

## ارزیابی قابلیت اعتماد موج شکن های توده سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری امواج

حمید احمدی، آرش نیک‌نژاد

h-ahmadi@tabrizu.ac.ir

۱- استادیار، دانشکده فنی- مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده فنی- مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

### چکیده

گسیختگی ناشی از روگذری، بر اثر سرریز شدن بیش از حد مجاز آب از روی تاج موج شکن رخ می‌دهد. مدل‌های متعددی برای پیش‌بینی روگذری موج در انواع مختلف سازه‌های ساحلی ارائه شده است. تحلیل قابلیت اعتماد سازه با لحاظ کردن عدم قطعیت‌های موجود در شرایط محیطی و پاسخ سازه، درک بهتری از این مدل‌ها در اختیار طراح سازه گذاشته و این امکان را فراهم می‌سازد که توازن مناسبی بین تراز ایمنی سازه و هزینه پروژه ایجاد گردد. در این مقاله، قابلیت اعتماد موج شکن‌های توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری امواج با استفاده از ۵ روش مختلف بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته و در هر حالت، مقادیر شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی به دست می‌آیند. نقش پارامترهای مختلف به صورت کیفی و کمی روی احتمال گسیختگی بررسی شده و این پارامترها به لحاظ میزان اهمیت رتبه‌بندی می‌شوند. در نهایت با استفاده از تحلیل رگرسیون غیر خطی و بر مبنای نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، رابطه‌ای برای تعیین فاصله آزاد بر حسب تراز ایمنی هدف پیشنهاد می‌شود. با استفاده از این رابطه، می‌توان مقدار فاصله آزاد را بر حسب شاخص قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی، و حساسیت این دو پارامتر نسبت به هزینه تعیین نمود. نتایج نشان دادند که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در نتایج تحلیل قابلیت اعتماد موج شکن توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری، ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) است. تحت اثر امواج شکننا، تیزی موج در مقایسه با دبی روگذری مجاز تأثیر بیشتری روی شاخص قابلیت اعتماد موج شکن توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری دارد. در حالی که تحت اثر امواج ناشکنا، تأثیر دبی روگذری مجاز بیشتر است. پس از سه پارامتر ارتفاع موج شاخص، تیزی موج، و دبی روگذری مجاز، به ترتیب ضریب  $A_v$ ، ضرایب اصلاحی کاهنده ( $\gamma$ )، و شیب موج شکن ( $\tan \alpha$ ) به لحاظ تأثیرگذاری روی احتمال گسیختگی در رتبه‌های چهارم تا ششم قرار دارند.

واژگان کلیدی: موج شکن توده‌سنگی، روگذری موج، ارزیابی قابلیت اعتماد، تحلیل حساسیت، فاصله آزاد، رگرسیون بی‌زی.

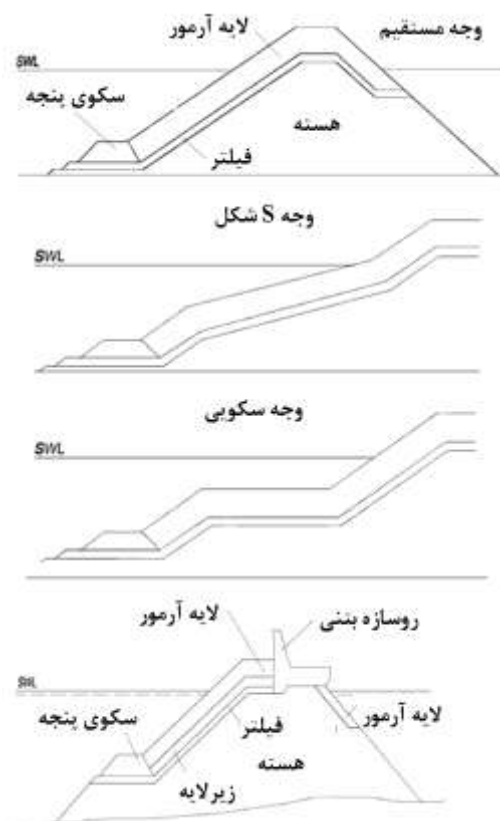
تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۶/۰۷/۱۲

## ۱- مقدمه

وظیفه موج شکن توده سنگی<sup>۱</sup> (مطابق شکل (۱)) مصون نگه داشتن ناحیه‌ای ساحلی، که معمولاً جهت بندرسازی مورد توجه قرار گرفته، از حمله امواج و تلاطم‌های طبیعی دریا است تا در پناه آن امکان پیشبرد عملیات بندری در محدوده‌ای آرام و ایمن میسر گردد.

روگذری موج<sup>۲</sup> یکی از مهم‌ترین واکنش‌های هیدرولیکی است که باید در طراحی موج شکن‌های توده سنگی در نظر گرفته شود. تخمین صحیح و قابل اطمینان میزان روگذری موج در سازه‌های ساحلی امری مهم در طراحی و ارزیابی ایمنی این سازه‌ها است. در دهه‌های اخیر تلاش‌های متعددی برای مدل‌سازی و تحلیل روگذری موج صورت گرفته است. اکثر مدل‌سازی‌ها به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته و حاوی نتایج بسیار ارزشمندی بوده است.



شکل (۱) انواع موج شکن توده سنگی: با شیب مستقیم، با شیب S شکل، با شیب سکویی، و با روسازه بتنی.

این مطالعات منجر به ارائه یک سری روابط نیمه تجربی جهت پیش‌بینی میزان دبی متوسط روگذری، به صورت تابعی از شرایط محیطی و خصوصیات موج شکن شده است. از جمله معتبرترین این روابط می‌توان به روابط Owen [۱] و [۲] برای موج شکن‌های نفوذناپذیر با وجه صاف یا زیر و شیب مستقیم یا سکویی، Allsop و Bradbury [۳] برای موج شکن‌های نفوذناپذیر با آرمور سنگی و دیوار محافظ تاج، Aminti و Franco [۴] برای موج شکن‌های دارای آرمور سنگی یا آرمور بتنی از نوع Cube و Ahrens، Tehrapod و Heimbaugh [۵] برای ۷ نوع طرح متفاوت از دیواره‌های دریایی، Pedersen و Burcharth [۶] برای موج شکن‌های نفوذناپذیر با آرمور سنگی و دیواره محافظ تاج، var der Meer و Janssen [۷] برای موج شکن‌های نفوذناپذیر با وجه صاف یا زیر و شیب مستقیم یا سکویی، Franco و همکاران [۸] برای موج شکن‌های قائم و Pedersen [۹] برای موج شکن‌های نفوذناپذیر با آرمور سنگی و دیواره محافظ تاج اشاره کرد. البته برخی از این روابط پیچیدگی شکست امواج در آب کم عمق را در نظر نگرفته و دبی روگذری را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند [۱۰]. علاوه بر کارهای آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی پدیده روگذری نیز توسط برخی محققین بررسی شده است [۱۱ و ۱۲].

Du و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۰ تأثیر روگذری موج را روی هیدرودینامیک و فورمودینامیک موج شکن‌های موازی ساحل مدل‌سازی کردند. Yeganeh-Bakhtiary و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۰ جریان ماندگار و آشفتگی‌های موجود در جریان جلوی موج شکن قائم با روگذری موج را مطالعه نمودند. Andersen و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۱ آزمایش‌های با مقیاس کوچک و بزرگ جهت تعیین روگذری در موج شکن‌های توده سنگی را مورد مقایسه قرار دادند. Vicinanza و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۴ نوع جدیدی از موج شکن‌های توده سنگی را جهت تبدیل انرژی روگذری موج معرفی نمودند. Moghim و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵ روگذری موج از موج شکن‌های سکویی تغییر شکل پذیر را بر مبنای شار مومنتوم موج مورد مطالعه قرار دادند. Romano و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۵ عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌سازی فیزیکی پدیده روگذری

<sup>2</sup> Wave Over Topping

<sup>1</sup> Rubble-Mound Breakwater

ضرایب کاهنده، به صورت کیفی و کمی روی احتمال گسیختگی بررسی شده و این پارامترها به لحاظ میزان اهمیت رتبه‌بندی می‌شوند. در نهایت با استفاده از تحلیل رگرسیون غیر خطی و بر مبنای نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، رابطه‌ای برای تعیین فاصله آزاد بر حسب تراز ایمنی هدف پیشنهاد می‌شود. با استفاده از این رابطه، می‌توان مقدار فاصله آزاد را بر حسب شاخص قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی، و حساسیت این دو پارامتر نسبت به هزینه تعیین نمود.

