

# تحلیل قابلیت اعتماد موج‌شکن‌های توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از ناپایداری هیدرولیکی لایه آرمور بر مبنای تئوری متغیرهای تصادفی فازی: مطالعه موردی موج‌شکن بندر انزلی

امید حسینی<sup>۱</sup>، حمید احمدی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: [omidhosseini1371@yahoo.com](mailto:omidhosseini1371@yahoo.com)

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: [h-ahmadi@tabrizu.ac.ir](mailto:h-ahmadi@tabrizu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۱۱

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۸/۳/۲۰

## چکیده

موج‌شکن‌های توده‌سنگی از جمله متداول‌ترین سازه‌های حفاظت ساحل بوده و یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی این نوع موج‌شکن‌ها، بررسی پایداری هیدرولیکی لایه آرمور در مقابل برخورد امواج است. در این پژوهش، احتمال گسیختگی موج‌شکن‌های توده‌سنگی در اثر ناپایداری هیدرولیکی لایه آرمور با استفاده از تئوری متغیرهای تصادفی فازی و تحلیل قابلیت اعتماد مطالعه شده و عوامل تأثیرگذار در این ناپایداری شناسایی و سهم عدم قطعیت هر کدام از این عوامل در تعیین احتمال گسیختگی و شاخص قابلیت اعتماد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مقاله حاضر، مطالعه روی موج‌شکن توده‌سنگی با آرمور سنگی متمرکز شده و اطلاعات فیزیکی و محیطی مسئله، مربوط به شاخه غربی موج‌شکن جدید بندر انزلی است. برای اطلاعات مربوط به عدم قطعیت بار و مقاومت از نتایج تحقیقات موجود استفاده گردیده است. به منظور تعیین تابع حالت حدی، از روابط پایداری پیشنهادی توسط van Gent و همکارانش در دو حالت شکست شیرجه‌ای و غلته‌ای موج استفاده شده است. بعد از تعیین تابع حالت حدی و خواص آماری متغیرها، تحلیل قابلیت اعتماد به روش مرتبه دوم (SORM) برای شرایط امواج برخوردی شیرجه‌ای و غلته‌ای انجام و نتایج با هم مقایسه شده است. در نهایت، میزان اهمیت و تأثیر هر یک از متغیرهای بار و مقاومت روی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت، موج‌شکن توده‌سنگی، تئوری متغیرهای تصادفی فازی، تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه دوم (SORM)، تابع حالت حدی، رابطه پایداری van Gent.

## ۱. مقدمه

و مصالح به کار برده شده، موج‌شکن توده‌سنگی<sup>۱</sup> (شکل (۱)) از جمله متداول‌ترین‌هاست. پایداری هیدرولیکی<sup>۲</sup> لایه آرمور<sup>۳</sup> یکی از مهم‌ترین مسائلی است که باید در طراحی موج‌شکن‌های توده-

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که برای ایجاد آرامش در بندرگاه، جهت ورود ایمن کشتی‌ها و همچنین کاهش انرژی ناشی از امواج و حفاظت از سواحل در مقابل برخورد موج احداث می‌شوند. از میان انواع موج‌شکن‌ها به لحاظ شکل هندسی

<sup>1</sup> Rubble-mound breakwater

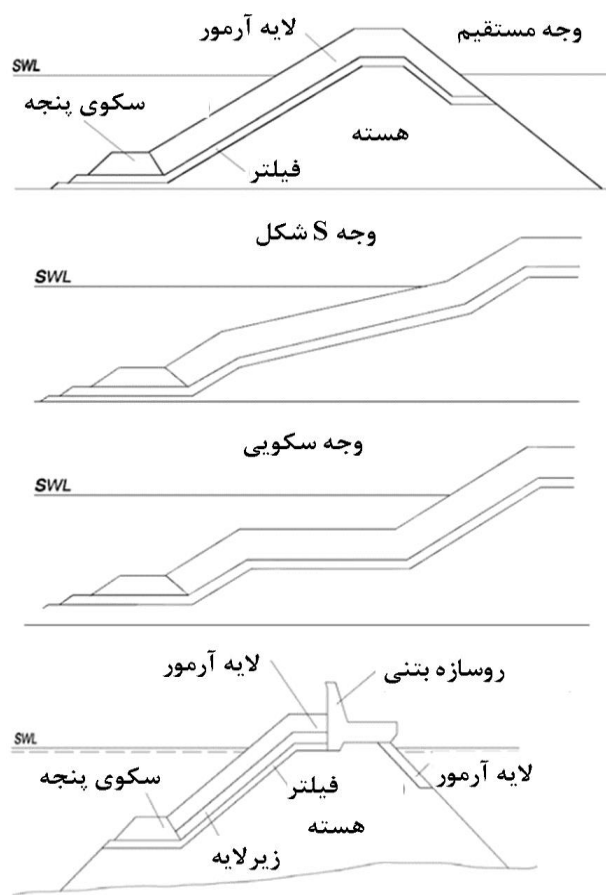
<sup>2</sup> Hydraulic stability

<sup>3</sup> Armor layer

دولایه و با روگذری، روابط van der Meer (۱۹۹۱) برای موج-شکن‌های مستغرق<sup>۲</sup> با آرمور سنگی دولایه، روابط پیشنهادی توسط Vidal و همکاران (۱۹۹۲) برای موج‌شکن‌های تاج‌کوتاه<sup>۳</sup> مستغرق با آرمور سنگی دولایه، روابط به دست آمده توسط van der Meer (۱۹۹۰) برای موج‌شکن‌های پشته‌ای<sup>۴</sup> تاج‌کوتاه، روابط استخراج شده توسط Jensen (۱۹۸۴) برای وجه رو به ساحل<sup>۵</sup> موج‌شکن‌های توده‌سنگی با آرمور سنگی دو لایه و بدون روسازه<sup>۶</sup>، روابط پیشنهادی توسط van der Meer (۱۹۸۸) برای موج‌شکن با قطعات آرمور پیش‌ساخته بتنی از نوع Cube، Accropode و Tetrapod، روابط Burcharth و Liu (۱۹۹۲) برای موج‌شکن با قطعات آرمور پیش‌ساخته بتنی از نوع Dolos، روابط پیشنهادی توسط Melby و Turk (۱۹۹۴) و Turk و Melby (۱۹۹۷) برای موج‌شکن با قطعات آرمور پیش‌ساخته بتنی از نوع Core-Loc، روابط استخراج شده توسط Hanzawa و همکاران (۱۹۹۶) برای موج‌شکن کامپوزیت با قطعات آرمور پیش‌ساخته بتنی از نوع Tetrapod و نهایتاً روابط پیشنهادی توسط van Gent و همکاران (۲۰۰۳) برای موج‌شکن با قطعات آرمور سنگی اشاره کرد.

Dentale و همکاران (۲۰۰۹) نیروی هیدرودینامیکی وارد بر قطعه آرمور<sup>۷</sup> را مورد مطالعه قرار دادند. در این شبیه‌سازی، موج-شکن مستغرق در سه هندسه با تخلخل متفاوت و موج‌شکن معمولی با قطعات آرمور Accropode در دو چینش منظم و نامنظم مدل‌سازی شدند. Abdelazim و همکاران (۲۰۱۴) تأثیرات لایه آرمور را در دو حالت چینش منظم و نامنظم روی میزان آسیب‌های وارده به موج‌شکن مطالعه نمودند. Thaha و همکاران (۲۰۱۵) تأثیرات پارامترهای مختلف موج‌شکن و ارتفاع امواج را بر میزان استهلاک انرژی و دبی روگذری بررسی کرده و راهکارهایی جهت افزایش پایداری هیدرولیکی ارائه دادند. Liang و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر مشخصات موج و پارامترهای هندسی موج‌شکن را بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، با استفاده از مدل‌سازی عددی، امواجی با مشخصات مختلف شبیه‌سازی شده و اثرات آن‌ها بر پارامترهای مختلف موج‌شکن از قبیل نوع، ارتفاع، شیب و غیره مورد ارزیابی

سنگی در نظر گرفته شود و کنترل صحیح و قابل اطمینان پایداری لایه آرمور امری مهم در ارزیابی ایمنی این سازه‌ها است. در دهه‌های اخیر تلاش‌های متعددی برای مدل‌سازی و تحلیل پایداری لایه آرمور صورت گرفته است. اکثر مدل‌سازی‌ها به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته و حاوی نتایج بسیار ارزشمندی بوده است. این مطالعات منجر به ارائه یک سری روابط نیمه‌تجربی جهت کنترل پایداری لایه آرمور، به صورت تابعی از شرایط محیطی و خصوصیات موج‌شکن شده است.



