌شود که بر اساس آن ارتفاع موج مربوط به دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه می‌شود. بر این اساس موجی که برای دوره بازگشت مشخص احتمال وقوع آن تنها یک بار است تعیین می‌شود. نکته مهم و حائز اهمیت مشاهده عدم قطعیت‌ها در انتخاب ارتفاع موجی است که بر اساس توزیع‌های مختلف بدست آمده است.

اخیراً استفاده از روش‌های تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان با توجه به قابلیت بالای آن‌ها در بهینه نمودن طرح‌های مهندسی و بالا بردن توان مدیریتی پروژه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به ساخت و ساز گسترده‌ای که در کشور وجود دارد، کاربردی نمودن این روش‌ها در طراحی سازه‌های مختلف می‌تواند بسیار مفید باشد. در مسائل مهندسی دریا عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و تئوری‌ها، هم در مرحله تحلیل و هم طراحی، منجر به لزوم استفاده از روش‌های احتمالاتی می‌شود. 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 به‌کارگیری سازه است. آنالیزهای قابلیت اطمینان یک چهارچوب منظم و سازمان‌دهی شده را برای کمی کردن عدم قطعیت‌های مدل فراهم می‌کند [۵]. 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 به‌منظور 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 آنالیز قابلیت اطمینان و دیگر روش‌های احتمالاتی در تحلیل مسائل مختلف علم هیدرولیک مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه تلاش‌های گسترده‌ای برای آنالیز قابلیت اطمینان پایداری سازه‌های هیدرولیکی مختلف نظیر پایه پل ناشی از پدیده آبشستگی انجام شده است [۶، ۷]. مزمل و سیدیکو (۲۰۱۲) یک مدل احتمالاتی بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان و ارزیابی ریسک برای محاسبه عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل ارائه نمودند [۸]. در این تحقیق که اثر غیر یکنواختی دانه‌های رسوب نیز در نظر گرفته شده است از روش قابلیت اطمینان مرتبه اول (FORM) که یک روش تقریبی در تحلیل قابلیت اطمینان است استفاده شد. همچنین این محققین با انجام تحلیل حساسیت نشان دادند که در بین پارامترهای مختلف موثر بر عمق آبشستگی، عدد فرود جریان بیشترین تأثیر را بر روی مقدار عمق آبشستگی و همچنین سطح ایمنی پایه پل دارد. سلامتیان و همکاران (۲۰۱۳) نیز یک مدل

قطعیت می‌بایست در مقدار جرم مخصوص سنگ‌ها لحاظ شود.

با توضیحات ذکر شده مشخص شده است که برای تعیین تناژ سنگ‌های لایه آرمور عدم قطعیت‌های بسیاری وجود دارد که تأثیر آن‌ها در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. روابط مختلفی برای تعیین تناژ سنگ‌های لایه آرمور وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روابط هادسن [۱]، فن در میر [۲] و اعتماد شهیدی و بالی [۳]، قدیمی و همکاران [۴] اشاره کرد. در این مطالعه برای تعیین تناژ سنگ‌ها از رابطه فن در میر [۲] استفاده خواهد شد.

رابطه فن در میر [۲] برای تعیین عدد پایداری (N_s) در موج شکن‌های توده سنگی سنتی به صورت زیر بیان شده است:

$$N_s = 6.2 S_d^{0.2} P^{0.18} N_w^{-0.1} \zeta_m^{-0.5} \quad \text{for} \begin{cases} \zeta_m < \zeta_{mc} \\ \cot \alpha \leq 4 \end{cases} \quad (2)$$

$$N_s = 1.0 S_d^{0.2} P^{-0.13} N_w^{-0.1} \zeta_m^p \cot \alpha^{0.5} \quad \text{For} \begin{cases} \zeta_m \geq \zeta_{mc} \\ \cot \alpha > 4 \end{cases} \quad (3)$$

رابطه (۲) برای امواج شیرجه‌ای و رابطه (۳) برای امواج لغزشی ارائه شده است.

در این روابط α زاویه شیب جداره موج شکن نسبت به افق، P پارامتر میزان نفوذپذیری موج‌شکن، ζ_m پارامتر تشابه شکست موج و همچنین N_s به عنوان عدد پایداری موج محسوب می‌شوند که عبارتند از:

$$\zeta_m = 1.25 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s}} T_m \quad (4)$$

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad (5)$$

در رابطه فوق D_{n50} میانگین اندازه سنگ‌ها و $\Delta = \rho_s / \rho - 1$ است که در آن ρ و ρ_s به ترتیب چگالی آب و سنگ می‌باشند.

عدد بی‌بعد S_d در روابط (۲) و (۳) را که از حاصل تقسیم سطح فرسایش یافته به مربع میانگین اندازه سنگ‌ها بدست می‌آید، خرابی گویند. شرایط تغییر از موج شیرجه‌ای به موج لغزشی توسط رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\zeta_{mc} = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.5)} \quad (6)$$

مقدار پیشنهادی پارامتر P نیز بین ۰/۱ برای هسته نفوذناپذیر تا مقدار ۰/۶ برای هسته نفوذپذیر است.