#### ۲- تعیین دبی روگذری متوسط

در پژوهش حاضر، به منظور تعیین دبی روگذری متوسط، از روابطی که van der Meer و Janssen [۷] برای موج‌شکن‌های توده‌سنگی ارائه نموده‌اند، استفاده شده است. این روابط برای موج‌شکنی با وجه نفوذناپذیر، با شیب مستقیم یا سکویی قابل استفاده‌اند. اثر کم‌عمق بودن آب، زبری سطح سازه، مایل بودن راستای برخورد موج، و تاج کوتاه بودن امواج برخوردی در این روابط لحاظ شده است:

برای  $2 < \xi_{op}$ :

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\tan \alpha} = 0.06 \exp \left[ -5.2 \frac{R_c \sqrt{s_{op}}}{H_s \tan \alpha \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right] \quad (1)$$

برای  $\xi_{op} > 2$ :

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.2 \exp \left[ -2.6 \frac{R_c}{H_s \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right] \quad (2)$$

$\xi_{op}$  پارامتر تشابه شکست<sup>۲</sup> است که نوع شکست موج را مشخص کرده و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}} \quad (3)$$

در رابطه اخیر،  $s_{op}$  تیزی موج بوده و برابر است با:

$$s_{op} = 2\pi H_s / g T_p^2 \quad (4)$$

که  $T_p$  پریود موج متناظر با نقطه پیک در طیف موج است. در روابط (۱) و (۲)،  $q$  دبی روگذری متوسط از واحد طول موج‌شکن (m<sup>3</sup>/s بر m)،  $g$  شتاب گرانش (m/s<sup>2</sup>)،  $H_s$  ارتفاع موج شاخص (m)،  $s_{op}$  تیزی موج،  $\alpha$  زاویه وجه شیب‌دار موج‌شکن با افق،  $R_c$  فاصله آزاد (m) مطابق شکل

در موج‌شکن‌های توده‌سنگی را بررسی کرده و نقش مدت زمان تست و تعداد Seeding را مطالعه نمودند. Tofany و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۶ اثرات فعالیت امواج روی روگذری و آب‌شستگی در موج‌شکن‌های قائم را بررسی کردند. Wesley و Cheung [۲۰] در سال ۲۰۱۶ روگذری موج از سازه‌های قائم را با استفاده از حل‌کننده HLLS Riemann مورد بررسی قرار دادند. Zanuttigh و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۶ یک شبکه عصبی پیشرفته جهت پیش‌بینی مقادیر حدی و مقادیر قابل قبول برای دبی روگذری ارائه نمودند. Hughes و Thornton [۲۲] در سال ۲۰۱۶ دبی متغیر زمانی و حجم تجمعی را در روگذری امواج منفرد مورد ارزیابی قرار دادند.

برای طراحی مطلوب و ایمن سازه، دبی متوسط روگذری به دست آمده از این طریق باید از دبی روگذری مجاز، که توسط آئین‌نامه‌ها و راهنماهای معتبر نظیر CEM [۲۳] تعیین می‌شود، کمتر باشد. دبی مجاز به نوع سازه، کاربری آن، و سطح ایمنی مورد انتظار بستگی دارد.

با توجه به اهمیت موج‌شکن‌ها و عواقبی که خرابی این سازه‌ها می‌تواند در پی داشته باشد، ارزیابی قابلیت اعتماد (قابلیت اطمینان)<sup>۱</sup> آن‌ها، با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌هایی که در شرایط محیطی و پاسخ سازه وجود دارد، ضروری به نظر می‌رسد. گسیختگی ناشی از روگذری، بر اثر سرریز شدن بیش از حد مجاز آب از روی تاج موج‌شکن رخ می‌دهد. تحلیل قابلیت اعتماد درک بهتری از مدل‌های متعدد ارائه شده برای پیش‌بینی روگذری موج در اختیار طراح سازه گذاشته و این امکان را فراهم می‌سازد که توازن مناسبی بین تراز ایمنی سازه و هزینه پروژه ایجاد گردد.

در این مقاله، قابلیت اعتماد موج‌شکن‌های توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری امواج، بر مبنای روابط van der Meer و Janssen [۷] که دارای مقبولیت عام بوده و به طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی و خصوصیات سازه-ای قابل اعمال هستند، با استفاده از ۵ روش مختلف بررسی و مورد مقایسه می‌گیرد. در هر حالت، مقادیر شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی به دست می‌آیند. نقش پارامتر تشابه شکست موج، ارتفاع موج شاخص، دبی روگذری مجاز، تیزی موج، شیب موج‌شکن، فاصله آزاد تاج موج‌شکن، و

<sup>2</sup> Surf Similarity Parameter

<sup>1</sup> Reliability

تئوری قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی<sup>۳</sup> سازه را، با تعیین این که آیا توابع حالت حدی<sup>۴</sup> از مقدار مجاز فراتر رفته‌اند یا خیر، ارزیابی می‌کند. در واقع، تابع حالت حدی می‌تواند ناحیه ایمن و ناحیه گسیختگی را از هم تفکیک کند. به عنوان مثال، سیستمی را در نظر بگیرید که بار وارد بر آن با S معرفی شده و مقاومت برای مود گسیختگی مورد نظر با R نشان داده شده است. در این صورت رابطه زیر به عنوان تابع حالت حدی سیستم مورد نظر تعریف می‌شود:

$$g(X, Y) = R(X) - S(Y) \quad (۶)$$

توجه شود که مقاومت و بار وارده مثال‌هایی برای یک مفهوم کلی‌تر هستند. مثلاً R می‌تواند تغییر شکل مجاز و S تغییر شکل موجود باشد. در هر صورت، R و S توابعی از متغیرهای تصادفی مختلف X و Y هستند، که هر کدام بر اساس توابع چگالی احتمالشان، مشخص می‌شوند. در واقع X و Y می‌توانند به صورت برداری از متغیرهای تصادفی مختلف معرفی شوند. در حالت کلی، در هر مسئله مهندسی، تعدادی متغیر تصادفی وارد عمل می‌شوند. مثلاً در مسائل سازه‌ای، مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، مشخصات هندسی نظیر طول و سطح مقطع، و بارهای وارده می‌توانند متغیرهای مسئله باشند. در این صورت، تابع حالت حدی برحسب تمامی متغیرهای تصادفی یعنی  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  و  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$  نوشته خواهد شد.

