

توسعه یک چارچوب محاسباتی برای تحلیل قابلیت اعتماد متغیر در زمان در سکوهای ثابت فلزی فراساحل

حسین غلامی^۱، احمد ایزدی^۲

Hosein.gholami@gmail.com

۱- دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مطالعه با توجه به اهمیت تحلیل قابلیت اعتماد در ارزیابی احتمالاتی وضعیت سکوهای فراساحل، یک چارچوب محاسباتی مبتنی بر روش‌های احتمالاتی ارائه می‌گردد. برای انجام تحلیل قابلیت اعتماد از روش FORM استفاده شده است. در رویکرد تحلیل قابلیت اعتماد به کار گرفته شده در این مطالعه، در هر گام از تحلیل قابلیت اعتماد نیروهای محیطی یا پاسخ سازه مستقیماً محاسبه می‌شود. این چارچوب احتمالاتی برای تحلیل ۳ سکوی فراساحلی موجود که در سال‌های مختلف طراحی، ساخته و نصب شده‌اند، بکار گرفته شده است و احتمال شکست سالانه در سال‌های مختلف در طول عمر بهره‌برداری از سکو محاسبه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد سکوها نشان می‌دهد که با توجه به کاهش کارایی سیستم حفاظت از خوردگی پس از پایان عمر طراحی سکوها، مقدار احتمال شکست به فرم یک تابع درجه ۲ افزایش می‌یابد. همچنین، سکوهایی که با استانداردهای گذشته طراحی شده‌اند، شاخص قابلیت‌اعتماد پایین‌تری نسبت به سکوهای طراحی شده در سال‌های اخیر دارند.

واژگان کلیدی: سکوهای ثابت فراساحل، قابلیت اعتماد، ارزیابی، احتمال شکست.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۹/۱۲/۱۹

۱- مقدمه

سکوهای فراساحل در زمره پرمخاطره‌ترین تاسیسات در زنجیره تولید انرژی در جهان می‌باشند. این سکوها در صنایع نفت و گاز برای مقاصد مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطور کلی فرآیندهای خرابی و آسیب متعددی سلامت سازه‌های این نوع از سازه‌ها را تهدید می‌نمایند. مساله عدم قطعیت در ارزیابی سازه‌های موضوعی قابل توجه بوده و لازم است در فرآیند تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. بطور عمومی یک سازه دریایی یک ساختار پیچیده است که به دلیل کیفیت مصالح و مهارت ساخت، با عدم قطعیت‌ها و نواقص بسیاری تولید می‌شود و در معرض بارهای تصادفی ناشی از باد، امواج، جریان، یخ، دما و غیره قرار می‌گیرد. در نتیجه، اتخاذ یک رویکرد احتمالاتی برای ارزیابی و تصمیم‌گیری به نحوی که در آن اثرات تمامی عدم قطعیت‌های ذکر شده در نظر گرفته شود، دارای اهمیت می‌باشد. همچنین انجام بازرسی کامل از سازه‌های فراساحل که عمدتاً از تعداد زیادی المان تشکیل شده‌اند و دسترسی به برخی از آنها با دشواری‌هایی روبرو است، فرآیندی پیچیده و زمان‌بر می‌باشد. بنابراین به عنوان یک رویکرد تصمیم‌گیری بهینه، نمونه‌های انتخابی برای بازرسی می‌تواند از اعضای که بطور محاسباتی دارای احتمال شکست بالاتری هستند، انتخاب شوند. آنچه به عنوان یک خلا در این مقوله مطرح می‌باشد، فقدان یک چارچوب محاسباتی به منظور ارزیابی وضعیت سکوهایی موجود و تصمیم‌گیری منطقی و مقرون به صرفه و در عین حال تضمین الزامات با توجه به ایمنی پرسنل و مسائل زیست محیطی می‌باشد.

یکی از اصلیت‌ترین دلایل ارزیابی یک سازه موجود، بررسی امکان ادامه بهره‌برداری از آن سازه بعد از اتمام عمر طراحی آن می‌باشد. از نقطه نظر اقتصادی ادامه استفاده از یک سازه موجود در بسیاری از موارد نسبت به ساخت و نصب یک سکوی جدید ارجح می‌باشد. این امر برای بسیاری از سکوهایی فراساحل حتی در صورت نیاز به انجام اصلاحات عمده در سازه ترجیح داده می‌شود. همچنین در صورت وقوع مواردی مانند خرابی یا آسیب در سازه، افزایش پرسنل، افزایش تجهیزات و غیره انجام ارزیابی ضرورت می‌یابد. هدف اصلی از ارزیابی یک سازه موجود این است که اطمینان حاصل شود که احتمال خرابی سازه در حد