شکل ۱: انواع موج‌شکن توده‌سنگی: با شیب مستقیم، با شیب S شکل، با شیب سکویی و با روسازه بتنی (CEM, ۲۰۰۱)

از جمله معتبرترین روابط برای کنترل پایداری هیدرولیکی لایه آرمور می‌توان به روابط پیشنهادی Hudson (۱۹۷۴) و van der Meer (۱۹۸۸ الف) برای موج‌شکن‌های توده‌سنگی با آرمور سنگی دو لایه و بدون روگذری<sup>۱</sup>، روابط استخراج شده توسط Powell و Allsop (۱۹۸۵) برای موج‌شکن‌های توده‌سنگی با آرمور سنگی

<sup>1</sup> Overtopping

<sup>2</sup> Submerged breakwater  
<sup>3</sup> Low-crested breakwater  
<sup>4</sup> Reef breakwater  
<sup>5</sup> Rear slope  
<sup>6</sup> Superstructure  
<sup>7</sup> Armor unit

مربوط به عدم قطعیت بار و مقاومت از تحقیقات آکادمیک موجود استفاده گردیده است.

## ۲. روش تحقیق

### ۱-۲ کنترل پایداری هیدرولیکی لایه آرمور

در پژوهش حاضر، به منظور کنترل پایداری هیدرولیکی لایه آرمور، از روابطی که van Gent و همکاران (۲۰۰۳) برای موج-شکن‌های توده‌سنگی با آرمور سنگی ارائه داده‌اند، استفاده شده است. این روابط به شکل زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} \frac{H_{s_{toe}}}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \left(\frac{H_{2\%}}{H_{s_{toe}}}\right)^{-1} \zeta_{m-1,0}^{-0.5} & \text{Plunging} \\ \frac{H_{s_{toe}}}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \left(\frac{H_{2\%}}{H_{s_{toe}}}\right)^{-1} \sqrt{\cot \alpha} \zeta_{m-1,0}^P & \text{Surging} \end{cases} \quad (1)$$

که رابطه اول مربوط به حالت شکست شیرجه‌ای و رابطه دوم مربوط به حالت شکست غلتشی است.

با توجه به این که رابطه van Gent در مقایسه با رابطه van der Meer (۱۹۸۸ الف) عملکرد بهتری در مناطق کم عمق دارد (van Gent و همکاران، ۲۰۰۳)، این رابطه انتخاب مناسب‌تری جهت ارزیابی پایداری هیدرولیکی در پژوهش حاضر است.

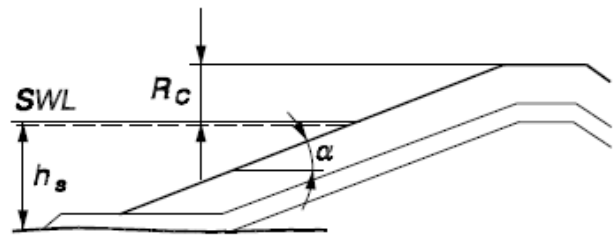
در رابطه (۱)، ضریب شکست شیرجه‌ای،  $C_{pl}$  ضریب شکست غلتشی،  $P$  نفوذپذیری،  $S$  میزان آسیب،  $N$  تعداد امواج برخوردی به سازه،  $H_{2\%}$  ارتفاع متوسط دو درصد مرتفع‌ترین امواج،  $(H_s)_{toe}$  ارتفاع موج شاخص در پای سازه،  $\alpha$  زاویه شیب سطح سازه، پارامتر تشابه شکست،  $\Delta$  چگالی نسبی قطعات آرمور و  $D_{n50}$  قطر اسمی متوسط قطعه آرمور سنگی است که دو مورد آخر به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$M_{50} = \rho_s D_{n50}^3 \quad (2)$$

که  $\rho_s$  جرم مخصوص قطعه آرمور و  $M_{50}$  جرم متوسط قطعات آرمور مورد استفاده در لایه آرمور است.

$$\Delta = (\rho_s / \rho_w) - 1 \quad (3)$$

قرار گرفت. ضمناً راهکارهایی جهت افزایش پایداری هیدرولیکی و کاهش آشفستگی جریان در اطراف موج‌شکن ارائه شد. Milanian و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر مشخصات هندسی موج‌شکن را بر پایداری هیدرولیکی و میزان بالاروی آب روی موج‌شکن با استفاده از مدل‌سازی عددی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که افزایش عرض سکو سبب کاهش بالاروی امواج تا ۳۶٪ می‌شود. 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 ناپایداری لایه آرمور، بر اثر جایجایی بیش از حد مجاز قطعات آرمور در بیرونی‌ترین لایه موج‌شکن رخ می‌دهد. به کمک تحلیل قابلیت اعتماد، طراح می‌تواند درک بهتری از مدل‌های متعدد ارائه شده برای کنترل پایداری لایه آرمور داشته و این امکان را فراهم می‌سازد که توازن مناسبی بین تراز ایمنی سازه و هزینه پروژه ایجاد گردد.



شکل ۲: پارامترهای هندسی پروفیل موج‌شکن توده‌سنگی (CEM، ۲۰۰۱)

در این مقاله، قابلیت اعتماد موج‌شکن‌های توده‌سنگی در برابر گسیختگی ناشی از ناپایداری لایه آرمور، بر مبنای روابط پایداری van Gent و همکاران (۲۰۰۳) که به طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی و خصوصیات سازه‌ای قابل اعمال هستند، با استفاده از تئوری متغیرهای تصادفی فازی و تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه دوم بررسی شده و نتایج برای دو حالت شکست شیرجه‌ای و غلتشی موج مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در هر حالت، مقادیر شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی به دست می‌آیند و نقش پارامترهای مؤثر مختلف به صورت کیفی و کمی روی احتمال گسیختگی بررسی و این پارامترها به لحاظ میزان اهمیت رتبه‌بندی می‌شوند. اطلاعات فیزیکی و محیطی مسئله، مربوط به شاخه غربی موج‌شکن جدید بندر انزلی است و برای اطلاعات

<sup>1</sup> Reliability

حالت کلی، در هر مسئله مهندسی، تعدادی متغیر تصادفی وارد عمل می‌شوند. در این صورت، تابع حالت حدی برحسب تمامی متغیرهای تصادفی مسئله یعنی  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  و  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$  نوشته خواهد شد (Choi و همکاران، ۲۰۰۷).

با توجه به رابطه (۴)، 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:

$$P_f = \Pr[g(X, Y) < 0] \quad (5)$$

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

$$P_f = \Pr[g(X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_m) < 0] \\ = \int_{-\infty}^0 f_g(g) dg = \int_{g(X, Y) < 0} f_{R, S}(r, s) dr ds \quad (6)$$

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. اگر تابع حالت حدی به شکل  $g = R - S$  تعریف شود، شاخص قابلیت اعتماد<sup>۵</sup> بدین‌گونه بیان می‌گردد:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $\mu_g$  میانگین تابع حالت حدی بوده و  $\sigma_g$  انحراف معیار تابع حالت حدی را نشان می‌دهد.  $\beta$  به عنوان معیاری برای میزان قابلیت اعتماد در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که تابع حالت حدی، تک‌بعدی باشد ( $g(X, Y) = g(X)$ )،  $\beta$  می‌تواند به عنوان معیاری برای فاصله حاشیه اطمینان میانگین<sup>۶</sup> از رویه گسیختگی در نظر گرفته شود (شکل (۳)).

که  $\rho_w$  جرم مخصوص آب است.

در صورتی‌که قطر اسمی متوسط قطعات آرمور بر مبنای رابطه (۱) تعیین شود، می‌توان از پایداری هیدرولیکی لایه آرمور اطمینان حاصل نمود. سپس می‌توان با استفاده از رابطه (۲)، جرم متوسط قطعات آرمور مورد نیاز جهت استفاده در لایه آرمور را محاسبه کرد.