با توجه به رابطه (۶)، می‌توان سناریوهای مختلفی را برای یک سیستم تعریف نمود. مثلاً چنانچه  $g(X, Y) > 0$  باشد، سازه در ناحیه ایمن قرار دارد و عملکرد مطلوب است و چنانچه  $g(X, Y) < 0$  باشد، سازه در ناحیه گسیختگی قرار داشته و عملکرد نامطلوب است و در نهایت زمانی که  $g(X, Y) = 0$  باشد، تابع حالت حدی مرز بین ناحیه ایمن و ناحیه گسیختگی را نشان می‌دهد. این ناحیه رویه گسیختگی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه شده، احتمال گسیختگی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_f = \Pr[g(X, Y) < 0] \quad (۷)$$

محاسبه احتمال گسیختگی در یک مسئله قابلیت اعتماد، معادل با حل یک انتگرال چندگانه است:

$$P_f = \Pr[g(X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_m) < 0] \quad (۸)$$

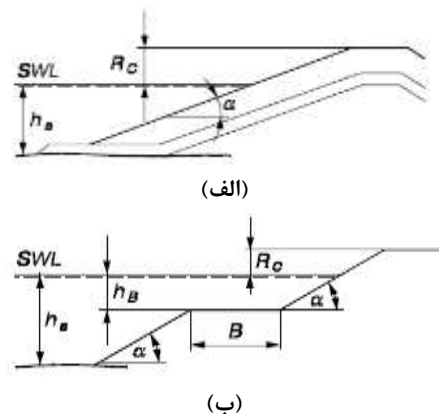
(۲)،  $\gamma_r$  ضریب کاهنده جهت لحاظ نمودن زبری سطح موج‌شکن،  $\gamma_b$  ضریب کاهنده جهت لحاظ نمودن اثرات وجود سکو روی شیب،  $\gamma_h$  ضریب کاهنده جهت لحاظ نمودن کم‌عمق بودن آب، و  $\gamma_\beta$  ضریب کاهنده جهت لحاظ نمودن مایل بودن راستای برخورد موج است. محدوده کاربرد رابطه (۲) به شکل زیر است:

$$0.3 < \frac{R_c \sqrt{S_{op}}}{H_s \tan \alpha \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} < 2 \quad (۵)$$

برای آشنایی با نحوه محاسبه این ضرایب کاهنده، می‌توان به جدول VI-5-11 در فصل پنجم از بخش ششم CEM [۲۳] مراجعه نمود. حاصل ضرب این ۴ ضریب کاهنده نباید کمتر از ۰/۵ در نظر گرفته شود.

### ۳- تحلیل قابلیت اعتماد

به کمک تحلیل قابلیت اعتماد سیستم‌های سازه‌ای، می‌توان عدم قطعیت‌های ناشی از ماهیت تصادفی پارامترهای سازه‌ای و محیطی را به صورت روابط ریاضی در آورده و ملاحظات ایمنی و عملکردی را به طور کمی وارد روند طراحی نمود. در این روش، برخلاف روش‌های معمول تحلیل و طراحی سازه‌ها، فضای تحلیل و طراحی از حالت قطعی خارج شده و به فضای احتمالاتی وارد می‌شود. در تحلیل و طراحی احتمالاتی، هر پارامتر به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و با یک تابع چگالی احتمال (PDF)<sup>۱</sup> مشخص می‌گردد.



شکل (۲) پارامترهای هندسی پروفیل موج‌شکن توده‌سنگی: (الف) شیب مستقیم، (ب) شیب سکویی.

<sup>3</sup> Limit-state functions

<sup>4</sup> Failure Surface

<sup>1</sup> Probability Density Function

<sup>2</sup> Failure Probability

$\beta$  که یک پارامتر بی بعد است، به عنوان معیاری برای میزان قابلیت اعتماد در نظر گرفته می شود. در صورتی که تابع حالت حدی، تک بعدی باشد  $(g(X, Y) = g(X))$ ، پارامتر  $\beta$  می تواند به عنوان معیاری برای فاصله حاشیه اطمینان میانگین<sup>۱</sup> از رویه گسیختگی در نظر گرفته شود. در واقع، ایده تعریف  $\beta$  این است که فاصله موقعیت نقطه میانگین  $(\mu_g)$  از رویه گسیختگی  $(g = 0)$  می تواند شاخصی برای میزان قابلیت اعتماد باشد. چرا که هرچه این فاصله بیشتر باشد، مساحت کوچکتری از تابع چگالی احتمال  $g(X)$  در قسمت منفی  $g$  قرار گرفته و در نتیجه احتمال گسیختگی  $(P_f)$  کوچکتر خواهد بود (مطابق شکل (۳)).

تاکنون روش های مختلفی ارائه شده است که با استفاده از آن ها می توان فرآیند حل انتگرال متناظر با احتمال گسیختگی را ساده سازی و تسهیل نمود. برای این کار می توان تابع  $g(X, Y)$  را با بسط سری تیلور آن جایگزین نمود که بسته به مرتبه سری تیلور مورد استفاده، منجر به روش های قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) و مرتبه دوم (SORM) خواهد شد. راه حل دوم این است که از روش های نمونه برداری نظیر روش شبیه سازی مونت کارلو (MCS) استفاده شود. متداول ترین روش های تحلیل قابلیت اعتماد را می توان به شکل زیر خلاصه نمود:

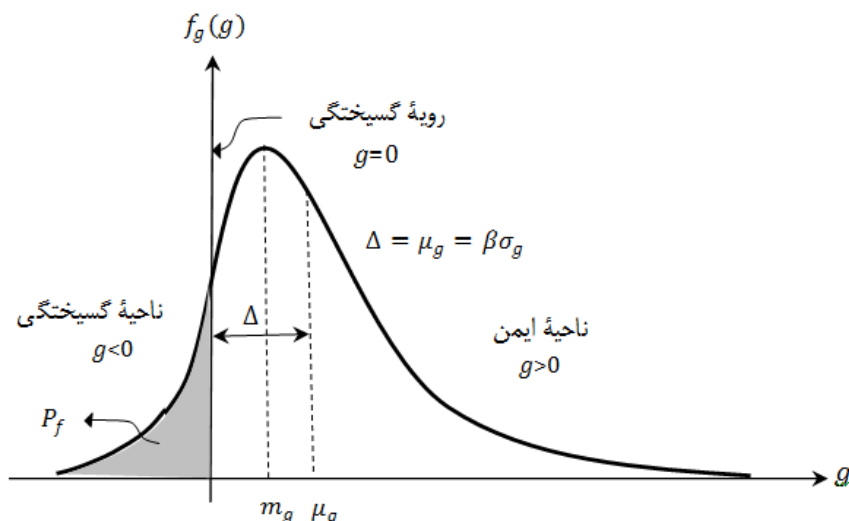
$$f_g(g)dg$$

$$= \int \int_{g(X,Y)<0} f_{R,S}(r,s)drds$$

که  $f_g(g)$  تابع چگالی احتمال تابع حالت حدی بوده و  $f_{R,S}(r,s)$  تابع چگالی احتمال توأم  $R$  و  $S$  است. حل انتگرال رابطه (۸)، بسته به تعداد متغیرهای تصادفی، تابع چگالی احتمال آن ها، و شکل تابع حدی، می تواند بسیار مشکل و وقت گیر باشد. لذا روش های مختلفی ارائه شده است که با استفاده از آن ها می توان حل انتگرال متناظر با احتمال گسیختگی را ساده سازی و تسهیل نمود. معیار سنجش قابلیت اعتماد، محاسبه احتمال عدم گسیختگی است. ولی همان طور که گفته شد، محاسبه دقیق این احتمال، در بسیاری از اوقات وقت گیر و پیچیده است. از این رو، با پذیرش چند فرض ساده کننده، به جای محاسبه دقیق احتمال گسیختگی، از پارامتر شاخص قابلیت اعتماد استفاده می شود تا حجم محاسبات کاهش پیدا کند. اگر تابع حالت حدی به شکل  $g = R - S$  تعریف شود، شاخص قابلیت اعتماد بدین گونه بیان می گردد:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (9)$$

$\mu_g$  میانگین تابع حالت حدی بوده و  $\sigma_g$  انحراف معیار تابع حالت حدی را نشان می دهد.



شکل (۳) تابع چگالی احتمال برای تابع حالت حدی و تعریف ناحیه امن و ناحیه گسیختگی.

<sup>1</sup> Mean Margin of Safety

۳-۳- نمونه برداری LHS<sup>۵</sup>

برای آشنایی با جزئیات تحلیل در این روش‌ها می‌توان به عنوان نمونه به Choi و همکاران [۲۴]، Nowak و Collins [۲۵]، و Lemaire [۲۶] مراجعه نمود.