¹ First Order Reliability Method

۲- عدم قطعیت‌های موجود در برآورد اندازه آرمور
به‌طور کلی عدم قطعیت‌های موجود در برآورد اندازه آرمور بر روی موج‌شکن را می‌توان به‌صورت زیر تقسیم نمود.

الف- عدم قطعیت‌های مربوط به مدل که ناشی از شرایط تعیین معادلات تجربی تعیین اندازه آرمور می‌باشد. به این معنی که این معادلات معمولاً در شرایط آزمایشگاهی تعیین شده و در نتیجه استفاده از آن‌ها در شرایط واقعی می‌تواند با تقریب همراه باشد.

ب- عدم قطعیت‌های هیدرودینامیکی که ناشی از برآورد پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر ارتفاع و پریود موج برای طوفان طرح می‌باشد. این نوع عدم قطعیت با افزایش طوفان طرح بیشتر می‌شود. چراکه ثبت داده‌های موج در دریاها بخصوص در کشور ایران کمتر از ۵۰ سال می‌باشد و در نتیجه برای برآورد طوفان‌های طرح بزرگ آینده نیاز به روش‌های احتمالاتی و درون‌یابی می‌باشد که از منابع اصلی عدم قطعیت می‌باشند.

ج- عدم قطعیت‌های پارامترهای مؤثر ناشی از برآورد نامطمئن پارامترهای مختلف مؤثر بر تعیین اندازه دانه‌های آرمور در معادله طراحی موردنظر می‌باشد. برای مثال با توجه به اینکه تعیین دقیق زمان وزش طوفان ممکن نیست در نتیجه نمی‌توان برآورد دقیقی از پارامتر تعداد امواج طراحی (N_w) انجام داد.

۳- روش تحلیل قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان یک سیستم عبارت است از احتمال عملکرد رضایت‌بخش سیستم تحت شرایط محیطی مشخص و برای زمان معین. برای ارزیابی قابلیت اطمینان پایداری آرمور بر روی موج‌شکن دو پارامتر، یکی مربوط به اندازه آرمور پایدار موردنیاز به علت نیروهای جریان اعمالی (تقاضای سیستم که با S نشان داده می‌شود) و دیگری اندازه آرمور موجود (ظرفیت سیستم که با R نشان داده می‌شود)، در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و ظرفیت

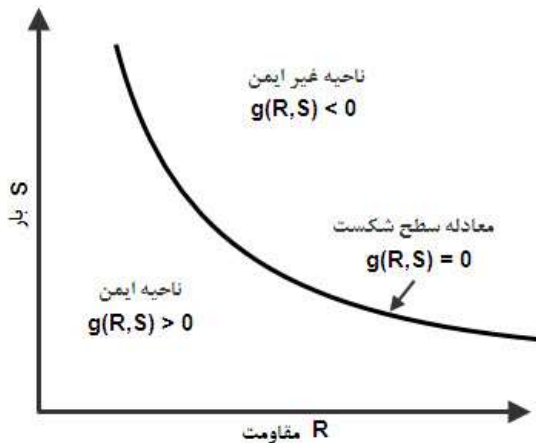
احتمالاتی برای محاسبه سطح ایمنی پل‌ها ناشی از پدیده آب‌سستگی ارائه نمودند. در این تحقیق اثر توام پایه و کوله در نظر گرفته شد و از روش شبکه بی‌زین^۱ برای محاسبه ریسک شکست و یا بلعکس سطح ایمنی پل استفاده شد [۹]. همچنین مطالعات مختلفی برای طراحی سنگچین در اطراف پایه پل به صورت احتمالاتی و بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان انجام گرفته است [۱۰، ۱۱]. کریمایی و همکاران (۱۳۹۴) اقدام به ارائه یک روش احتمالاتی برای محاسبه اندازه سنگچین پایدار در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش نمودند [۱۲]. در این تحقیق برای محاسبه ریسک موجود در پارامترهای مختلف مؤثر بر اندازه سنگچین از روش شبیه سازی مونت کارلو^۲ استفاده شده است. با توجه به نتایج این تحلیل، این امکان برای طراح وجود دارد که با استفاده از سطح ریسک قابل قبول اقدام به طراحی اندازه سنگچین پایدار نماید. در نتیجه این تلاش‌ها ضمن معرفی روش‌های طراحی جدید، راه برای ارائه طرحی بهینه متناسب با نیازهای مهندسی هموارتر شده است.

در مورد سازه‌های دریایی نیز از روش تحلیل قابلیت اطمینان استفاده شده است. لونت و بالاس [۱۳] استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان را ابزار مفیدی برای طراحی سازه‌های دریایی معرفی کردند. محققین مختلفی تاثیرات تغییرات اقلیم و عدم قطعیت‌های موجود در تغییرات سطح آب را بر تغییرات خط ساحلی [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]، پایداری سازه‌های دریایی [۲۰، ۲۱، ۱۸، ۱۹]، زیست بوم شناسی [۲۲، ۲۳] و همچنین سیلاب شهری [۲۴، ۲۵] مورد بررسی قرار دادند.