قابل قبولی می‌باشد. روش احتمالاتی مبتنی بر تحلیل قابلیت اعتماد یکی از موثرترین روش‌ها برای ارزیابی سکوهایی موجود می‌باشد. این تحلیل بخوبی اثرات واقعی عدم قطعیت‌ها در مورد سازه و وضعیت آن را در نظر می‌گیرد و تلاش می‌کند ایمنی سازه را مستقیماً مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

در طول چند دهه گذشته مساله قابلیت اعتماد در سکوهایی فراساحل در مطالعات متعددی مورد بحث قرار گرفته است. در محدوده سالهای ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ Bea و همکاران [۱ و ۲] تحقیقات زیادی را در مورد توسعه روش‌های ارزیابی قابلیت اعتماد سکوهایی فراساحل و محاسبه احتمال شکست آنها انجام دادند. این تحقیقات در نهایت منجر به ارائه یک بسته نرم‌افزاری تحت عنوان ULSLEA گردید و قابلیت‌ها و کاربرد آن در طول تحقیقات مفصلی مورد بحث و بررسی قرار گرفت [۳]. در سال ۱۹۹۸ Cornell و همکاران [۴] نتایج مطالعات خود در زمینه تحلیل قابلیت اعتماد سکوهایی ثابت تحت بار امواج را ارائه نمودند. پیش از آن Cornell مطالعات گسترده‌ای را در زمینه تحلیل احتمالاتی سازه‌ها در برابر زلزله انجام داده بود و روابطی برای محاسبه احتمال شکست سازه‌ها در برابر زلزله ارائه نمود [۵ و ۶]. آنها برای محاسبه احتمال شکست در سکوها از رابطه جدیدی استفاده نمودند. در سال ۲۰۰۵ از سوی Ersdal [۷] مطالعاتی بر روی امکان افزایش عمر سکوهایی فراساحل موجود انجام پذیرفت. هدف از این مطالعه توسعه یک چارچوب نظری برای روش‌ها و استانداردها در حوزه تمدید عمر تاسیسات فراساحل بوده است. در این مطالعه امکان استفاده از روش‌های احتمالاتی برای ارزیابی تمدید عمر سکو مورد بررسی قرار گرفته است. در محدوده سالهای ۲۰۰۶ الی ۲۰۰۹ و پس از وقوع طوفان‌هایی در خلیج مکزیک و ایجاد خسارت‌های فراوان ناشی از آن، مطالعاتی از سوی گروه مهندسی Energo صورت پذیرفت [۸ و ۹]. هدف اصلی این پروژه تعیین قابلیت اعتماد سکوهایی فراساحل موجود در خلیج مکزیک بوده است. در سال ۲۰۱۰ Zhang و همکاران [۱۰]، یک مدل احتمالاتی بر پایه قابلیت اعتماد برای خوردگی در محیط دریا ارائه نمودند. در این مدل به دلیل نبود اطلاعات کامل و دقیق، پارامترهای مدل پیشنهادی بطور دقیق تعیین نشده است و صرفاً به شکل یکسری محدوده‌هایی مشخص شده است. در سال ۲۰۱۱،

تحلیل قابلیت اعتماد سکوه‌های فراساحل و محاسبه احتمال شکست سکو، روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) بکار گرفته می‌شود. بدین منظور، یک برنامه کامپیوتری جدید توسعه داده شده است. این برنامه با یک نرم افزار اجزا محدود برای انجام تحلیل‌های سازه‌ای مورد نیاز و همچنین یک برنامه مجزا برای محاسبه نیروهای محیطی مرتبط شده است.

۲- تحلیل قابلیت اعتماد

هر مساله قابلیت اعتماد از دو جز اساسی تشکیل شده است. نخستین جز، تابع حالت حدی می باشد که برای تعریف محدوده خرابی استفاده می شود. این تابع می تواند تابعی صریح و یا ضمنی از یک یا چندین متغیر تصادفی موجود در مساله باشد. جز دوم، متغیرهای دارای عدم قطعیت می باشد که با اختصاص توابع توزیع احتمالاتی و تعیین پارامترهای مرتبط با هر توزیع تعریف می گردد. هدف نهایی در حل مساله قابلیت اعتماد، محاسبه احتمال شکست بر مبنای معیار شکست تعریف شده در مساله می باشد. مقدار این احتمال با انتگرال گیری از تابع توزیع احتمال مشترک متغیرهای تصادفی در محدوده شکست، به صورتی که در رابطه (۱) نشان داده شده است، بدست می آید.