## ۴- فرمول بندی توابع حالت حدی

گسیختگی ناشی از روگذری زمانی رخ می‌دهد که دبی متوسط روگذری از دبی روگذری مجاز، که توسط آئین‌نامه‌ها و راهنماهای معتبر نظیر CEM [۲۳] تعیین می‌شود، بیشتر باشد. با توجه به توضیحات بخش (۳) و روابط (۱) و (۲)، توابع حالت حدی برای گسیختگی ناشی از روگذری به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$g = q_a - 0.06\sqrt{gH_s^3} \frac{\tan \alpha}{s_{op}} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_\gamma \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right) \quad (10)$$

برای  $\xi_{op} < 2$ :

$$g = q_a - 0.2\sqrt{gH_s^3} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_\gamma \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right) \quad (11)$$

برای  $\xi_{op} > 2$ :

با توجه به سه وضعیت متفاوتی که برای دبی روگذری مجاز در نظر گرفته شده، ۶ تابع حالت حدی طبق جدول (۳) تعریف و شماره‌گذاری شدند.

۱- روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM):

۱-۱- روش گشتاور دوم مرتبه اول مقدار میانگین (MVFOSM)<sup>۱</sup>

۱-۲- روش هاسوفر لیند (HL)<sup>۲</sup>

۱-۳- روش هاسوفر لیند - رکویترز فیسلر (HL-RF)<sup>۳</sup>

۲- روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه دوم (SORM):

۱-۲- رابطه Breitung

۲-۲- رابطه Tvedt

۳- روش‌های نمونه برداری:

۱-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو خام یا مستقیم<sup>۴</sup>

۲-۳- نمونه برداری بر مبنای اهمیت (IS)<sup>۵</sup>

جدول (۱) خصوصیات آماری پارامترها در دبی روگذری متوسط.

ردیف	متغیر تصادفی	توزیع	میانگین	انحراف معیار
۱	$A_v$	Normal	۲/۶	۰/۳۵
۲	$\tan \alpha$	Normal	۰/۶۶۶	۰/۰۳۳
۳	$s_{op}$	Normal	۰/۰۳	۰/۰۰۸
۴	$\gamma_\gamma$	Normal	۰/۵۵	۰/۰۵۵
۵	$\gamma_b$	Normal	۱/۰	۰/۱
۶	$\gamma_h$	Normal	۱/۰	۰/۱
۷	$\gamma_\beta$	Normal	۱/۰	۰/۱
۸	$H_s$ (m)	Gumbel	۲/۴۴	۰/۳۸۹
۹	$R_c$ (m)	ثابت	۲/۷۵	---

## ۵- خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی

به منظور انجام تحلیل قابلیت اعتماد، بایستی نوع توزیع احتمال حاکم بر تمامی متغیرهای تصادفی دخیل در تابع حالت حدی و مقادیر پارامترهای آن‌ها مشخص شود. این اطلاعات برای پارامترهای دخیل در تعیین دبی روگذری متوسط، بر مبنای پژوهش Lee و Kwon [۲۷]، در جدول (۱) ارائه شده است. دبی روگذری مجاز، نیز از توزیع Gumbel تبعیت می‌کند. بر اساس داده‌های مرجع [۲۸] سه وضعیت متفاوت برای میانگین و انحراف معیار این متغیر در نظر گرفته شده است (جدول (۲)).

<sup>5</sup> Importance Sampling

<sup>6</sup> Latin Hypercube Sampling

<sup>1</sup> Mean-Value First-Order Second-Moment

<sup>2</sup> Hasofer Lind

<sup>3</sup> Hasofer Lind-Rackwitz Fiessler

<sup>4</sup> Crude or Direct MCS

جدول (۲) خصوصیات آماری دبی روگذری مجاز (m<sup>3</sup>/s/m).

انحراف معیار	میانگین	توزیع	متغیر تصادفی	ردیف
۰/۳۱	۱/۵۸	Gumbel	$q_{a1}$	۱
۰/۴۲	۲/۹۲		$q_{a2}$	۲
۰/۲۶	۱/۰۹		$q_{a3}$	۳

۶- تعیین شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی تحلیل قابلیت اعتماد به روش MVFOSM، HL-RF، SORM، MCS، و IS روی ۶ تابع حالت حدی تعریف شده، انجام و نتایج مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

جدول (۳) توابع حالت حدی تعریف شده.

تعریف تابع حالت حدی	رابطه مبنا	شماره تابع حالت حدی
$g = q_{a1} - 0.06 \sqrt{gH_s^3} \frac{\tan \alpha}{s_{op}} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_v \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right)$	(۱۰)	۱
$g = q_{a1} - 0.2 \sqrt{gH_s^3} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_v \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right)$	(۱۱)	۲
$g = q_{a2} - 0.06 \sqrt{gH_s^3} \frac{\tan \alpha}{s_{op}} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_v \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right)$	(۱۰)	۳
$g = q_{a2} - 0.2 \sqrt{gH_s^3} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_v \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right)$	(۱۱)	۴
$g = q_{a3} - 0.06 \sqrt{gH_s^3} \frac{\tan \alpha}{s_{op}} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_v \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right)$	(۱۰)	۵
$g = q_{a3} - 0.2 \sqrt{gH_s^3} \cdot \exp\left(-A_v \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} \frac{1}{\gamma_v \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}\right)$	(۱۱)	۶

تعریف شده در تابع حالت حدی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. در روش HL-RF که در واقع تعمیمی از روش HL است، متغیرهای تصادفی می‌توانند از هر توزیع احتمال دلخواهی تبعیت کنند. به همین دلیل در پژوهش حاضر از این روش به جای روش HL استفاده شده است. چنانچه تابع حالت حدی در همسایگی نقطه طرح خطی باشد، نتایج روش FORM دقیق هستند. ولی چنانچه تابع حالت حدی، یک تابع غیر خطی بوده و با استفاده از تقریب مرتبه اول این تابع، تبدیل به یک ابرصفحه شده باشد، محاسبه احتمال گسیختگی با خطای زیادی مواجه خواهد شد. مقدار  $\beta$  و مختصات نقطه طرح (MPP) به دست آمده از روش‌های FORM و SORM یکسان هستند. تفاوت اصلی، در محاسبه میزان احتمال گسیختگی می‌باشد. پس مزیت روش SORM نسبت به FORM، دقت بالای نتایج به دست آمده از این روش، برای احتمال گسیختگی است. با توجه به شکل‌های (۴) و (۵)، نتایج تحلیل FORM برای اکثر توابع، اندکی نسبت به نتایج تحلیل SORM محافظه

در این بخش، یک مقدار میانگین ثابت برابر ۲/۷۵ متر برای  $R_c$  در نظر گرفته شده است. این پارامتر در بخش (۸) بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت. نتایج به دست آمده برای شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است.

با توجه به این که توابع حالت حدی این مسئله به شدت غیر خطی هستند و ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی دخیل در این توابع نیز نسبتاً بزرگ هستند، تحلیل MVFOSM که تابع حالت حدی را حول نقطه میانگین خطی‌سازی می‌کند، خطای تخمین قابل توجهی خواهد داشت. شکل (۴) نشان می‌دهد که این روش، مقادیر دست بالایی برای شاخص قابلیت اعتماد به دست می‌دهد که با توجه به توضیحات ارائه شده معتبر نخواهند بود.

در روش HL هنگام تخمین تابع حالت حدی، به جای نقطه مقدار میانگین در روش MVFOSM، سری تیلور در نقطه طرح (MPP) بسط داده می‌شود. روش HL صرفاً قابل اعمال به مسائلی است که در آن‌ها همه متغیرهای تصادفی

<sup>1</sup> Most probable failure point

با توجه به شکل‌های (۴) و (۵)، از طریق مقایسه نتایج توابع زوج با توابع فرد (۱ با ۲؛ ۳ با ۴؛ ۵ با ۶) ملاحظه می‌شود که شاخص قابلیت اطمینان محاسبه شده در امواج ناشکنا ( $\xi_{op} > 2$ ) بزرگ‌تر از امواج شکنا ( $\xi_{op} < 2$ ) می‌باشد. به عبارت دیگر احتمال گسیختگی در حالت شکنا بیشتر از حالت ناشکنا است.