## ۲-۲ 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.

تئوری قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی<sup>۲</sup> سازه را، با تعیین این‌که آیا توابع حالت حدی<sup>۳</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:

$$g(X, Y) = R(X) - S(Y) \quad (4)$$

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

<sup>4</sup> Failure surface

<sup>5</sup> Reliability index

<sup>6</sup> Mean margin of safety

<sup>1</sup> Probability density function

<sup>2</sup> Failure probability

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

### ۳-۲ فرمول‌بندی تابع حالت حدی

گسیختگی ناشی از ناپایداری لایه آرمور زمانی رخ می‌دهد که جرم متوسط قطعات آرمور موجود، از مقدار جرم محاسبه شده توسط رابطه کنترل پایداری نظیر روابط مراجع معرفی شده در مقدمه مقاله کمتر باشد. لذا با توجه به رابطه (۱) و توضیحات بخش (۳)، تابع حالت حدی برای گسیختگی ناشی از ناپایداری لایه آرمور به شکل زیر قابل تعریف است:

$$g(X_1) = \left[ C_{pl} P^{0.18} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left( \frac{H_{2\%}}{H_{s_{ve}}} \right)^{-1} \xi_{m-1,0}^{\zeta-0.5} \right] \Delta D_{n50} - H_{s_{ve}} \quad \text{Plunging}$$

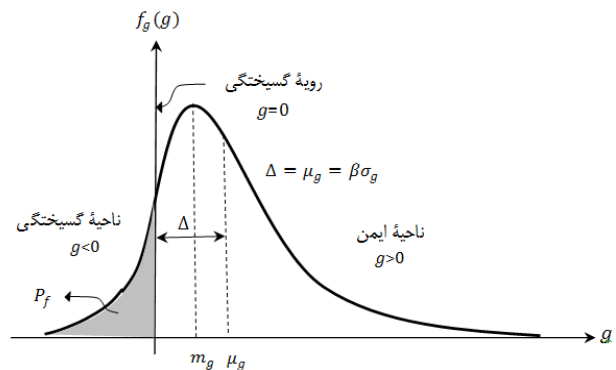
$$g(X_2) = \left[ C_s P^{-0.13} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left( \frac{H_{2\%}}{H_{s_{ve}}} \right)^{-1} \sqrt{\cot \alpha} \xi_{m-1,0}^{\zeta P} \right] \Delta D_{n50} - H_{s_{ve}} \quad \text{Surging}$$

که رابطه اول مربوط به حالت شکست شیرجه‌ای و رابطه دوم مربوط به حالت شکست غلتشی موج است.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش متعلق به موج‌شکن جدید بندر انزلی است که ساخت آن از سال ۱۳۸۷ شروع و شامل دو موج‌شکن غربی و شرقی در بندر انزلی است. طول موج‌شکن غربی (اصلی) ۱۵۷۰ متر و طول موج‌شکن شرقی ۱۶۰۰ متر می‌باشد. شکل (۴) نمایی از این موج‌شکن را در شهر بندری انزلی نشان می‌دهد. عمق حوضچه این موج‌شکن، ده و نیم متر بوده و مختصات جغرافیایی محل قرارگیری آن E:492758 و N:372859 است. هزینه کل این پروژه حدود پانصد میلیارد ریال برآورد شده و در مجموع یازده لنگرگاه در این موج‌شکن تعبیه گردیده است. 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 ارزیابی پایداری هیدرولیکی لایه آرمور، بر مبنای داده‌های سازمان بنادر و دریانوردی، شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران و پژوهش van Gent و همکاران (۲۰۰۳)، در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. در پژوهش حاضر، تحلیل قابلیت اعتماد با استفاده از نرم‌افزار Rt که توسط Mahsuli و Haukaas (۲۰۱۳) توسعه یافته، انجام گرفته است.

تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان فرآیند حل انتگرال متناظر با احتمال گسیختگی را ساده‌سازی و تسهیل نمود. برای این کار می‌توان تابع  $g(X, Y)$  را با بسط سری تیلور آن جایگزین نمود که بسته به مرتبه سری تیلور مورد استفاده، منجر به روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) و مرتبه دوم (SORM) خواهد شد. راه حل دوم این است که از روش‌های نمونه‌برداری<sup>۳</sup> نظیر روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)<sup>۴</sup> استفاده شود.

متداول‌ترین روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد را می‌توان به این شکل خلاصه نمود (Choi و همکاران، ۲۰۰۷): روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) شامل روش گشتاور دوم مرتبه اول مقدار میانگین (MVFOSM)<sup>۵</sup>، روش هاسوفر لیند (HL)<sup>۶</sup> و روش هاسوفر لیند - رکویتز فیسلر (HL-RF)<sup>۷</sup>؛ روش‌های قابلیت اعتماد دوم (SORM) شامل رابطه Breitung و رابطه Tvedt؛ و روش‌های نمونه‌برداری شامل شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) خام یا مستقیم<sup>۸</sup>، نمونه‌برداری بر مبنای اهمیت (IS)<sup>۹</sup> و نمونه‌برداری LHS<sup>۱۰</sup>. برای آشنایی با جزئیات تحلیل در این روش‌ها می‌توان به عنوان نمونه به Choi و همکاران (۲۰۰۷)، Nowak و Collins (۲۰۰۰) و Lemaire (۲۰۰۹) مراجعه نمود.

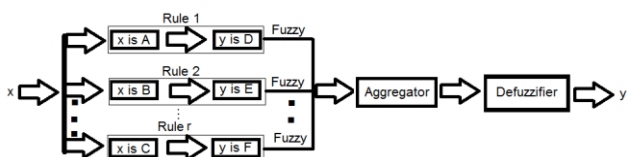


شکل ۳: تابع چگالی احتمال برای تابع حالت حدی و تعریف ناحیه امن و ناحیه گسیختگی (Choi و همکاران، ۲۰۰۷)

- 1 First-order reliability method
- 2 Second-order reliability method
- 3 Sampling methods
- 4 Monte Carlo simulation
- 5 Mean-value first-order second-moment
- 6 Hasofer Lind
- 7 Hasofer Lind-Rackwitz Fiessler
- 8 Crude or direct MCS
- 9 Importance sampling
- 10 Latin hypercube sampling

فازی شناخته می‌شوند (کیا، ۱۳۸۹). ساختار پایه سیستم‌های استنتاج فازی از سه بخش مفهومی تشکیل می‌شود. بخش اول قواعد است که شامل گزیده‌ای از قواعد فازی می‌باشد. بخش دوم پایگاه داده است که توابع عضویت مورد استفاده در قواعد فازی در آن تعریف می‌شوند. بخش سوم نیز ساز و کار استنتاج است که روال استنتاج توسط آن و به کمک قواعد و حقایق موجود، برای رسیدن به یک خروجی معقول انجام می‌پذیرد.

ورودی سیستم‌های استنتاج فازی می‌تواند در قالب مجموعه‌های معمولی و یا فازی باشد. اما خروجی آن همواره به صورت مجموعه‌های فازی است. گاهی نیاز به خروجی سیستم‌ها به صورت مجموعه‌های معمولی وجود دارد که در این صورت از روالی تحت عنوان غیر فازی‌سازی<sup>۱</sup> جهت استخراج بهترین مقادیر غیر فازی از یک مجموعه فازی استفاده می‌شود. شکل (۵) یک سیستم استنتاج فازی با خروجی غیر فازی را نشان می‌دهد. بلوک غیر فازی‌سازی، تبدیل خروجی فازی به غیر فازی را انجام می‌دهد. یک سیستم استنتاج فازی با ورودی و خروجی غیر فازی، در واقع یک نگاشت غیر خطی از ورودی به خروجی را پیاده‌سازی می‌کند. این عملیات نگاشت از طریق قواعد اگر-آن‌گاه فازی در فضای ورودی و قسمت نتیجه آن، یک ناحیه فازی در فضای خروجی را تعیین می‌نماید.



شکل ۵: بلاک‌دیگرام یک سیستم استنتاج فازی (کیا، ۱۳۸۹)

قواعد فازی مورد استفاده در سیستم استنتاج فازی مددانی<sup>۲</sup> با توجه به تجارب انسانی، فراهم شده‌اند (Mamdani, ۱۹۷۴). شکل (۶) نحوه ایجاد خروجی Z را در یک سیستم استنتاج فازی مددانی با دو قاعده نشان می‌دهد.