$$P_f = P(g < 0) \\ = \int \dots \int f(x) dx, \text{ Where } g < 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق، $f(x)$ تابع توزیع احتمال مشترک متغیرهای تصادفی می باشد. مسائلی که در آنها حالت مشترک بیش از یک تابع حالت حدی، وضعیت شکست را تعریف نماید، به عنوان مساله قابلیت اعتماد سیستم نامگذاری می گردد. رابطه (۱) نشان می دهد که در مساله قابلیت اعتماد جزء، انتگرال گیری از چگالی احتمال در فضای X و جایی که تابع حالت حدی منفی می گردد، مورد نظر می باشد. حل انتگرال چندگانه فوق به صورت تحلیلی مگر در موارد خاصی، مقدور نمی باشد، اگر چه روش‌هایی مانند FORM، SORM و نمونه گیری پاسخ‌های تقریبی را فراهم می نمایند.

از اوایل دهه ۸۰ میلادی، هنگامی که طراحی به روش حالت حدی جایگزین روش تنش مجاز گردید، "حالات حدی" فراوانی وارد ادبیات فنی شده است. بطور معمول به حالت‌های حدی که به مقاومت مربوط می شوند، "حالت‌های حدی نهایی (ULS)" اطلاق می شود. این در حالی است که

Golafshani و همکاران [۱۱] یک چارچوب احتمالاتی جدید پیشنهاد دادند تا بتوان با استفاده از آن عملکرد جکت‌های سکوه‌های فراساحل تحت بار موج نهایی را ارزیابی نمود. این چارچوب می تواند عدم قطعیت‌های موجود در سه بخش متشکل از پارامترهای دریایی، پاسخ سازه‌ای و ظرفیت فروریزش را در نظر بگیرد. در سال ۲۰۱۲ Gholizad و همکاران [۱۲]، روش جدیدی را برای مطالعه اعتمادپذیری خستگی سکوه‌های ثابت فلزی دریایی را با تحلیل چندین سناریو شکست معرفی کردند. این روش برای ارزیابی سکوه‌های موجود و همچنین توسعه برنامه بازرسی با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد پیشنهاد شده است. در سال ۲۰۱۲ Moan و همکاران [۱۳]، یک مطالعه بر روی قابلیت اعتماد خستگی جکت‌های مربوط به توربین‌های بادی فراساحل که برای نصب در دریای شمال در عمق آب ۷۰ متر طراحی شده بودند، انجام دادند. در این مطالعه پاسخ دینامیکی زیر سازه نگهدارنده توربین تحت اثر نیروهای امواج و باد با استفاده از یک تحلیل مجزا محاسبه شده است. در سال ۲۰۱۴، Diznab و همکاران [۱۴] یک روش عملی تحت عنوان تحلیل موج دوام اصلاح شده با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی و احتمالاتی بارگذاری موج معرفی نمودند. در سال ۲۰۱۷ Viveros و همکاران [۱۵] یک مدل عمومی برای در نظرگیری عدم قطعیت پارامترهای مدل در تحلیل قابلیت اعتماد سکوه‌های فراساحل تحت شرایط طوفانی معرفی نمودند. در سال ۲۰۱۸، Clark و همکاران [۱۶] برای بهینه سازی مبتنی بر قابلیت اعتماد در سیستم های انرژی تجدیدپذیر فراساحل از اطلاعات موجود برای سیستم‌های مشابه این نوع سازه‌ها استفاده کردند و با ترکیب آنها روش جدیدی را توسعه دادند. در سال ۲۰۱۹، Guede [۱۷] روش جدیدی را برای ارزیابی مبتنی بر ریسک و ارائه برنامه بازرسی به عنوان بخشی از برنامه مدیریت یکپارچه سازه‌های در سکوه‌های ثابت فراساحل توسعه داد. همچنین مطالعاتی در زمینه ارزیابی قابلیت اعتماد خستگی و اثرات عوامل دارای عدم قطعیت بر روی آنها در توربین های بادی فراساحل در مطالعات صورت گرفته توسط Horn و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸و۱۹].