بررسی مراجع مختلف نشان می‌دهد که تاکنون تحلیل قابلیت اطمینان برای طراحی سازه حفاظتی آرمور بر روی موج‌شکن انجام نگرفته است. بر این اساس، در تحقیق حاضر یک روش احتمالاتی با توجه به تحلیل قابلیت اطمینان برای برآورد اندازه پایدار آرمور ارائه می‌شود. بر این اساس، عدم قطعیت‌های موجود در پدیده شکست آرمور شناسایی شده و اقدام به برآورد اندازه پایدار آرمور در یک سطح ایمنی قابل قبول می‌گردد. در مطالعه حاضر، عدم قطعیت موجود در پارامترهای هیدرولیکی مربوط به طوفان طراحی در محل یک نمونه موج‌شکن به‌عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

² Monte Carlo Simulation Techniques

¹ Bayesian Network



شکل (۱) نمایش منحنی سطح شکست برای یک پدیده.

اگر متغیرهای تصادفی ناهمبسته باشند، تابع چگالی احتمال ترکیبی به حاصل ضرب توابع چگالی احتمال به وجود آمده از تک تک متغیرها تبدیل می شود. معادله فوق یک معادله عمومی برای حل تمامی مسائل قابلیت اطمینان می باشد و به نام معادله اساسی قابلیت اطمینان شناخته می شود. در عمل بدست آوردن تابع چگالی احتمال ترکیب غیرممکن است. همچنین انتگرال گیری موردنظر نیز چندان ساده نخواهد بود. برای رفع این مشکل، از روش های تقریبی استفاده می شود. این روش ها به دو نوع کلی روش های تحلیلی تقریبی^۲ به عنوان نمونه روش قابلیت اطمینان مرتبه اول^۳ (FORM) و روش قابلیت اطمینان مرتبه دوم^۴ (SORM) و همچنین روش های شبیه سازی^۵ نظیر روش شبیه سازی مونت کارلو^۶ تقسیم می شوند [۵].

همان گونه که بیان شد 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 [۲۶]. در این روش ضمن استفاده از تقریب مرتبه اول سری تیلور برای تابع سطح شکست، از اطلاعات ممان های اول و دوم آمار (میانگین و واریانس) استفاده می شود. نسل اول این روش صرفاً در نظر گرفتن ممان های آماری و بدون توجه به توزیع متغیرها تنها از توزیع نرمال برای هر متغیر استفاده

سیستم به صورت تابع چگالی احتمال^۱ (PDF) نشان داده می شود، در نتیجه میزان ریسک موجود ناشی از احتمال رخداد شکست یا $P(R < S)$ عبارت است از [۲۶]:

$$P_f = P(\text{failure}) = P(R < S) \\ = \int_0^{\infty} \left[\int_0^S f_R(r) dr \right] f_S(s) ds \quad (7)$$

که در آن $f_S(s)$ و $f_R(r)$ به ترتیب PDF پارامترهای تقاضا و ظرفیت سیستم می باشند. بر این اساس، اولین قدم در ارزیابی قابلیت اطمینان و یا ارزیابی احتمال شکست سازه، تعیین تابع پاسخ سیستم و همچنین پارامترهای دخیل در آن تحت عنوان متغیرهای پایه می باشد. متغیرهای پایه که X_i نامیده می شوند در واقع تشکیل دهنده تابعی هستند که معیار عملکرد صحیح سیستم خواهد بود. این تابع که به صورت تابع سطح شکست یا حالت حدی و یا تابع رفتار سیستم تعریف می شود، عبارت است از:

$$Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (8)$$

معادله سطح شکست که مرز ناحیه ایمن طراحی را مشخص می کند، می تواند با توجه به شرایط مسئله تعریف شود. این معادله، می تواند یک معادله ساده و یا تابعی صریح و یا غیرصریح از متغیرهای تصادفی پایه باشد. در شکل (۱) منحنی یک معادله سطح شکست نشان داده شده است. به عنوان نمونه در مورد موج شکن معادله سطح شکست و یا تابع Z در معادله (۸) می تواند اختلاف اندازه آرمور موجود بر روی موج شکن (R) و اندازه آرمور مورد نیاز با توجه به شرایط موج و موج شکن (S) به صورت $Z = R - S$ باشد. بنابراین با توجه به معادله (۸) در تابع g مقادیر کمتر از صفر شکست تابع و خرابی موج شکن به علت شکست آرمور را منجر می شوند و مقادیر بیشتر از صفر نشان دهنده پایداری آرمور و ایمنی موج شکن می باشد (شکل (۱)).