مدل فازی سوگنو<sup>۳</sup> تلاشی برای توسعه یک سیستم روش‌مند در راستای ایجاد قواعد فازی با توجه به مجموعه داده‌های ورودی-خروجی می‌باشد. شکل (۷) روال استدلال فازی را در

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ثابت [برگرفته از داده‌های سازمان بندر و دریانوردی، شرکت مهندسين مشاور سازه‌پدرازی ایران و van Gent و همکاران (۲۰۰۳)]

پارامتر	مقدار
ضریب شیرجه‌ای (Cpl)	۸/۴
ضریب غلشی (Cs)	۱/۳
زاویه شیب (α)	۰/۵۸۸۰ رادیان
شاخص نفوذپذیری (P)	۰/۵
میزان آسیب (S)	۲/۲۵
تعداد امواج برخوردی به سازه (N)	۳۰۰۰

جدول ۲: مشخصات آماری متغیرهای تصادفی [برگرفته از داده‌های سازمان بندر و دریانوردی، شرکت مهندسين مشاور سازه‌پدرازی ایران و van Gent و همکاران (۲۰۰۳)]

متغیر تصادفی	میانگین	انحراف معیار	تابع توزیع احتمال
ارتفاع موج شاخص در پنجه سازه $(H_s)_{10\%}$	۰/۶۹۰۳	۰/۵۱۳۰	توانی
ارتفاع متوسط دو درصد مرتفع‌ترین امواج $(H_2\%)$ - برحسب متر	۲/۱۲۶۶	۰/۴۷۸۱	گامبل
پارامتر تشابه شکست $(\xi)$	۹/۹۰۱۶	۳/۲۴۷۵	رایلی
چگالی نسبی طبق رابطه $(\Delta)$	۱/۶۲۳۹	۰/۰۴۹۰	نرمال
قطر اسمی متوسط $(D_{n50})$ - برحسب متر	۱/۴۴۲۱	۰/۰۵۸۰	نرمال



شکل ۴: نمایی از موج‌شکن توده‌سنگی بندر انزلی

## ۴-۲ سیستم‌های استنتاج و مدل‌سازی فازی

سیستم‌های استنتاج فازی، یک چارچوب محاسباتی پرتعداد بر مبنای مفهوم مجموعه‌های فازی، قواعد اگر-آن‌گاه و استدلال فازی هستند. این سیستم‌ها، تحت عناوین مختلفی از جمله سیستم‌های مبتنی بر قواعد فازی، سیستم‌های خبره فازی، مدل فازی، حافظه انجمنی فازی، کنترل‌کننده منطقی فازی و سیستم

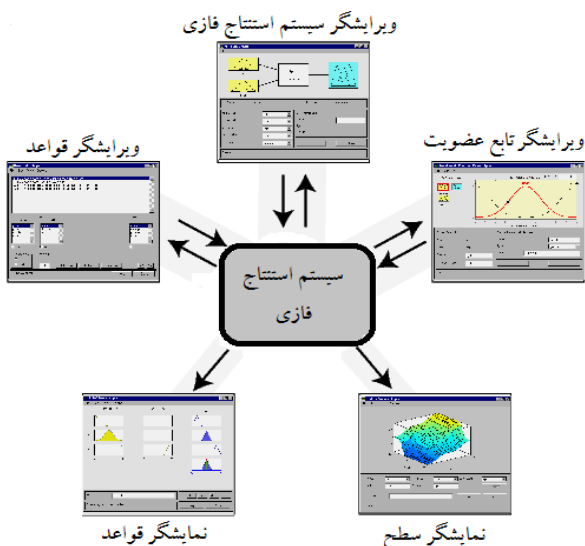
<sup>1</sup> Defuzzification

<sup>2</sup> Mamdani fuzzy model

<sup>3</sup> Sugeno fuzzy model

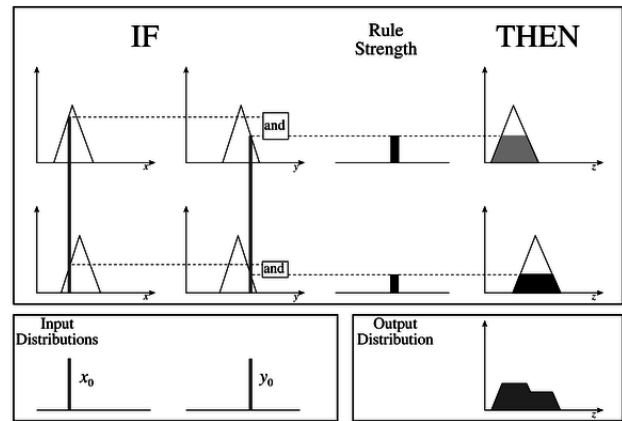
بر دانش از سیستم هدف تکیه خواهد شد. این دانش از طریق دریافت اطلاعات از افراد متخصص و یا آزمون و خطا به دست می‌آید. پس از انجام مرحله اول، قواعد توصیف‌کننده رفتار سیستم هدف با اطلاعات زبان‌شناختی کم و بیش فراهم آمده‌اند. معنای این اصطلاحات در مرحله دوم تعیین می‌شود. از این مرحله تحت عنوان شناسایی ساختار عمقی<sup>۲</sup> یاد می‌شود که طی آن توابع عضویت هر یک از اصطلاحات زبان‌شناختی تعیین می‌شوند. این مرحله شامل سه گام است: (۱) انتخاب یک خانواده مناسب از توابع عضویت پارامتری، (۲) استفاده از تخصص افراد متخصص در ارتباط با سیستم هدف برای تعیین پارامترهای توابع عضویت و (۳) تنظیم پارامترهای توابع عضویت با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی و رگرسیون. زمانی که از سیستم استنتاج فازی برای کنترل یک سیستم خاص استفاده می‌شود، آن‌گاه هدف از گام سوم، جستجو برای یافتن پارامترهای مناسب در راستای رسیدن به بهترین کارایی سیستم است (کیا، ۱۳۸۹).

در پژوهش حاضر، به منظور مدل‌سازی فازی از جعبه‌ابزار منطق فازی نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. این جعبه‌ابزار دارای پنج بخش اصلی است که شامل ویرایشگر سیستم استنتاج فازی، ویرایشگر توابع عضویت، ویرایشگر قواعد فازی، و نمایشگر سطوح است که این بخش‌ها به یکدیگر متصل بوده و مدام با یکدیگر در ارتباط هستند. شکل (۸) نحوه ارتباط این بخش‌ها را با یکدیگر نمایش می‌دهد.

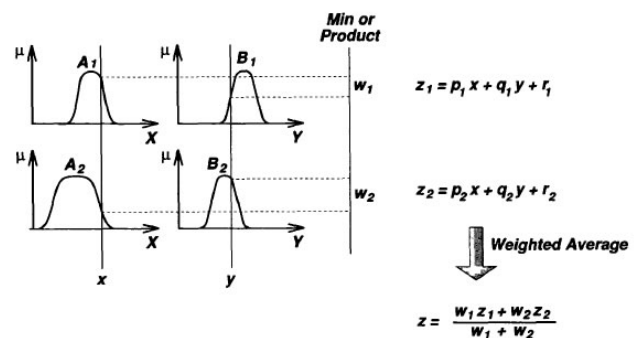


شکل ۸: نحوه ارتباط پنج بخش اصلی جعبه‌ابزار منطق فازی در نرم‌افزار MATLAB

مدل سوگنوی درجه اول نشان می‌دهد. از آن‌جا که هر قاعده دارای خروجی عددی است، خروجی نهایی با محاسبه میانگین وزن‌دار شده محاسبه می‌شود. بدین ترتیب، این روش فاقد فرایند زمان‌بر غیر فازی‌سازی است (کیا، ۱۳۸۹).



شکل ۶: سیستم استنتاج فازی ممدانی (کیا، ۱۳۸۹)



شکل ۷: مدل فازی سوگنو (کیا، ۱۳۸۹)

عموماً طراحی یک سیستم استنتاج فازی بر مبنای رفتارهای شناخته‌شده سیستم هدف انجام می‌پذیرد. سپس از سیستم فازی انتظار می‌رود تا قادر به تولید مجدد رفتار سیستم هدف باشد. عموماً از روش استاندارد ایجاد یک سیستم فازی تحت عنوان مدل‌سازی فازی یاد می‌شود. از نظر مفهومی، مدل‌سازی فازی در دو مرحله وابسته به یکدیگر انجام می‌شود.