ضمناً مشاهده می‌شود که تابع حالت حدی شماره ۵ منجر به بیشترین احتمال گسیختگی شده است. علت این است که اولاً در این تابع، میانگین دبی روگذری مجاز ( $q_a$ ) کمترین مقدار را داشته (جدول (۲)) و ثانیاً وضعیت موج، شکنا است. به همین ترتیب، تابع حالت حدی شماره ۴ نیز به کمترین احتمال گسیختگی منجر شده است. چرا که در این تابع، میانگین دبی روگذری مجاز بیشترین مقدار را داشته و موج ناشکنا است.

#### ۷- تحلیل حساسیت

برای دانستن اهمیت یک متغیر، لازم است که تأثیر تغییرات آن متغیر روی خصوصیات یک سیستم مشخص شود. هدف از چنین مطالعه‌ای، انتخاب مهم‌ترین متغیرها به منظور کنترل آن‌ها با توجه به نقششان در تابع حالت حدی و قابلیت اعتماد سازه است.

اهمیت یک متغیر بر اساس دو معیار مشخص می‌شود:

تأثیر متغیر روی تابع حالت حدی

تأثیر متغیر روی شاخص قابلیت اعتماد

در این مقاله، فقط مورد دوم بررسی می‌شود.

کسینوس‌های هادی بردار یکه نرمال تابع حالت حدی که با نماد  $\alpha_i$  نشان داده می‌شوند، ضرایب حساسیت نامیده می‌شوند.

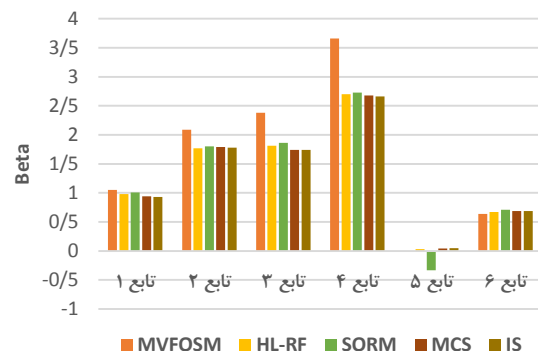
اگر مطابق شکل (۶)، نقطه طرح (MPP) با  $P^*$  نشان داده شده باشد،  $\alpha_i$  ها کسینوس‌های هادی خط  $OP^*$  می‌باشند. هرچه مقدار  $\alpha_i$  بزرگ‌تر باشد، متغیر تصادفی متناظر با آن مشارکت نسبی بیشتری در احتمال گسیختگی خواهد داشت. چرا که:

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2 = 1 \quad (12)$$

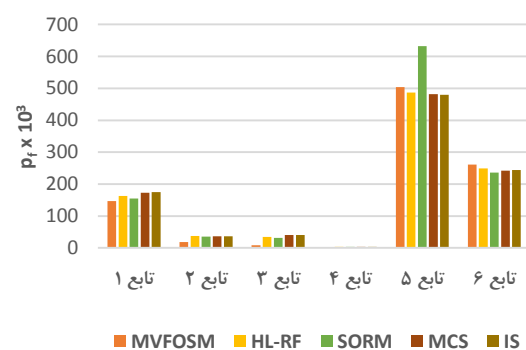
$n$ : تعداد متغیرهای تصادفی در تابع حالت حدی.

کارانه‌تر هستند. البته باید توجه داشت که زمان لازم برای محاسبات کامپیوتری تحلیل SORM بیشتر از تحلیل FORM است [۲۴]. لذا به نظر می‌رسد استفاده از روش FORM برای بررسی مسئله روگذری در موج‌شکن‌های توده‌سنگی مناسب‌تر است.

نتایج روش‌های MCS و IS که مبتنی بر نمونه‌گیری تصادفی هستند، با توجه به این که توابع حالت حدی مسئله مورد بررسی غیر خطی هستند، قابل استنادتر از روش‌های دیگر هستند. همچنین اگر نتایج MCS و IS با یکدیگر مقایسه شوند، ملاحظه می‌شود که اختلاف بسیار ناچیزی دارند. با توجه به این که تعداد نمونه‌های مورد استفاده در روش MCS به مراتب بیشتر از روش IS بوده و در نتیجه زمان‌بر است [۲۴]، برای بررسی مسئله روگذری در موج‌شکن‌های توده‌سنگی روش IS مناسب‌تر است. توابع حالت حدی با شماره‌های فرد مربوط به امواج شکنا بوده و توابع حالت حدی با شماره‌های زوج مربوط به امواج ناشکنا هستند (جدول (۳)).



شکل ۴- مقادیر شاخص قابلیت اعتماد به دست آمده به روش ۵ برای ۶ تابع حالت حدی تعریف شده



شکل ۵- مقادیر احتمال گسیختگی به دست آمده به روش ۵ برای ۶ تابع حالت حدی تعریف شده.



جدول (۴) ضریب حساسیت متغیرهای تصادفی مختلف.

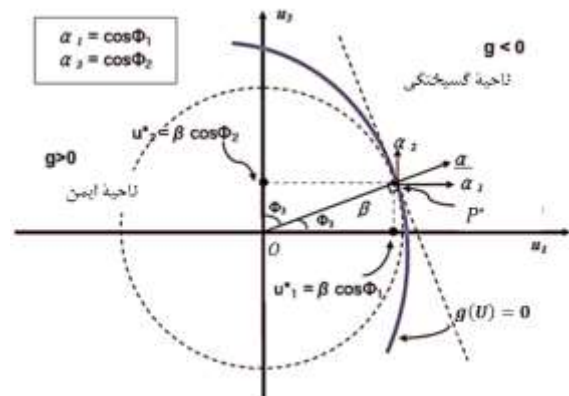
متغیر تصادفی	شماره تابع حالت حدی					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
$A_v$	-۰/۲۱	-۰/۲	-۰/۱۷	-۰/۱۶	-۰/۲۵	-۰/۲۵
$\tan \alpha$	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۴
$S_{op}$	-۰/۵۱	-۰/۲۱	-۰/۵۴	-۰/۱۷	-۰/۴۷	-۰/۲۵
$\gamma_\gamma$	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱۹	۰/۱۸
$\gamma_b$	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱۹	۰/۱۸
$\gamma_h$	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱۹	۰/۱۸
$\gamma_\beta$	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱۹	۰/۱۸
$H_s$	-۰/۷۱	-۰/۸۷	-۰/۷۵	-۰/۹۱	-۰/۶۴	-۰/۷۵
$q_a$	-۰/۲۶	-۰/۲۷	-۰/۲۱	-۰/۲۲	-۰/۳۶	-۰/۴

با توجه به جدول (۴) مشخص است که با افزایش ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ )، ضرایب اصلاحی ( $\gamma$ )، و شیب موج شکن ( $\tan \alpha$ ) احتمال گسیختگی افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش دبی روگذری مجاز ( $q_a$ )، تیزی موج ( $S_{op}$ )، و ضریب احتمال گسیختگی کاهش خواهد یافت.

نحوه و میزان تأثیر ارتفاع موج شاخص و دبی روگذری مجاز روی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی، در شکل‌های (۷) تا (۱۰) به عنوان نمونه برای تابع حالت حدی شماره ۱ نشان داده شده است.