بر این اساس شکست وقتی اتفاق می افتد که $Z < 0$ باشد. لذا احتمال شکست به صورت زیر محاسبه می شود [۲۶]:

$$P_f = \iiint_{g(x) < 0} f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) dx_1 dx_2 dx_3 \dots dx_n \quad (9)$$

که در آن $f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ تابع چگالی احتمال ترکیبی برای متغیرهای پایه X_1, X_2, \dots, X_n است و انتگرال گیری روی تمام سطح شکست انجام شده است.

⁴ Second Order Reliability Method

⁵ Simulation Method

⁶ Monte Carlo Simulation Techniques

¹ Probability Density Function

² Analytical Approximations Methods

³ First Order Reliability Method

روش برای ارزیابی دقت روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان دیگر استفاده می‌شود [۶].

در تحقیق حاضر، تعیین اندازه آرمور با توجه به تحلیل قابلیت اطمینان بر روی یک نمونه موج‌شکن موجود مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور از روابط تجربی ارائه شده در معادلات (۱) تا (۶) استفاده می‌گردد. همچنین برای شبیه‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در مدل از روش مونت کارلو استفاده می‌گردد. در واقع در این روش، بر اساس توزیع آماری هر یک از پارامترهای روابط (۲) و (۳)، به اندازه کافی نمونه داده تولید شده است. سپس با استفاده از روابط ذکر شده یک سری داده برای اندازه آرمور بدست آمد. در نهایت با اعمال یک تابع توزیع به داده‌های بدست آمده و استفاده از خصوصیات PDF و CDF^۳ تابع توزیع داده‌ها، مقدار آرمور پایدار با توجه به میزان سطح ریسک (و یا احتمال شکست) قابل محاسبه خواهد بود.

۴- مطالعه موردی - بندر نوشهر

بندر نوشهر یکی از مهم‌ترین و باسابقه‌ترین بنادر شمالی کشور می‌باشد. این بندر در موقعیت ۵۱/۵۱ درجه طولی و ۳۶/۶۶ درجه شرقی قرار دارد. ساخت بندر نوشهر در سال ۱۳۰۹ هجری خورشیدی با مشارکت شرکت‌های بورورکس (هلند) و آگرم (بلژیک) آغاز شد و در سال ۱۳۱۸ به بهره‌برداری رسید. شکل (۲) نمایی از موقعیت و جانمایی فعلی بندر نوشهر نشان داده شده است. بهره‌برداری از بندر نوشهر در سالیان اخیر دچار مشکلاتی شده است. رسوب‌گذاری شدید در پشت بازوی غربی و عبور و ته‌نشینی آن در مقابل دهانه بندر مشکلاتی را به جهت عبور و مرور شناورها ایجاد کرده است. به همین جهت به منظور رفع مشکلات رسوبی طرح اصلاح جانمایی موج‌شکن‌ها به صورت شکل (۳) توسط شرکت مهندسی مشاور پویا طرح پارس ارائه شده است [۲۷]. با توجه به طرح پیشنهادی مشخص می‌شود که بخش‌هایی از بندر نیاز به موج‌شکن توده سنگی دارد. در ادامه به طراحی مقطع بازوی غربی با و بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود.

می‌نمود. روش مرتبه اول ممان دوم^۱ (FOSM) نامیده می‌شود. در حالی که در روش مرتبه اول ممان دوم پیشرفته^۲ (AFOSM) با به کارگیری توزیع متغیرها به صورت تبدیل توزیع هر متغیر تصادفی به توزیع نرمال معادل به حل مسئله می‌پردازد. در هر حال استفاده از این روش برای بررسی قابلیت اطمینان پدیده‌هایی که تابع سطح شکست در آن‌ها غیرخطی بوده و توزیع متغیرها در آن‌ها توزیع نرمال نباشد می‌تواند خطاهای بزرگی را ایجاد نماید [۶].

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 [۶]. 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. در حالی که در روش‌های شبیه‌سازی، 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 روش‌های شبیه‌سازی نظیر روش شبیه‌سازی مونت کارلو، از هر متغیر تصادفی چندین بار نمونه‌برداری می‌شود تا توزیع واقعی آن مطابق با ویژگی‌های آماری بدست آید. برای این منظور، در هر نوبت یک سری اعداد تولید خواهند شد که تا حدودی مشخص‌کننده ویژگی‌های آماری هستند. سپس مسئله در هر نوبت به صورت محاسباتی حل می‌شود. به این عمل چرخه شبیه‌سازی گویند. با استفاده از چندین چرخه شبیه‌سازی، ویژگی‌های آماری مسئله بدست می‌آید.