مرحله اول تشخیص ساختار سطح<sup>۱</sup> است که شامل چهار گام است: (۱) انتخاب متغیرهای مرتبط ورودی و خروجی، (۲) انتخاب نوع سیستم استنتاج فازی، (۳) تعیین تعداد اصطلاحات زبان-شناختی مرتبط با هر متغیر ورودی و خروجی و (۴) طراحی مجموعه‌ای از قواعد اگر-آن‌گاه فازی. در انجام این مراحل، تنها

<sup>۲</sup> Deep structure

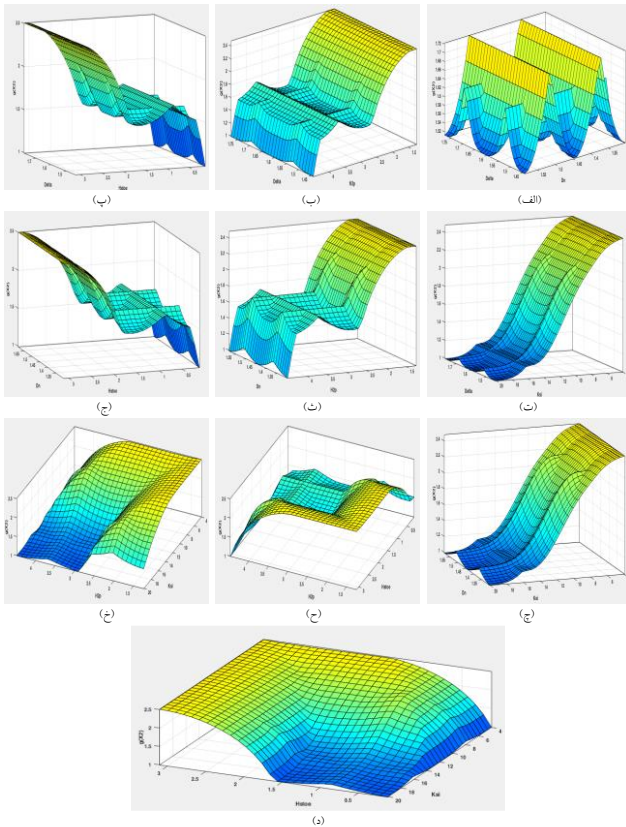
<sup>۱</sup> Surface structure



### ۳. نتایج و بحث

#### ۱-۳ نتایج تحلیل فازی

نمایشگر سطح بین ورودی‌های مختلف با خروجی (تابع حالت حدی) که از تحلیل فازی و با استفاده از جعبه‌ابزار منطق فازی MATLAB به دست آمده‌اند، برای حالات شکست موج شیرجه‌ای و غلتشی به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند. از این شکل‌ها می‌توان برداشت کرد که متغیرهای  $\Delta$  و  $D_{n50}$  همبستگی خاصی با یکدیگر ندارند. از سوی دیگر، متغیرهای  $(H_s)_{toe}$  و  $\xi$  وابستگی شدیدی را به یکدیگر نشان می‌دهند. در شکل (۱۱)، تابع توزیع تجمعی (CDF) مشاهداتی برای متغیرهای تصادفی دخیل در تابع حالت حدی با توابع مفروض برازش شده طبق جدول (۲)، مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر پنج متغیر تصادفی مورد بررسی، انطباق مناسبی بین توابع مشاهداتی و توابع برازش شده وجود دارد.



شکل ۱۰: نمایشگر سطح بین ورودی‌های مختلف با خروجی (تابع حالت حدی) به دست آمده از تحلیل فازی برای شکست غلتشی: الف)  $\Delta$  و  $D_{n50}$ ، ب)  $\Delta$  و  $H_{2\%}$ ، پ)  $\Delta$  و  $(H_s)_{toe}$ ، ت)  $\Delta$  و  $\xi$ ، ث)  $D_{n50}$  و  $H_{2\%}$ ، ج)  $D_{n50}$  و  $(H_s)_{toe}$ ، چ)  $D_{n50}$  و  $\xi$ ، خ)  $H_{2\%}$  و  $\xi$ ، د)  $(H_s)_{toe}$  و  $\xi$

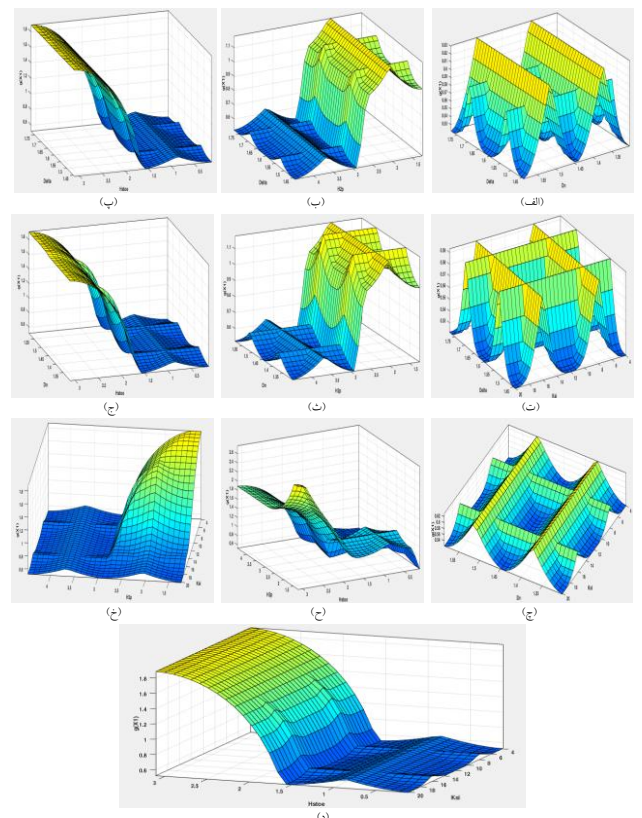
#### ۲-۳ نتایج تحلیل قابلیت اعتماد

##### ۱-۲-۳ توابع توزیع تجمعی متغیرهای تصادفی

تحلیل قابلیت اعتماد به روش SORM و توسط نرم‌افزار Rt انجام شده است. توابع توزیع تجمعی مشاهداتی برای متغیرهای تصادفی دخیل در تابع حالت حدی با توابع برازش شده طبق جدول (۲)، در شکل (۱۲) مقایسه شده‌اند. با مقایسه شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود که برای تمامی متغیرهای تصادفی تحت بررسی، تطابق مناسبی بین نتایج MATLAB و Rt وجود دارد.

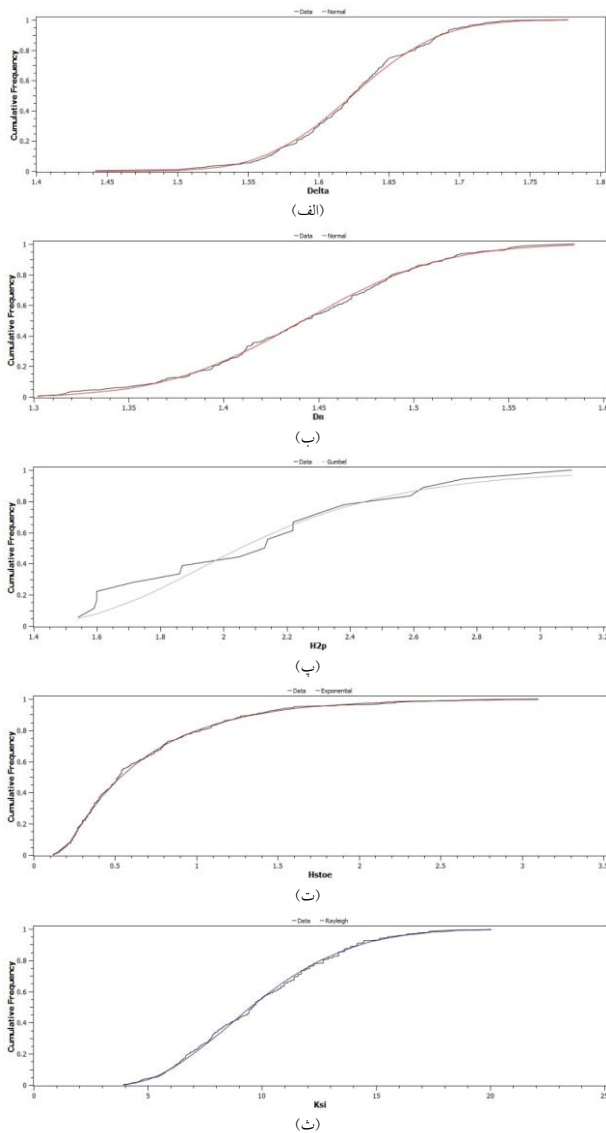
##### ۲-۲-۳ همبستگی بین متغیرهای تصادفی

ضریب همبستگی دو متغیر تصادفی که میزان وابستگی خطی بین دو متغیر را بیان می‌کند، طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود.