در این مطالعه با توجه به اهمیت تحلیل قابلیت اعتماد در ارزیابی وضعیت سکوه‌های موجود، یک چارچوب محاسباتی مبتنی بر روش‌های احتمالاتی ارائه می گردد. در اینجا برای

با توجه به اینکه حل تحلیلی انتگرال ارائه شده در رابطه (۱) تنها در چند حالت خاص امکان پذیر می باشد، روش های بسویاری برای حل تقریبی از جمله FORM، FOSM، SORM، انواع روش های نمونه گیری و روش های رویه پا سخ تو سعه داده شده است. برای مرور این روش ها به مطالعات انجام گرفته توسط Ang و Tang [۲۱]، Toft-، Christensen و Bake [۲۲] Madsen و همکاران [۲۳] و Melchers و همکاران [۲۴] ارجاع داده می شود. با توجه به بکارگیری روش قابلیت اعتماد مرتبه اول در مطالعه حاضر به منظور انجام تحلیل قابلیت اعتماد، توضیحات مربوط به این روش به تفصیل بیان خواهد گردید.

روش قابلیت اطمینان مرتبه اول یا به اختصار FORM، مشکل تغییرناپذیری روش FOSM را حل می نماید و از اطلاعات مربوط به نوع تابع توزیع احتمال متغیرهای تصادفی استفاده می نماید. این مزایا همراه با هزینه های محاسباتی بیشتر نسبت به FOSM بوده و در عین حال احتمال وقوع عدم همگرایی نیز وجود خواهد داشت. در این روش از خطی سازی تابع حالت حدی استفاده می شود و هنگامی که تابع حالت حدی غیرخطی باشد، منجر به پاسخ های تقریبی می شود. در اینجا تابع حالت حدی بجای نقطه میانگین در نقطه ای که $g = 0$ می باشد، تقریب زده می شود. در واقع بجای آنکه تابع حالت حدی روی نقطه میانگین خطی سازی شود، خطی سازی در جاییکه همه توابع معادل با یکدیگر اشتراک دارند (یعنی $g=0$) انجام داده می شود. بر اساس پیش درآمد ذکر شده دو سوال مطرح می گردد. کدام نقطه بر روی رویه حالت حدی انتخاب می شود و در ادامه احتمال شکست چگونه محاسبه می گردد. پاسخ به هر دو سوال فوق در مفهوم فضای استاندارد نرمال نهفته است. فضای استاندارد نرمال فضایی متشکل از متغیرهای تصادفی نرمال ناهمبسته با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ می باشد و به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$\varphi(\mathbf{y}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\mathbf{y}^T\mathbf{y}\right) \quad (5)$$

انتقال از فضای اصلی x به فضای استاندارد نرمال y به دو دلیل صورت می گیرد:

۱- فضای استاندارد نرمال دارای تقارن چرخشی و شعاعی می باشد. در نتیجه، نقطه ای روی رویه حالت حدی که

حالت های حدی که به تغییر شکل و ارتعاش مربوط می شوند، "حالت های حدی بهره برداری (SLS)" نامیده می شوند [۲۰]. بطور کلی یک تابع حالت حدی آنچه را که به عنوان شکست در نظر گرفته می شود، تعریف می نماید. ساده ترین و در عین حال اساسی ترین مساله در تحلیل قابلیت اعتماد، مساله قابلیت اعتماد پایه می باشد که با تابع حالت حدی به فرم زیر تعریف می گردد:

$$g = R - S \quad (2)$$

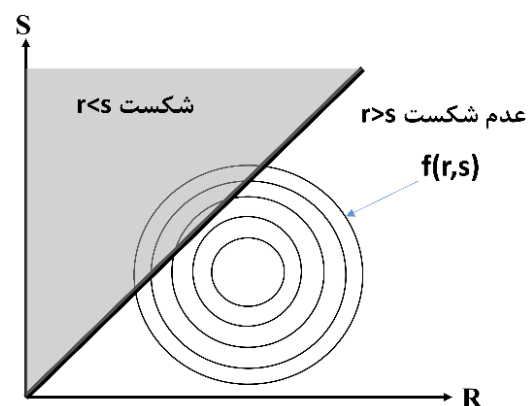
در این رابطه R و S متغیرهای تصادفی هستند که به ترتیب بیانگر مقاومت و تقاضا (مثلا نیرو) می باشند. مشاهده می شود که در صورتی که S بیش از R گردد، مقدار g منفی شده و بنابراین تابع حالت حدی به خوبی رویداد شکست را تعریف کرده است. با فرض آنکه نیرو و مقاومت به صورت آماری مستقل باشند، تابع توزیع احتمال مشترک به صورت رابطه زیر نوشته می شود.

$$f(r,s) = f(r)f(s) \quad (3)$$

بنابراین احتمال شکست برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} P_f &= \iint_{R < S} f_R(r)f_S(s)drds \\ &= \int_0^\infty \int_0^s f_R(r)f_S(s)drds \\ &= \int_0^\infty F_R(s)f_S(s)ds \end{aligned} \quad (4)$$

رابطه (۴) نشان می دهد که در واقع احتمال شکست، حل انتگرال فوق می باشد. احتمال شکست برای مساله فوق در نمایش صفحه ای تابع توزیع دو متغیره، در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱) مساله قابلیت اعتماد پایه در فضای متغیرهای تصادفی.