مسئله مهم در بکارگیری روش‌های شبیه‌سازی به عنوان نمونه روش مونت کارلو، میزان دقت آن است. تعداد نمونه‌گیری‌ها و یا همان اعداد تولید شده در تعیین سطح اعتماد-پذیری شبیه‌سازی، مؤثر است. در واقع اگر تعداد نمونه‌ها از هر متغیر مؤثر به اندازه کافی انتخاب شود، روش شبیه‌سازی مونت کارلو یک روش دقیق است. در بعضی موارد نیز از این

³ Cumulative Density Function

¹ First Order Second Moment

² Advanced First Order Second Moment

برای سنگ‌های موج‌شکن (W_{50}) بر اساس رابطه (۳) حدود ۸۳۶۲ کیلوگرم تخمین زده 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 [۲۷]. به منظور تخمین ارتفاع امواج طرح برای دوره بازگشت ۵۰ سال از چهار تابع احتمالاتی ویبول، گامبل، نمایی و لوگ پیرسون استفاده شده است. توابع ذکر شده ارتفاع موج حدی در آب عمیق را با در نظر گرفتن حد بالا و پایین اطمینان^۱، بین ۵/۵ تا ۸ متر پیش‌بینی می‌کنند. رابطه بین ارتفاع موج و پریود نیز در این منطقه و بر اساس ۳۱ سال داده امواج به صورت $T_m = 6.03H_s^{0.3558}$ تخمین زده شده است. بنابراین پریود بیشینه موج در آب عمیق بین ۱۱ تا ۱۲/۵ ثانیه تخمین زده می‌شود.

در تحقیق حاضر به کمک مدل عددی مایک ۲۱، SW مراحل انتقال و انتشار امواج از آب عمیق به آب کم‌عمق و پای سازه برای شش حالت مختلف صورت گرفته است. این شش حالت با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی برای دو ارتفاع موج و سه حالت تغییرات عمق آب در مجموع شش حالت را به وجود آورده است. جدول (۱) مشخصات شرایط مختلف هیدرودینامیکی را برای دوره بازگشت ۵۰ سال نشان می‌دهد. امواج برای دو ارتفاع ۸ و ۵/۵ متر با پریود به ترتیب ۱۲/۵ و ۱۱ ثانیه و همچنین برای دو حالت حدی تراز سطح آب و یک حالت متوسط تراز سطح آب انتشار داده شده است. نتایج مدل عددی نشان داده است که بازه تغییرات امواج در محدوده ۲/۱ تا ۴/۲ ثانیه متغیر بوده است. همچنین پریود میانگین امواج نیز بین ۹/۲ تا ۱۱/۵ ثانیه متغیر بوده است.



شکل (۲) نمایی از جانمایی فعلی بندر نوشهر.



شکل (۳) نمای پیشنهادی برای طرح توسعه بندر نوشهر.

۴-۱- مراحل محاسبه پارامترهای مؤثر در طراحی موج‌شکن بندر نوشهر

طراحی صورت گرفته برای موج‌شکن غربی (عمق حدود ۶/۲۵ متر) بر اساس ارتفاع موج (H_s) ۳/۵ متر، پریود میانگین (T_m) ۹ ثانیه، تعداد موج (N_w)، خرابی متوسط (S_d) ۳، شیب موج‌شکن $\cot \alpha = 1/5$ ، جرم مخصوص سنگ (ρ_s) ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، پارامتر نفوذپذیری (P) ۰/۴، دوره بازگشت ۵۰ سال و تراز -۲۷ متر نسبت به سطح آب‌های آزاد بوده است. تناژ بدست آمده

جدول (۱) بررسی حالت‌های مختلف احتمال وقوع ارتفاع و پریود موج.

حالت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ارتفاع موج بر حسب متر (آب عمیق)	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵
تراز سطح آب (متر)	-۲۹/۴	-۲۵/۴	-۲۷	-۲۹/۴	-۲۵/۴	-۲۷
پریود بیشینه (ثانیه)	۱۱	۱۱	۱۱	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵
ارتفاع موج بر حسب متر (پای سازه)	۲/۱	۴/۱	۳/۵	۲/۳	۴/۲	۳/۷
پریود میانگین (ثانیه)	۹/۲	۹/۲	۹/۲	۱۱/۵	۱۱/۵	۱۱/۵

^۱ Confidence Limit

به‌گونه‌ای که مقادیر پارامترهای توزیع لوگ‌نرمال برای نمونه‌گیری بیش از آن تقریباً ثابت مانده است. در شکل (۴) هیستوگرام چگالی احتمال ۱۰۰۰ نمونه آرمور شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. در این شکل محور قائم تابع چگالی احتمال (PDF) است. با توجه به این شکل مشخص است در صورتی که وزن آرمور مورد استفاده ۷۷۰۵/۹ کیلوگرم باشد احتمال پایداری آن تنها ۵۰٪ می‌باشد و بنابراین استفاده از آن قابل توصیه نیست. با تحلیل مشخصات توزیع لوگ نرمال ارائه شده و همچنین استفاده از تابع احتمال تجمعی (CDF) در شکل (۴) می‌توان وزن آرمور لازم را با توجه به احتمال پایداری یافت. در جدول (۳) مقادیر مختلف وزن آرمور بر روی موج‌شکن بندر نوشهر با توجه به احتمال پایداری آن‌ها ارائه شده است. با توجه به این جدول احتمال پایداری آرموری با وزن ۹۸۳۶ کیلوگرم در صورتی که طوفان ۵۰ سال رخ دهد، برابر با ۸۰ درصد است که با افزایش آن به مقدار ۱۳۲۶۴ کیلوگرم (حدود ۳۵ درصد افزایش) این مقدار به حدود ۹۵ درصد می‌رسد. این موضوع به این معناست که ریسک پذیرفته شده در طراحی آرمور با احتمال پایداری ۹۵ درصد برابر با ۵ درصد است که قابل پذیرش می‌باشد.