شکل ۹: نمایشگر سطح بین ورودی‌های مختلف با خروجی (تابع حالت حدی) به دست آمده از تحلیل فازی برای شکست شیرجه‌ای: الف)  $\Delta$  و  $D_{n50}$ ، ب)  $\Delta$  و  $H_{2\%}$ ، پ)  $\Delta$  و  $(H_s)_{toe}$ ، ت)  $\Delta$  و  $\xi$ ، ث)  $D_{n50}$  و  $H_{2\%}$ ، ج)  $D_{n50}$  و  $(H_s)_{toe}$ ، چ)  $D_{n50}$  و  $\xi$ ، خ)  $H_{2\%}$  و  $\xi$ ، د)  $(H_s)_{toe}$  و  $\xi$





شکل ۱۲: مقایسه تابع توزیع تجمعی (CDF) مشاهداتی برای متغیرهای تصادفی دخیل در تابع حالت حدی با توابع مفروض برازش شده طبق جدول (۲) بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل احتمالاتی توسط (الف:  $\Delta$ ، ب:  $D_{n50}$ ، پ:  $H_{2\%}$ ، ت:  $H_{s1oe}$  و ث:  $\xi$ )

### ۳-۲-۳ پارامترهای اهمیت و حساسیت

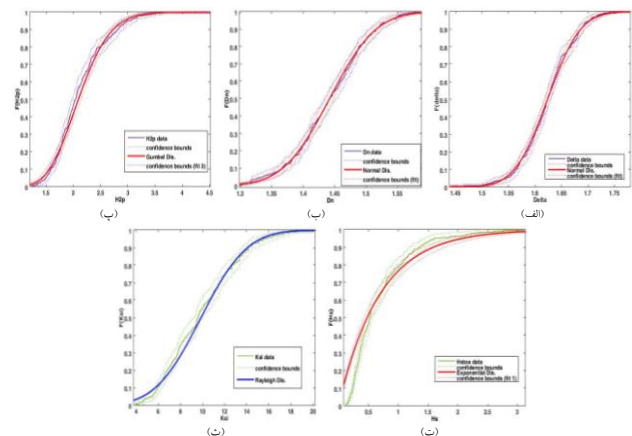
پارامترهای اهمیت و حساسیت، حاصل مشتق شاخص قابلیت اعتماد نسبت به پارامترهای توزیع احتمال می‌باشند. پارامتر  $\gamma$  سهم هر یک از متغیرهای تصادفی را در واریانس تابع حالت حدی و شاخص قابلیت اعتماد نشان می‌دهد. پارامتر  $\delta$  مشخص‌کننده میزان تأثیرگذاری میانگین هر متغیر تصادفی بر شاخص قابلیت اعتماد بوده و ضریب  $\eta$  نیز نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری انحراف معیار هر یک از متغیرهای تصادفی بر شاخص قابلیت

$$\rho = \frac{\text{COV}[X,Y]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (9)$$

که  $\text{COV}[X, Y]$  کوواریانس دو متغیر تصادفی بوده و  $\sigma_X$  و  $\sigma_Y$  انحراف معیار متغیرها هستند. ماتریس همبستگی به دست آمده بین متغیرهای تصادفی دخیل در تابع حالت حدی، در رابطه (۱۰) ارائه شده است.

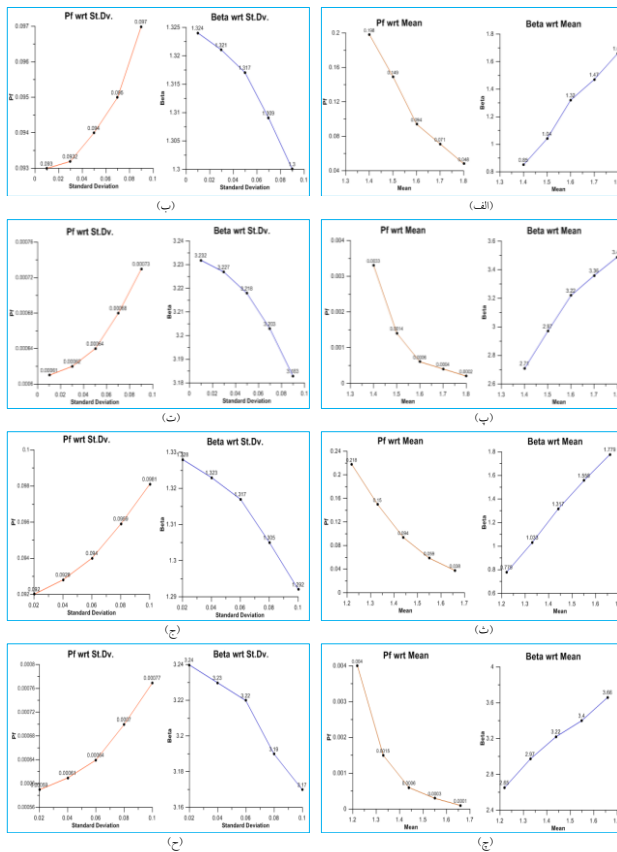
$$(10) \quad \begin{matrix} & \Delta & D_{n50} & H_{2\%} & (H_s)_{1oe} & \xi \\ \Delta & 1 & 0.0578208 & 0.0586585 & -0.0181564 & -0.0102949 \\ D_{n50} & 0.0578208 & 1 & 0.02433 & 0.0100103 & -0.0204609 \\ H_{2\%} & 0.0586585 & 0.02433 & 1 & -0.193643 & 0.0165589 \\ (H_s)_{1oe} & -0.0181564 & 0.0100103 & -0.193643 & 1 & -0.839817 \\ \xi & -0.0102949 & -0.0204609 & 0.0165589 & -0.839817 & 1 \end{matrix}$$

بدیهی است که هر متغیر، با خودش همبستگی کامل داشته و بنابراین ضریب متناظر همبستگی آن برابر یک است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با توجه به خاصیت جابجایی ضریب همبستگی، ماتریس همبستگی یک ماتریس متقارن است. متغیرهای  $(H_s)_{1oe}$  و  $\xi$  بیشترین همبستگی (حدود ۸۴٪) را داشته و با توجه به منفی بودن علامت ضریب متناظر، با یکدیگر رابطه عکس دارند. متغیرهای  $H_{2\%}$  و  $(H_s)_{1oe}$  دارای همبستگی به میزان حدود ۱۹٪ هستند. مشاهده می‌شود که سایر متغیرهای تصادفی، همبستگی بسیار ناچیزی با یکدیگر دارند (کمتر از ۶٪) که این به دلیل ماهیت آن‌هاست. به عنوان مثال، طبیعی است که چگالی نسبی قطعه آرمور همبستگی قابل توجهی با ارتفاع موج شاخص نداشته باشد. بنابراین، ضرایب ناچیز ذکر شده قابل صرف نظر کردن هستند.



شکل ۱۱: مقایسه تابع توزیع تجمعی (CDF) مشاهداتی برای متغیرهای تصادفی دخیل در تابع حالت حدی با توابع مفروض برازش شده طبق جدول (۲) بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل فازی توسط (الف:  $\Delta$ ، ب:  $D_{n50}$ ، پ:  $H_{2\%}$ ، ت:  $H_{s1oe}$  و ث:  $\xi$ )

حال می‌توان با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، نحوه اثرگذاری هر یک متغیرهای تصادفی را بر مقدار عددی شاخص قابلیت اعتماد  $(\beta)$  و احتمال گسیختگی  $(Pf)$  در دو حالت شکست شیرجه‌ای و غلتشی موج بررسی نمود. نتایج در شکل (۱۳) ارائه شده است. با بررسی این شکل، نتایج زیر قابل حصول است.



شکل ۱۳: اثر تغییرات میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی روی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی: (الف) میانگین  $\Delta$  - شیرجه‌ای، (ب) انحراف معیار  $\Delta$  - شیرجه‌ای، (پ) میانگین  $\Delta$  - غلتشی، (ت) انحراف معیار  $\Delta$  - غلتشی، (ث) میانگین  $D_{n50}$  - شیرجه‌ای، (ج) انحراف معیار  $D_{n50}$  - شیرجه‌ای، (خ) میانگین  $H_{2\%}$  - غلتشی، (ح) انحراف معیار  $D_{n50}$  - غلتشی، (ز) میانگین  $H_{2\%}$  - شیرجه‌ای، (د) انحراف معیار  $H_{2\%}$  - شیرجه‌ای، (ذ) میانگین  $H_{2\%}$  - غلتشی، (ر) انحراف معیار  $H_{2\%}$  - غلتشی، (ز) میانگین  $(H_s)_{toe}$  - شیرجه‌ای، (ژ) انحراف معیار  $(H_s)_{toe}$  - شیرجه‌ای، (س) میانگین  $(H_s)_{toe}$  - غلتشی، (ش) انحراف معیار  $(H_s)_{toe}$  - غلتشی، (ص) میانگین  $\xi$  - شیرجه‌ای، (ض) انحراف معیار  $\xi$  - شیرجه‌ای، (ط) میانگین  $\xi$  - غلتشی، (ظ) انحراف معیار  $\xi$  - غلتشی

در هر دو حالت شکست شیرجه‌ای و غلتشی، میانگین متغیرهای  $\Delta$  و  $D_{n50}$  با احتمال شکست رابطه عکس دارند. درحالی که انحراف معیار این دو متغیر، با احتمال شکست رابطه مستقیم دارند. در هر دو حالت شکست شیرجه‌ای و غلتشی، تغییر

اعتماد می‌باشد. هرچه قدر مطلق این ضرایب بزرگتر باشد، اثر آن متغیر نیز بیشتر خواهد بود. جهت دسترسی به روابط مربوط به محاسبه این سه پارامتر می‌توان به Choi و همکاران (۲۰۰۷) و Collins و Nowak (۲۰۰۰) مراجعه نمود.