با افزایش میانگین و انحراف معیار ارتفاع موج شاخص، شاخص قابلیت اعتماد کاهش و احتمال گسیختگی افزایش می‌یابد (شکل‌های (۷) و (۸)). با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود با افزایش یک متری میانگین ارتفاع موج شاخص (از ۲/۵ به ۳/۵ متر) احتمال گسیختگی حدود ۴ برابر می‌شود. ضمناً با توجه به شکل (۸)، با افزایش یک متری انحراف معیار ارتفاع موج شاخص (از ۰/۲۵ به ۱/۲۵ متر)، احتمال گسیختگی حدود ۳ برابر می‌شود.

با افزایش میانگین و انحراف معیار دبی روگذری مجاز، شاخص قابلیت اعتماد افزایش یافته و احتمال گسیختگی کاهش می‌یابد (شکل‌های (۹) و (۱۰)). با توجه به شکل (۹) با افزایش میانگین دبی روگذری مجاز از ۱ به ۲ ( $m^3/s/m$ )، احتمال گسیختگی از حدود ۵۰٪ به حدود ۱۰٪ کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل (۱۰) با افزایش انحراف معیار دبی مجاز از ۰/۲۵ به ۱/۲۵ ( $m^3/s/m$ )، احتمال گسیختگی حدود ۲ برابر خواهد شد.



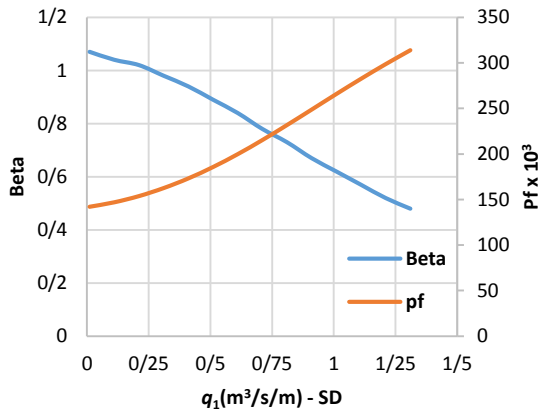
شکل (۶) ضرایب حساسیت.

مقادیر ضرایب حساسیت که توسط نرم‌افزار Rt [۲۹] محاسبه شده‌اند، در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در نتایج تحلیل قابلیت اعتماد موج شکن توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری، ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) است. پس از این متغیر، تیزی موج ( $S_{op}$ )، دبی روگذری مجاز ( $q_a$ )، ضریب  $A_v$ ، ضرایب اصلاحی کاهنده ( $\gamma$ )، و شیب موج شکن ( $\tan \alpha$ )، در توابع حالت حدی شماره ۱، ۳، ۵، به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

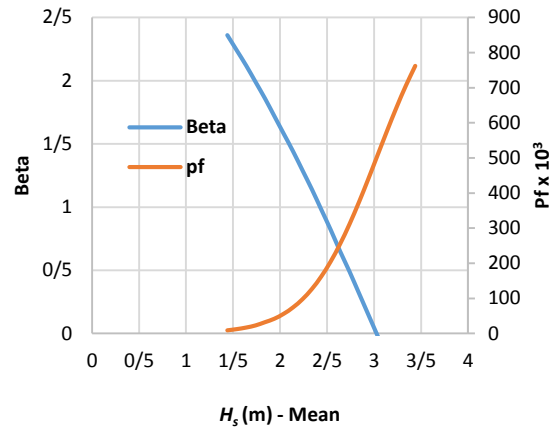
برای توابع حالت حدی شماره ۲، ۴، و ۶ نیز نتایج مشابهی به دست آمده است. با این تفاوت که در این توابع، رتبه دوم متعلق به دبی روگذری مجاز ( $q_a$ ) بوده و تیزی موج ( $S_{op}$ ) در رتبه سوم قرار دارد.

با توجه به این که توابع حالت حدی با شماره‌های فرد مربوط به امواج شکننا بوده و توابع حالت حدی با شماره‌های زوج مربوط به امواج ناشکننا هستند، نتایج فوق در واقع بدین معنی خواهند بود که تحت اثر امواج شکننا، تیزی موج در مقایسه با دبی روگذری مجاز تأثیر بیشتری روی شاخص قابلیت اعتماد موج شکن توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری دارد. در حالی که تحت اثر امواج ناشکننا، تأثیر دبی روگذری مجاز بیشتر است.

افزایش مقدار متغیرهایی که دارای ضریب حساسیت مثبت هستند، باعث کاهش شاخص قابلیت اعتماد و متعاقباً افزایش احتمال گسیختگی می‌شود. به همین ترتیب، افزایش مقدار متغیرهایی که دارای ضریب حساسیت منفی هستند، باعث افزایش شاخص قابلیت اعتماد و متعاقباً کاهش احتمال گسیختگی می‌شود.



شکل (۱۰) تأثیر انحراف معیار دبی روگذری مجاز در تابع حالت حدی شماره ۱ روی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی.



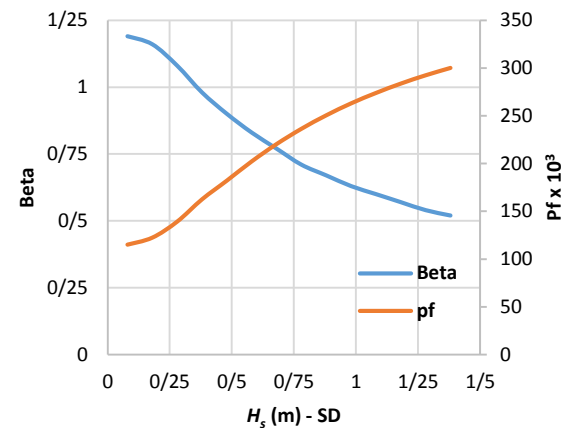
شکل (۷) تأثیر میانگین ارتفاع موج شاخص در تابع حالت حدی شماره ۱ روی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی.

#### ۸- تعیین $R_c$ بر مبنای تحلیل قابلیت اعتماد و تحلیل رگرسیون غیر خطی

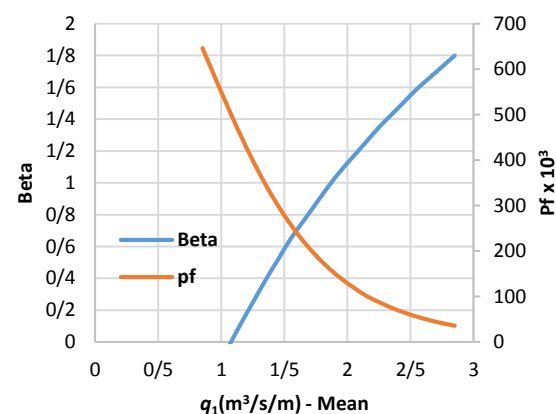
یکی از متغیرهای تصمیم‌گیری بسیار مهم در طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی، فاصله آزاد ( $R_c$ ) است که مطابق شکل (۲) به فاصله قائم بین تاج موج‌شکن و سطح آزاد آب اطلاق می‌گردد. افزایش فاصله آزاد منجر به افزایش هزینه احداث موج‌شکن شده و کاهش فاصله آزاد ممکن است موجب افزایش دبی روگذری شود. افزایش دبی روگذری متعاقباً می‌تواند منجر به ایجاد اختلال در عملکرد سازه شده و ایمنی وجه رو به ساحل موج‌شکن و تجهیزات نصب شده در این قسمت را کاهش دهد. بنابراین انتخاب یک مقدار مناسب برای فاصله آزاد به شکلی که توازن مناسبی بین هزینه و ایمنی طرح ایجاد شود، بسیار مفید خواهد بود. در این بخش از مقاله، با استفاده از تحلیل رگرسیون غیر خطی و بر مبنای نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، رابطه‌ای برای تعیین فاصله آزاد ( $R_c$ ) بر حسب تراز ایمنی هدف پیشنهاد می‌شود. با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار  $R_c$  را بر حسب شاخص قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی، و حساسیت این دو پارامتر نسبت به هزینه محاسبه نمود.