از آنجا که شکست آرمور می‌تواند منجر به تخریب کل موج‌شکن شود، در اینجا فرض بر آن است که احتمال پایداری آرمور، همان احتمال پایداری موج‌شکن باشد. بر این اساس طراح می‌تواند با استفاده از جدول (۳) و انتخاب احتمال پایداری آرمور اقدام به طراحی نماید. در انتخاب احتمال پایداری آرمور عواملی چون اهمیت پروژه و مسائل اقتصادی درگیر می‌باشند. همان‌گونه که قبلاً بیان شد در طراحی صورت گرفته به‌صورت قطعی، وزن آرمور برابر با ۸۳۶۲ کیلوگرم در نظر گرفته شد.

همچنین 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. بر این اساس بازه تغییرات تعداد امواج حدود ۱۸۰۰ تا ۴۸۰۰ موج می‌باشد.

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. جدول (۲) محدوده تغییرات پارامترهای مؤثر بر طراحی آرمور سنگی بر روی بازوی غربی موج‌شکن توده سنگی بندر نوشهر را نشان می‌دهد. نکته دیگر اینکه مقدار ضریب اصلاح مدل در تحلیل قابلیت اطمینان حاضر به‌صورت قطعی و برابر با ۱ فرض شده است. این بدان معناست که روابط (۲) و (۳) که از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده است را می‌توان بدون هیچ مشکلی در طراحی واقعی بکار برد.

۵- نتایج

برای شبیه‌سازی عدم قطعیت موجود در پارامترهای روابط (۳) و (۴)، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو اقدام به تولید ۱۰۰۰ داده برای هر پارامتر با توجه به اطلاعات جدول (۲) می‌شود. به این ترتیب اندازه لازم برای آرمور با توجه به این ۱۰۰۰ نمونه محاسبه می‌گردد. بررسی فراوانی اندازه آرمور نشان می‌دهد که این داده‌ها از یک توزیع لوگ‌نرمال با مقدار میانگین ۷۷۰۵/۹ کیلوگرم و پارامترهای $\mu=8.82$ و $\sigma=0.37$ تبعیت می‌کنند. شایان ذکر است که تعداد ۱۰۰۰ نمونه با توجه به روش سعی و خطا بدست آمده است

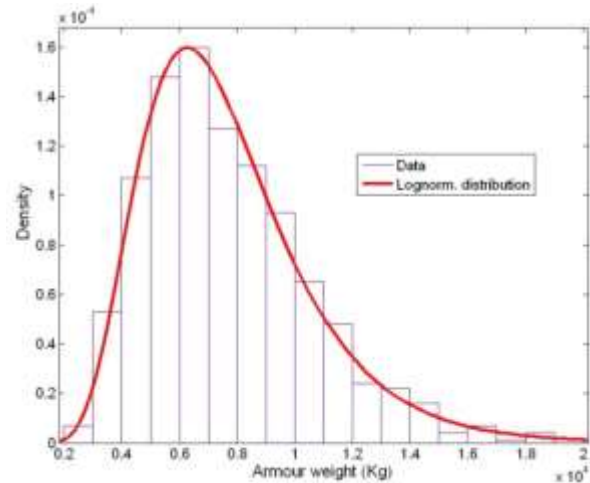
جدول (۲) محدوده تغییرات پارامترهای مؤثر در طراحی وزن آرمور بر روی موج‌شکن بندر نوشهر.

پارامتر	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	توزیع	میانگین	واریانس
$\rho_w(\text{Kg/m}^3)$	۱۰۱۰	۱۰۲۵	Uniform	-	-
$\rho_s(\text{Kg/m}^3)$	۲۶۰۰	۲۸۰۰	Uniform	-	-
H_s (m)	۲/۱	۴/۲	Triangular	۳/۱۵	-
T_m (s)	۹/۲	۱۱/۵	Triangular	۱۰/۳۵	-
t (hr)	۶	۱۲	Triangular	۹	-
S_d	۲	۵	Uniform	-	-
P	۰/۳	۰/۵	Normal	۰/۴	۰/۰۵
$\text{Cot } \alpha$	۱/۵	۱/۵	Normal	۱/۵	۰/۰۵
ضریب اصلاح مدل	۱	۱	قطعی	-	-

شده است. در این روش عدم قطعیت‌های موجود در برآورد اندازه لازم آرمور نظیر عدم قطعیت‌های مربوط به مدل، عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و در نهایت عدم قطعیت‌های پارامترهای مؤثر بررسی شد. با استفاده از این روش، طراح موج‌شکن می‌تواند با توجه به مسائل مدیریتی و اقتصادی و با در نظر گرفتن ریسک شکست نسبت به انتخاب اندازه لازم آرمور اقدام کند.