نتایج تحلیل حساسیت برای دو حالت شکست شیرجه‌ای و غلتشی موج، در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در هر دو حالت شکست شیرجه‌ای و غلتشی، متغیر  $H_{2\%}$  دارای بیشترین ضریب  $\gamma$  است و در نتیجه بیشترین اثر را روی احتمال گسیختگی سازه دارد. دومین متغیر اثرگذار نیز  $\xi$  می‌باشد.

جدول ۳: ضرایب اهمیت و حساسیت در شکست شیرجه‌ای

متغیر تصادفی	$\delta$	$\gamma$	$\eta$
$\Delta$	-۰/۱۰۲۸	-۰/۱۰۲۸	-۰/۰۱۳۷
$D_{n50}$	-۰/۱۳۷۳	-۰/۱۳۷۳	-۰/۰۲۴۵
$H_{2\%}$	۰/۸۲۷۶	۰/۸۲۷۶	-۰/۶۳۱۰
$(H_s)_{toe}$	-۱/۹۶۶۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	-۱/۹۶۶۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	-۸/۱۴۵۰×۱۰ <sup>-۷</sup>
$\xi$	۰/۵۳۴۴	۰/۵۳۴۴	-۰/۳۹۷۸

جدول ۴: ضرایب اهمیت و حساسیت در شکست غلتشی

متغیر تصادفی	$\delta$	$\gamma$	$\eta$
$\Delta$	-۰/۰۹۳۲	-۰/۰۹۳۲	-۰/۰۲۷۸
$D_{n50}$	-۰/۱۲۵۰	-۰/۱۲۵۰	-۰/۰۵۰۰
$H_{2\%}$	۰/۸۵۳۷	۰/۸۵۳۷	-۱/۴۶۶۸
$(H_s)_{toe}$	-۴/۵۰۶۳×۱۰ <sup>-۷</sup>	-۴/۵۰۶۳×۱۰ <sup>-۷</sup>	-۲/۰۸۸۶×۱۰ <sup>-۷</sup>
$\xi$	-۰/۴۹۶۸	-۰/۴۹۶۸	-۱/۲۸۹۶

### ۳-۲-۴ شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی

نتایج به دست آمده برای احتمال گسیختگی، شاخص قابلیت اعتماد و مقدار تابع حالت حدی در جدول (۵) داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در هر دو حالت شکست موج، مقدار تابع حالت حدی مثبت بوده و بنابراین سازه در «محدوده امن» قرار دارد. همچنین میزان احتمال گسیختگی در هر دو حالت، در محدوده قابل قبول است. ضمناً احتمال گسیختگی سازه تحت امواج با شکست شیرجه‌ای در مقایسه با شکست غلتشی به مراتب بیشتر است.

جدول ۵: نتایج تحلیل قابلیت اعتماد به روش SORM

نوع شکست موج	احتمال گسیختگی (%)	شاخص قابلیت اعتماد	مقدار تابع حالت حدی
شیرجه‌ای	۹/۳۹	۱/۳۱۶۹	۳/۹۶×۱۰ <sup>-۷</sup>
غلتشی	۰/۰۶	۳/۲۱۸۲	۹/۷۸×۱۰ <sup>-۸</sup>

در شکست غلتشی نیز تغییرات شاخص قابلیت اعتماد نسبت به تغییر میانگین و انحراف معیار متغیر  $H_{2\%}$  به صورت تدریجی و تقریباً خطی است؛ ولی تغییرات احتمال شکست، شدید و ناگهانی می‌باشد.

در هیچ یک از حالت‌های شکست موج شیرجه‌ای و غلتشی، بین تغییرات میانگین و انحراف معیار متغیر  $(H_s)_{10e}$  و احتمال گسیختگی، رابطه خاصی نمی‌توان برقرار کرد. در شکست شیرجه‌ای، با تغییر میانگین  $(H_s)_{10e}$ ، احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد در ابتدا تغییری ناگهانی داشته و در ادامه تقریباً مقدار ثابتی دارند. در شکست شیرجه‌ای، با تغییر انحراف معیار  $(H_s)_{10e}$ ، احتمال شکست و شاخص اطمینان در ابتدا تقریباً ثابت بوده و در ادامه تغییری ناگهانی دارند. در شکست غلتشی، با تغییر میانگین  $(H_s)_{10e}$ ، احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد در ابتدا تغییری ناگهانی داشته و در ادامه به تدریج تغییر می‌کنند. در شکست غلتشی، با تغییر انحراف معیار  $(H_s)_{10e}$ ، احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد در ابتدا تقریباً ثابت بوده و در ادامه تغییری ناگهانی دارند.

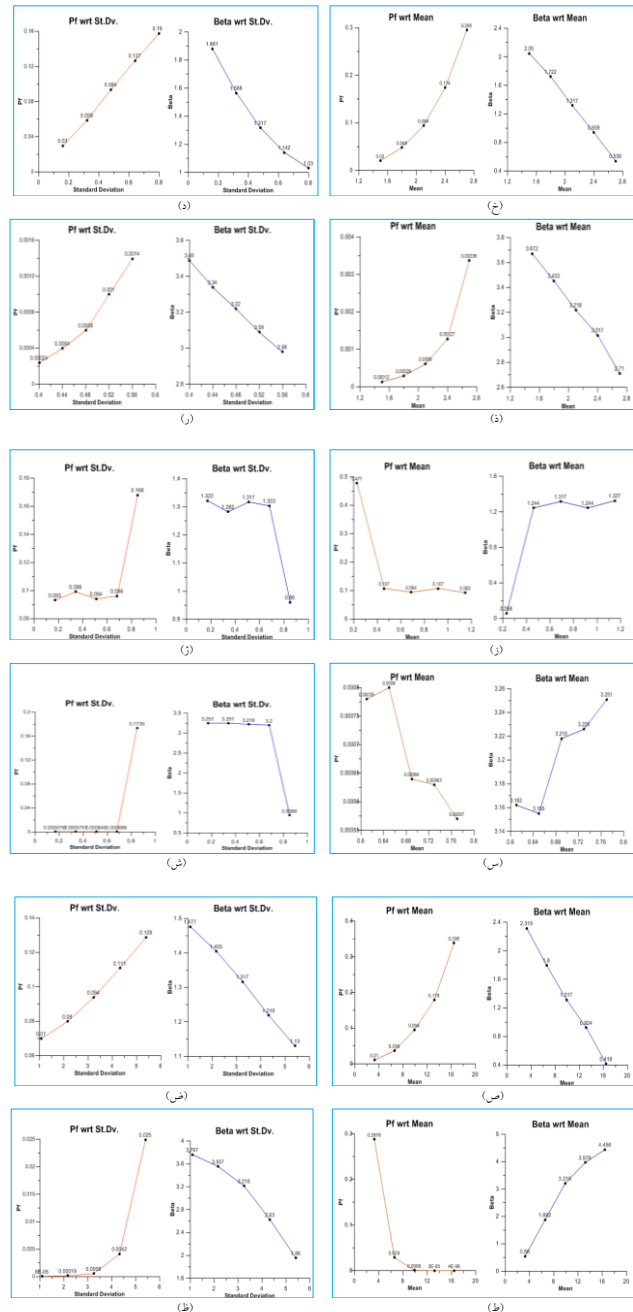
در شکست شیرجه‌ای، میانگین و انحراف معیار متغیر  $\xi$  با احتمال گسیختگی رابطه مستقیم دارند. در شکست غلتشی، میانگین متغیر  $\xi$  با احتمال گسیختگی رابطه عکس و انحراف معیار آن با احتمال گسیختگی رابطه مستقیم دارد. در شکست شیرجه‌ای، تغییرات میانگین و انحراف معیار متغیر  $\xi$  باعث تغییر تدریجی و تقریباً خطی احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد می‌گردد.