معمولاً از دو روش کلاسیک و بی‌زی برای برآورد پارامترهای مدل رگرسیون استفاده می‌شود. مدل رگرسیونی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

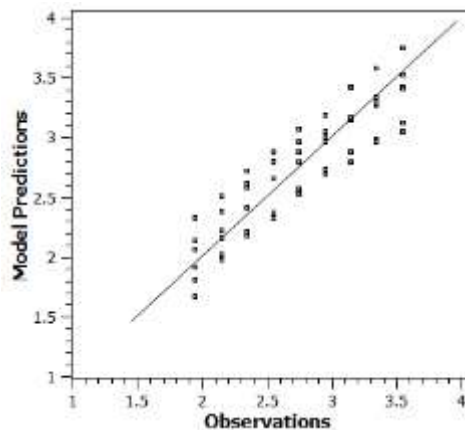
$$y = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \theta_3 x_3 + \dots + \theta_n x_n + \varepsilon \quad (13)$$



شکل (۸) تأثیر انحراف معیار ارتفاع موج شاخص در تابع حالت حدی شماره ۱ روی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی.



شکل (۹) تأثیر میانگین دبی روگذری مجاز در تابع حالت حدی شماره ۱ روی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی.



شکل (۱۱) همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش-بینی شده توسط رابطه (۱۴) برای  $R_c$

ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی،  $0.87$  است. همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه (۱۴)، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه (۱۴) با  $y$  و مقادیر مشاهداتی با  $x$  نشان داده شوند، پراکندگی داده‌ها حول خط  $y=x$  متمرکز شده است. با توجه به این موضوع که بیانگر انطباق مناسب مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهداتی است و نظر به این که با توجه به ماهیت پیچیده مسئله، مقدار به دست آمده برای ضریب همبستگی، قابل قبول تلقی می‌شود، می‌توان گفت که رابطه پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردار است.

#### ۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، قابلیت اعتماد موج‌شکن‌های توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری امواج با استفاده از ۵ روش مختلف بررسی و مورد مقایسه قرار گرفت. در هر حالت، مقادیر شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی به دست آمدند. نقش پارامتر تشابه شکست موج، ارتفاع موج شاخص، دبی روگذری مجاز، تیزی موج، شیب موج‌شکن، فاصله آزاد تاج موج‌شکن، و ضرایب کاهنده، به صورت کیفی و کمی روی احتمال گسیختگی بررسی شده و این پارامترها به لحاظ میزان اهمیت رتبه‌بندی شدند. در نهایت با استفاده از تحلیل رگرسیون غیر خطی و بر مبنای نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، رابطه‌ای برای تعیین فاصله آزاد ( $R_c$ ) بر حسب تراز ایمنی هدف پیشنهاد شد. با استفاده از این رابطه، می‌توان مقدار  $R_c$  را بر حسب شاخص قابلیت

در رابطه اخیر،  $\gamma$  کمیتی است که مدل سعی در پیش‌بینی آن دارد که پاسخ مدل، متغیر وابسته، خروجی، یا پاسخ نامیده می‌شود و در این پژوهش همان فاصله آزاد ( $R_c$ ) است.  $\theta_i$  ها پارامترهای مدل یا ضرایب رگرسیون هستند. در رویکرد بیزی، این مقادیر نیز متغیرهای تصادفی بوده و دارای میانگین، انحراف معیار و تابع توزیع هستند. ولی در رویکرد کلاسیک، این مقادیر قطعی می‌باشند.  $x_i$  ها متغیرهای مستقل قابل اندازه‌گیری فیزیکی، متغیرهای پیش‌بینی کننده، رگرسور یا متغیرهای توصیفی نامیده می‌شوند.  $\varepsilon$  نیز خطای مدل است که یک متغیر تصادفی با میانگین صفر می‌باشد. اگر میانگین خطاها صفر نبوده و مدل دست بالا و یا دست پایین پیش‌بینی کند، اصطلاحاً مدل بایاس خواهد داشت.

چون در روش کلاسیک عدم قطعیت کاملاً در نظر گرفته نمی‌شود، در این پژوهش از روش بیزی استفاده شده است. با فرض بازه‌های منطقی برای  $R_c$ ، رفتار شاخص قابلیت اطمینان، احتمال شکست، حساسیت شاخص قابلیت اعتماد نسبت به هزینه، و حساسیت احتمال شکست نسبت به هزینه مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده برای پیش‌بینی مقادیر فاصله آزاد عبارتند از:

•  $x_1$ : شاخص قابلیت اعتماد ( $\beta$ )

•  $x_2$ : احتمال گسیختگی ( $P_f$ )

•  $x_3$ : مشتق شاخص قابلیت اعتماد نسبت به هزینه ( $\frac{\partial \beta}{\partial c}$ )

•  $x_4$ : مشتق احتمال گسیختگی نسبت به هزینه ( $\frac{\partial P_f}{\partial c}$ )

در این تحقیق، به منظور دستیابی به ضریب همبستگی بالا بین داده‌های حاصل از رابطه رگرسیونی و نتایج تحلیل قابلیت اعتماد، مدل‌های ریاضی متعددی نظیر توابع چندخطی، نمایی، لگاریتمی، چندجمله‌ای، توانی، مثلثاتی و ترکیباتی از آنها آزموده شد. مبنای انتخاب مدل‌های ریاضی مختلف، تجربیاتی بوده که از تحقیقات مشابه گذشته به دست آمده است.

نهایتاً رابطه (۱۴) برای تعیین  $R_c$  بر حسب شاخص قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی، و حساسیت این دو پارامتر نسبت به هزینه پیشنهاد می‌شود.

$$R_c(m) = -0.0481\beta^3 + 0.0022P_f + 4.1061 \ln \left| \frac{\partial \beta}{\partial c} \right| - 0.0007 \frac{\partial P_f}{\partial c} + 0.28 \quad (14)$$

۸- با افزایش یک متری میانگین و انحراف معیار ارتفاع موج شاخص، احتمال گسیختگی به ترتیب حدود ۴ و ۳ برابر می‌شود.

۹- با افزایش میانگین دبی روگذری مجاز از ۱ به ۲ ( $m^3/s/m$ )، احتمال گسیختگی از حدود ۵۰٪ به حدود ۱۰٪ کاهش پیدا می‌کند. با افزایش انحراف معیار دبی روگذری مجاز از ۰/۲۵ به ۱/۲۵ ( $m^3/s/m$ )، احتمال گسیختگی حدود ۲ برابر خواهد شد.

۱۰- ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی برای تعیین  $R_c$  برحسب شاخص قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی، و حساسیت این دو پارامتر نسبت به هزینه، ۰/۸۷ است که با توجه به ماهیت پیچیده مسئله، مقدار قابل قبولی تلقی می‌شود.

#### ۱۰- موضوعات پیشنهادی برای تحقیقات آتی

در این مقاله، روابط پیشنهادی در نسخه ۲۰۱۱ Coastal Engineering Manual [۲۳]، به عنوان یکی از مهم‌ترین مراجع موجود در زمینه مطالعات روگذری، ملاک محاسبات قرار گرفته است. پیشنهاد می‌شود پژوهش حاضر بر مبنای روابط روگذری پیشنهادی توسط راهنمای EurOtop II [۳۰] تکرار شده و خروجی‌ها با نتایج مقاله حاضر مورد مقایسه قرار گیرند.