برای نشان دادن قابلیت این روش تحلیل در تحقیق حاضر، تعیین اندازه پایدار آرمور با توجه به تحلیل قابلیت اطمینان بر روی موج‌شکن بندر نوشهر به‌عنوان مطالعه موردی مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور از مدل تجربی ارائه شده توسط فن‌درمیر [۲] استفاده شده است. با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، بر اساس توزیع آماری هر یک از پارامترهای مدل تجربی، به اندازه کافی نمونه داده تولید شده است. سپس با استفاده از مدل تجربی، یک سری داده برای وزن آرمور بدست آمد. نتایج تحلیل نشان داد که توزیع داده‌های مربوط به وزن آرمور بر روی موج‌شکن بندر نوشهر به‌صورت لوگ‌نرمال بوده که با استفاده از مشخصات این توزیع و PDF آن می‌توان احتمال شکست آرمور را با توجه به اندازه آن بدست آورد. به‌عنوان نمونه احتمال پایداری آرمور سنگی با وزن ۹۸۳۶ کیلوگرم در صورتی که طوفان ۵۰ سال رخ دهد، برابر با ۸۰ درصد است که با افزایش آن به مقدار ۳۵ درصد این مقدار به حدود ۹۵ درصد می‌رسد. این موضوع به این معناست که ریسک پذیرفته شده در طراحی آرمور با احتمال پایداری ۹۵ درصد برابر با ۵ درصد است که قابل پذیرش می‌باشد. با استفاده از نتایج این تحلیل، طراح می‌تواند با توجه به احتمال پایداری موج‌شکن که عواملی چون اهمیت پروژه و مسائل اقتصادی درگیر می‌باشند، اقدام به طراحی آرمور سنگی نماید.

به این ترتیب نتایج تحقیق حاضر نشان داد که پایداری موج‌شکن تابعی از عدم قطعیت‌های موجود می‌باشد. پیش از این و در طراحی‌هایی که برای موج‌شکن توسط مهندسی مشاور انجام می‌گردید مقدار تناژ موج‌شکن به صورت متقن تعیین می‌شد. به عنوان مثال و در مورد موج‌شکن بندر نوشهر مقدار تناژ به صورت قطعی و با استفاده از رابطه تجربی حدود ۸۳۶۲ کیلوگرم بوده است. مطالعه حاضر نشان داد که احتمال پایداری موج‌شکنی با این تناژ حدود ۷۰ درصد است.



شکل (۴) تابع چگالی احتمال ۱۰۰۰ نمونه آرمور شبیه‌سازی شده برای طوفان ۵۰ ساله در محل بندر نوشهر.

جدول (۳) وزن مختلف آرمور بر روی موج‌شکن بندر نوشهر با توجه به احتمال پایداری.

وزن آرمور (کیلوگرم)	احتمال پایداری (درصد)
3000	0.9
4000	5.8
5000	16.5
6000	31.4
7000	47.1
8000	61.3
9000	72.7
10000	81.2
11000	87.3
12000	91.6
13000	94.4
14000	96.3
15000	97.6
16000	98.4
17000	99.0
18000	99.3
19000	99.5

با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان انجام شده و تابع معکوس احتمال تجمعی توزیع لوگ‌نرمال مربوط به آرمور مشخص می‌گردد که احتمال پایداری این آرمور در صورتی که طوفان ۵۰ ساله رخ دهد حدوداً برابر با ۶۶ درصد می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر یک روش احتمالاتی بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو، با توجه به تحلیل قابلیت اطمینان برای برآورد اندازه پایدار آرمور بر روی سازه موج‌شکن ارائه