در شکست غلتشی، تغییرات احتمال شکست نسبت به افزایش میانگین متغیر  $\xi$  در ابتدا شدید بوده و در ادامه تقریباً ثابت می‌شود؛ در حالی که مقدار احتمال شکست نسبت به افزایش انحراف معیار، در ابتدا تقریباً ثابت بوده و در ادامه به شدت افزایش می‌یابد. در شکست غلتشی، تغییرات شاخص قابلیت اعتماد نسبت به افزایش میانگین متغیر  $\xi$  به صورت تدریجی و صعودی می‌باشد. همچنین تغییرات این شاخص نسبت به انحراف معیار به صورت نزولی و تقریباً خطی است.

#### ۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، خروجی‌های مختلف تحلیل قابلیت اعتماد در برابر گسیختگی ناشی از ناپایداری لایه آرمور برای شاخه غربی

احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد با تغییرات میانگین و انحراف معیار متغیرهای  $\Delta$  و  $D_{n50}$ ، به صورت تدریجی بوده و تغییرات شدید و ناگهانی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۳: ادامه

میانگین و انحراف معیار متغیر  $H_{2\%}$  با احتمال شکست رابطه مستقیم دارد. در شکست شیرجه‌ای، تغییرات میانگین و انحراف معیار متغیر  $H_{2\%}$  باعث تغییر تدریجی و تقریباً خطی احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد می‌گردد.

## منابع

- کیا، س. م.، "منطق فازی در MATLAB"، انتشارات دانشگاهی کیان، تهران، ۱۳۸۹.
- Abdelazim, M., Al Sayed A. I., "Double-Layer Armor Breakwater Stability (Case Study: El Dikheila Port, Alexandria, Egypt)", *Ain Shams Engineering Journal*, pp. 683-689, 2014.
- Burcharth, H. F., Liu, Z., "Design of Dolos Armour Units", *Proceedings of the 23rd International Coastal Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 1053-1066, 1992.
- Choi, S. K., Grandhi, R. V., Canfield, R. A., "Reliability-based Structural Design", Springer-Verlag, UK, 2007.
- Dentale, F., Russo, S. D., Carratelli, E., "Innovative Numerical Simulation to Study the Fluid Motion within Rubble-Mound Breakwaters and the Armour Stability", *17th Armourstone User Meeting*, 2009.
- Hanzawa, M., Sato, H., Takahashi, S., Shimosako, K., Takayama, T., Tanimoto, K., "New Stability Formula for Wave-Dissipating Concrete Blocks Covering Horizontally Composite Breakwaters", *Proceedings of the 25th International Coastal Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 1665-1678, 1996.
- Hudson, R. Y., "Concrete Armor Units for Protection Against Wave Attack", *Miscellaneous Paper H-74-2*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1974.
- Jensen, O. J., "A Monograph on Rubble Mound Breakwaters", *Danish Hydraulic Institute*, Denmark, 1984.
- Lemaire, M., "Structural Reliability", John Wiley & Sons Inc., US, 2009.
- Liang, B., Wu, G., Liu, F., Fan, H., Li, H., "Numerical Study of Wave Transmission over Double Submerged Breakwaters using Non-Hydrostatic Wave Model", *Oceanologia*, Vol. 57, pp. 308-317, 2015.
- Mahsuli, M., Haukaas, T., "Computer Program for موج‌شکن توده‌سنگی بندر انزلی ارائه و در مورد آن‌ها بحث و بررسی تفصیلی صورت گرفت. خلاصه نتایج به شرح ذیل است:
- (۱) احتمال گسیختگی برای هر دو حالت شکست موج شیرجه‌ای و غلتشی، در محدوده قابل قبول قرار گرفته که نشان می‌دهد سازه موج‌شکن جدید بندر انزلی از پایداری کافی برخوردار است.
- (۲) احتمال گسیختگی در حالت شکست غلتشی بسیار کمتر از شیرجه‌ای است؛ زیرا در شکست غلتشی، قسمت عمده‌ای از انرژی موج گرفته شده و در نتیجه نیروی وارد بر سازه بسیار کمتر از شکست شیرجه‌ای است.
- (۳) مقدار تابع حالت حدی در هر دو حالت شکست موج مثبت است که نشان می‌دهد سازه از نظر وضعیت گسیختگی، در «محدوده امن» قرار دارد.
- (۴) از آنجایی که روابط تابع حالت حدی در بررسی پایداری لایه آرمور به شدت غیرخطی هستند، استفاده از روش SORM گزینه مناسبی برای تحلیل قابلیت اعتماد است.
- (۵) با توجه به ماتریس همبستگی، می‌توان دریافت که همبستگی بین متغیرهای  $(H_s)_{10\%}$  و  $\xi$  بسیار زیاد (حدود ۸۴٪)، همبستگی بین  $(H_s)_{10\%}$  و  $H_{2\%}$  قابل توجه (حدود ۱۹٪) و همبستگی بین سایر متغیرها بسیار اندک و قابل صرف نظر است.
- (۶) توابع توزیع احتمال برای متغیرهای تصادفی لزوماً نرمال نبوده و به داده‌های موجود بستگی دارند. این توزیع‌ها پس از کنترل روابط تئوری متنوع و با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و Rt برای تمامی متغیرهای تصادفی دخیل به دست آمدند. تابع توزیع احتمال برای متغیرهای  $\Delta$  و  $D_{n50}$  نرمال، برای متغیر  $H_{2\%}$  گامبل، برای متغیر  $(H_s)_{10\%}$  توانی و برای متغیر  $\xi$  رایلی به دست آمد.
- (۷) نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که متغیر  $H_{2\%}$  بیشترین تأثیر و  $(H_s)_{10\%}$  کمترین تأثیر را روی مقدار احتمال گسیختگی و شاخص قابلیت اطمینان دارند.
- (۸) در شکست شیرجه‌ای، تغییرات میانگین و انحراف معیار متغیر  $H_{2\%}$  بیشترین اثر را روی مقدار احتمال گسیختگی و شاخص قابلیت اعتماد دارند.
- (۹) در شکست غلتشی، تغییرات میانگین متغیر  $\xi$  و انحراف معیار متغیر  $H_{2\%}$  بیشترین اثر را روی احتمال گسیختگی و شاخص قابلیت اعتماد سازه دارند.

- Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS, 1997.
- US Army Corps of Engineers, "Coastal Engineering Manual (CEM): Part VI, Chapter 5", Department of the Army, Washington DC, US, 2011.
- van der Meer, J. W., "Rock Slopes and Gravel Beaches Under Wave Attack", PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1988a.
- van der Meer, J. W., "Stability of Cubes, Tetrapodes and Accropodes", Proceedings of the Breakwaters' 88 Conference: Design of Breakwaters, London, UK, pp. 71-80, 1988b.
- van der Meer, J. W., "Low-Crested and Reef Breakwaters", Report H198/Q638, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands, 1990.
- van der Meer, J. W., "Stability and Transmission at Low-Crested Structures", Delft Hydraulics Publication No. 453, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands, 1991.
- van Gent, M. R. A., Smale, A. J., Kuiper, C., "Stability of Rock Slopes with Shallow Foreshores", Coastal Structures, ASCE, pp. 100-112, 2003.
- Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., Mansard, E. P., Gomez-Pina, G., "A Universal Analysis for the Stability of Both Low-Crested and Submerged Breakwaters", Proceedings of the 23rd International Coastal Engineering Conference, Vol. 2, pp. 1679-1692, 1992.
- Multimodel Reliability and Optimization Analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 27, pp. 87-98, 2013.
- Mamdani, E. H., "Application of Fuzzy Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant", Proceedings of the Institution of Electric Engineers Control & Science, 1974.
- Melby, J. A., Turk, G. F., "The CORE-LOC: Optimized Concrete Armor", Proceedings of the 24th International Coastal Engineering Conference, Vol. 2, pp. 1426-1438, 1994.
- Milanian, F., Zakeri Niri, M., Najafi-Jilani, A., "Effect of Hydraulic and Structural Parameters on the Wave Run-up over the Berm Breakwaters", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, pp. 1-10, 2016.
- Nowak, A. S., Collins, K. R., "Reliability of Structures", McGraw-Hill Inc., US, 2000.
- Powell, K. A., Allsop, N. W., "Low-Crest Breakwaters, Hydraulic Performance and Stability", Report No. SR 57, Hydraulics Research Station, Wallingford, UK, 1985.
- Thaha, A., Maricara, T., Aboe A. F., Dwipuspit, A. I., "The Breakwater from Wave Breaker to Wave Catcher", 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), pp. 691-698, 2015.
- Turk, G. F., Melby, J. A., "CORE-LOC Concrete Armor Units: Technical Guidelines", Miscellaneous Paper CHL-97-6, US Army Engineer Waterways Experiment