#### ۱۱- مراجع

- [1] Owen, M. W., "Design of Seawalls Allowing for Wave Overtopping", Report No. 924, Hydraulics Research Station, Wallingford, UK, 1980.
- [2] Owen, M. W., "The Hydraulic Design of Seawall Profiles", Proceedings of the Coastal Protection Conference, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, London, UK, pp. 185-192, 1982.
- [3] Bradbury, A. P., Allsop, N. W., "Hydraulic Effects of Breakwater Crown Walls", Proceedings of the Breakwaters '88 Conference, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, London, UK, pp.385-396, 1988.
- [4] Aminti, P., Franco, L., "Wave Overtopping on Rubble Mound Breakwaters", Proceedings of the 21st International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Vol.1, pp.770-781, 1988.
- [5] Ahrens, J. P., Heinbaugh, M. S., "Seawall Overtopping Model", Proceedings of the 21st International Coastal Engineering Conference,

اعتماد، احتمال گسیختگی، و حساسیت این دو پارامتر نسبت به هزینه محاسبه نمود.

اهم نتایج حاصله را می‌توان به شکل زیر خلاصه نمود:

۱- با توجه به این که توابع حالت حدی تعریف شده، به شدت غیر خطی بوده و ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی دخیل در این توابع نیز نسبتاً بزرگ هستند، تحلیل MVFOSM که تابع حالت حدی را حول نقطه میانگین خطی‌سازی می‌کند، خطای تخمین قابل توجهی خواهد داشت.

۲- نتایج تحلیل FORM برای اکثر توابع، اندکی نسبت به نتایج تحلیل SORM محافظه‌کارانه‌تر هستند. البته زمان لازم برای محاسبات کامپیوتری تحلیل SORM به مراتب بیشتر از تحلیل FORM است. لذا استفاده از روش FORM برای بررسی مسئله روگذری در موج‌شکن‌های توده‌سنگی مناسب‌تر است.

۳- اگر نتایج روش‌های MCS و IS با یکدیگر مقایسه شوند، ملاحظه می‌شود که اختلاف بسیار ناچیزی دارند. با توجه به این که تعداد نمونه‌های مورد استفاده در روش MCS به مراتب بیشتر از روش IS بوده و در نتیجه زمان‌بر است، برای بررسی مسئله روگذری در موج‌شکن‌های توده‌سنگی روش IS مناسب‌تر است.

۴- شاخص قابلیت اطمینان محاسبه شده در امواج ناشکنا بزرگ‌تر از امواج شکنا می‌باشد. به عبارت دیگر، احتمال گسیختگی در تحت اثر امواج شکنا بیشتر از ناشکنا است.

۵- مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در نتایج تحلیل قابلیت اعتماد موج‌شکن توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری، ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) است.

۶- تحت اثر امواج شکنا، تیزی موج در مقایسه با دبی روگذری مجاز تأثیر بیشتری روی شاخص قابلیت اعتماد موج‌شکن توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از روگذری دارد. در حالی که تحت اثر امواج ناشکنا، تأثیر دبی روگذری مجاز بیشتر است.

۷- پس از سه پارامتر ارتفاع موج شاخص، تیزی موج، و دبی روگذری مجاز، به ترتیب ضریب  $A_v$ ، ضرایب اصلاحی کاهنده ( $\gamma$ )، و شیب موج‌شکن ( $\tan \alpha$ ) به لحاظ تأثیرگذاری روی احتمال گسیختگی در رتبه‌های چهارم تا ششم قرار دارند.

- Momentum Flux", Applied Ocean Research, Vol.53, pp.23-30, 2015.
- [18] Romano, A., Bellotti, G., Briganti, R., 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.
- [19] Tofany, N., Ahmad, M. F., Mamat, M., Mohd-Lokman, H., "The Effects of Wave Activity on Overtopping and Scouring on a Vertical Breakwater", Ocean Engineering, Vol.116, pp.295-311, 2016.
- [20] Wesley, M. J., Cheung, K. F., "Modeling of Wave Overtopping on Vertical Structures with the HLLS Riemann Solver", Coastal Engineering, Vol.112, pp.28-43, 2016.
- [21] Zanuttigh, B., Formentin, S. M., van der Meer, J. W., "Prediction of Extreme and Tolerable Wave Overtopping Discharges through an Advanced Neural Network", Ocean Engineering, Vol.127, No.15, pp.7-22, 2016.
- [22] Hughes, S. A., Thornton, C. I., "Estimation of Time-varying Discharge and Cumulative Volume in Individual Overtopping Waves", Coastal Engineering, Vol.117, pp.191-204, 2016.
- [23] US Army Corps of Engineers, "Coastal Engineering Manual: Part VI", Department of the Army, Washington DC, US, 2011.
- [24] Choi, S. K., Grandhi, R. V., Canfield, R. A., "Reliability-based Structural Design", Springer-Verlag, UK, 2007.
- [25] Nowak, A. S., Collins, K. R., "Reliability of Structures", McGraw-Hill Inc., US, 2000.
- [26] Lemaire, M., "Structural Reliability", John Wiley & Sons Inc., US, 2009.
- [27] Lee, C. E., Kwon, H. J., "Reliability Analysis and Evaluation of Partial Safety Factors for Random Wave Overtopping", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.13, No.1, pp.7-14, 2009.
- [28] Izinyon, O. C., Ajumuka, H. N., "Evaluation of Some Flood Prediction Models for Three Flow Gaugings Stations in Upper Benue River Basin in Nigeria", Nigerian Journal of Technology, Vol.32, No.2, pp.184-196, 2015.
- [29] Mahsuli, M., Haukaas, T., "Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.27, No.1, pp.87-98, 2013.
- [30] Van der Meer, J. W., et al., "EurOtop, 2016: Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures; An Overtopping Manual Largely Based on European Research, but for Worldwide Application", 2<sup>nd</sup> Edition, 2016.
- American Society of Civil Engineers, Vol.1, pp.795-806, 1988.
- [6] Pedersen, J., Burcharth, H. F., "Wave Forces on Crown Walls", Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Vol.2, pp.1489-1502, 1992.
- [7] van der Meer, J. W., Janssen, W., "Wave Run-Up and Wave Overtopping at Dikes," In Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures, Kobayashi and Demirbilek, eds., American Society of Civil Engineers, pp.1-27, 1995.
- [8] Franco, L., de Gerloni, M., van der Meer, J. W., "Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters", Proceedings of the 24th International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Vol.1, pp.1030-1045, 1994.
- [9] Pedersen, J., "Experimental Study of Wave Forces and Wave Overtopping on Breakwater Crown Walls", Series paper 12, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark, 1996.
- [10] Goda, Y., "Random Seas and Design of Maritime Structures", University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 2000.
- [11] Hiraishi, T., Maruyama, H., "Directional Wave Overtopping Estimation Model and Experimental Verification", Coastal Engineering, pp.2249-2268, 1998.
- [12] Hu, K. C. G., Mingham, R. N., Causon, D. M., "Numerical Simulation of Wave Overtopping of Coastal Structures Using the Nonlinear Shallow Water Equation", Coastal Engineering, Vol.41, No.4, pp.433-435, 2000.
- [13] Du, Y., Pan, S., Chen, Y., "Modelling the Effect of Wave Overtopping on Nearshore Hydrodynamics and Morphodynamics around Shore-parallel Breakwaters", Coastal Engineering, Vol.57, No.9, pp.812-826, 2010.
- [14] Yeganeh-Bakhtiary, A., Hajivalie, F., Hashemi-Javan, A., "Steady Streaming and Flow Turbulence in Front of Vertical Breakwater with Wave Overtopping", Applied Ocean Research, Vol.32, No.1, pp.91-102, 2010.
- [15] Andersen, T. L., Burcharth, H. F., Gironella, X., "Comparison of New Large and Small Scale Overtopping Tests for Rubble Mound Breakwaters", Coastal Engineering, Vol.58, No.4, pp.351-373, 2011.
- [16] Vicinanza, D., Contestabile, P., Nørgaard, J. Q. H., Andersen, T. L., "Innovative Rubble Mound Breakwaters for Overtopping Wave Energy Conversion", Coastal Engineering, Vol.88, pp.154-170, 2014.
- [17] Moghim, M. N., Boroujeni, R. F., Rezapour Tabari, M. M., "Wave Overtopping on Reshaping Berm Breakwaters Based on Wave