۶- مراجع

- [14] Revell D. L, Battalio R., Spear B., Ruggiero P., and Vandever J., "A Methodology for Predicting Future Coastal Hazards Due to Sea Level Rise on the California Coast", *Clim Change*, Vol.109, pp.251-276, 2011.
- [15] Sánchez-Arcilla A., Mösso C., Sierra J. P., Mestres M., Harzallah, A., Senouci, M., and El Raey, M., "Climate Drivers of Potential Hazards in Mediterranean Coasts", *Reg. Environ. Change*, Vol.11, pp.617-636, 2011.
- [16] Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., and Marcomini, A., "Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change Hazards at the Regional Scale: the Case Study of the North Adriatic Sea. *Nat Hazards*", *Earth Syst. Sci.*, Vol.12, pp.2347-2368, 2012.
- [17] Monioudi I. N., Karditsa, A., Chatzipavlis, A., Alexandrakakis, G., Andreadis O. P., Velegrakis, A. F., Poulos, S. E., Ghionis, G., Petrakis, S., Sifnioti, D., Hasiotis, T., Lipakis, M., Kampanis, N., Karambas, T., and Marinos, E., "Assessment of Vulnerability of the Eastern Cretan Beaches (Greece) to Sea Level Rise", *Reg. Environ. Change*, Vol.16, No.7, pp.1951-1962, 2016.
- [18] Chini, N., and Stansby, P. K., "Extreme Values of Coastal Wave Overtopping Accounting for Climate Change and Sea Level Rise", *Coast Eng.*, Vol.65, pp.27-37, 2012.
- [19] Isobe, M., "Impact of Global Warming on Coastal Structures in Shallow Water", *Ocean Eng.*, Vol.71, pp.51-57, 2013.
- [20] Lee, C. E, Kim, S. W., Park, D. H., and Suh, K. D., "Risk Assessment of Wave Run-up Height and Armor Stability of Inclined Coastal Structures Subject to Long-Term Sea Level Rise", *Ocean Eng.*, Vol.71, pp.130-136, 2013.
- [21] Burcharth, H. F., Andersen, T. L., and Lara, J. L., "Upgrade of Coastal Defense Structures against Increased Loadings Caused by Climate Change: A First Methodological Approach", *Coast Eng.*, Vol.87, pp.112-121, 2014.
- [22] Reynolds, M. H., Berkowits, P., Coutrot, K. N., and Krause, C. M., "Predicting Sea-Level Rise Vulnerability of Terrestrial Habit and Wildlife of the Northwestern Hawaiian Islands", U.S. Geological Survey Open-File Report, 2012.
- [23] Kane, H. H., Fletcher, C. H. , Frazer, L. N., and Barbee, M. M., "Critical Elevation Levels for Flooding Due to Sealevel Rise in Hawaii", *Reg. Environ. Change*, Vol.15, No.8, pp.1679-1687, 2015.
- [24] Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., and Wood, R. M., "Assessing Climate Change Impacts, Sea Level Rise and Storm Surge Risk in Port Cities: A Case Studying Copenhagen", *Clim. Change*, Vol.104, pp.113-137, 2011.
- [25] Paudel, Y., Botzen, W. J. W., and Aerts, J. C. J. H., "Influence of Climate Change and Socio-Economic Development on Catastrophe Insurance: a Case Study of Flood Risk Scenarios in the Netherlands", *Reg. Environ. Change*, pp.1-8, 2015.
- [1] Hudson, R. Y., "Design of Quarry Stone Cover Layer for Rubble Mound Breakwaters", Research Report No. 2-2, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Centre, Vicksburg, MS. 1958.
- [2] Van der Meer, J. W., "Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack", PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 1988.
- [3] Etemad-Shahidi, A., and Bali, M., "Stability of Rubble-Mound Breakwater using H_{50} Wave Height Parameter", *Coast. Eng.*, Vol.59, pp.38-45. 2011.
- [۴] قدیمی، پرویز، کلاهدوزان، مرتضی، بالی، میثم. "بررسی اثر عمق آب در پایداری موج‌شکن توده سنگی"، فصلنامه علمی - پژوهشی دریا فنون، سال ۳، شماره ۲، صفحات ۷۳-۸۲. ۱۳۹۵
- [5] Nowak, A. S., and Collins, K. R., *Reliability of Structures*, McGraw Hill, Singapore, 2000.
- [6] Johnson, P. A., and Dock, D. A., "Probabilistic Bridge Scour Estimates", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.124, No.7, pp.750-754. 1998.
- [7] Yanmaz, A. M., and Ustun, I., "Generalized Reliability Model for Local Scour around Bridge Piers of Various Shapes.", *Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol.25, No.6, pp.687-698, 2001.
- [8] Muzzammil, M., and Siddiqui, N. A., "A Reliability-based Assessment of Bridge Pier Scour in Non-Uniform Sediments", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.47, No.3, pp.372-380, 2012.
- [9] Salamatian, S. A., Zarrati, A. R., and Banazadeh, M., "Assessment of Bridge Safety Due to Scour by Bayesian Network", *the Institution of Civil Engineers - Water Management*, Vol.136, No.8, pp.341-350, 2013.
- [۱۰] کریمایی طبرستانی، م. و زراتی، ا.، "طراحی سنگچین در اطراف پایه‌های پل بر اساس آنالیز قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک- مطالعه موردی پل بونر"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۳.
- [۱۱] کریمایی طبرستانی، م. و روشن، ر. "کاربرد آنالیز قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک در طراحی سنگچین جهت حفاظت از بستر رودخانه در محل پایه‌های پل"، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۴.
- [۱۲] کریمایی طبرستانی، م.، سلامتیان، ا. و روشن، ر. "طراحی سنگچین در پایین‌دست حوضچه آرامش بر اساس آنالیز قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک- مطالعه موردی بند انحرافی کن"، چهاردهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، آبان ۱۳۹۴.
- [13] Ko, M. L., and Balas, C. E., "Reliability Analysis of a Rubble Mound Breakwater using the Theory of Fuzzy Random Variables", *Appl. Ocean Res.*, Vol.39, pp.83-88, 2013.

[26] Halder, A., and Mahadevan, S. "Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design", John Wiley & Son, P: 161, New York, 2000.

[۲۷] گزارش میانکار مطالعات مرحله دوم موج شکن بندر نوشهر، سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۹۳