گام های اصلی در الگوریتم حل به روش FORM در برنامه فوق به شرح زیر می باشد:

۱- انتخاب نقطه شروع در فضای استاندارد نرمال که \mathbf{y}_m نامیده می شود و در آن بردار متغیرهای تصادفی است.

۲- محاسبه G_0 که در آن مقدار تابع حالت حدی در نقطه شروع می باشد.

۳- انتقال بردار \mathbf{y}_m به فضای اصلی که \mathbf{x}_m نامیده می شود و در آن بردار متغیرهای تصادفی در فضای اصلی می باشد.

۴- محاسبه تابع حالت حدی $g(\mathbf{x}_m) = G(\mathbf{y}_m)$ که در آن G و g بترتیب تابع حالت حدی در فضای استاندارد نرمال و فضای اصلی می باشد.

۵- محاسبه گرادیان تابع حالت حدی $G(\mathbf{y}_m)$ بصورت زیر:

$$\nabla_y G = \frac{\partial g}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial y} \quad (8)$$

۶- کنترل دو معیار همگرایی بصورت همزمان به ترتیب زیر:

$$|G(\mathbf{y}_m)/G_0| \leq e_1 \quad (9)$$

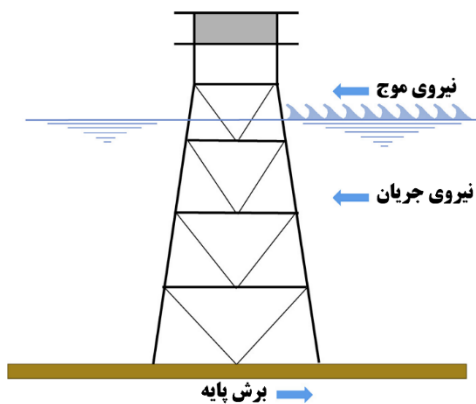
$$\left\| \frac{\mathbf{y}_m}{\|\mathbf{y}_m\|} - (\alpha_m^T \frac{\mathbf{y}_m}{\|\mathbf{y}_m\|}) \right\| \leq e_2 \quad (10)$$

که در آن α_m قرینه بردار گرادیان نرمال شده است و e_1 و e_2 میزان تلورانس قابل پذیرش می باشد.

۷- اگر شرط همگرایی حاصل نشده باشد، $\mathbf{y}_{m+1} = \mathbf{y}_m + d$ بردار جستجوی جهت که بصورت زیر تعریف می شود، می باشد:

$$d = \frac{G(\mathbf{y}_m)}{\|G(\mathbf{y}_m)\|} \alpha_m \quad (11)$$

۸- تکرار مراحل ۳ الی ۷ تا زمانیکه شرایط همگرایی حاصل گردد.



شکل (۲) نمایش شماتیک سازه جکت در معرض بارهای محیطی.

نزدیکترین نقطه به مبدا باشد، نقطه ای روی حوزه شکست می باشد که دارای بیشترین چگالی احتمال است. لذا چنانچه خطی سازی در این نقطه صورت گیرد، بیشترین دقت را خواهیم داشت، چراکه بیشترین چگالی احتمال حول این نقطه است.

۲- در فضای استاندارد نرمال، جرم احتمال خارج از یک ابرصفحه که در تحلیل FORM مورد نیاز می باشد، به راحتی قابل محاسبه می باشد. مقدار احتمال خارج از یک ابرصفحه به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

در رابطه فوق β فاصله از مبدا تا نزدیکترین نقطه روی ابرصفحه می باشد. تابع حالت حدی در فضای اصلی به صورت $g(\mathbf{x})$ و در فضای استاندارد نرمال با $G(\mathbf{y})$ نمایش داده می شود.

۳- توسعه یک مدل احتمالاتی

در این مطالعه برای تحلیل قابلیت اعتماد سکوهای فراساحل، روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) بکار گرفته می شود. بدین منظور، یک برنامه کامپیوتری توسعه داده شده است. این برنامه با نرم افزار اجزا محدود و متن باز OpenSees مرتبط شده است تا در هر گام حل مساله با اعلام مقادیر اختصاص داده شده به متغیرهای تصادفی، پاسخ مورد نیاز سازه ای (برای مثال برش پایه بیشینه) بدست آید. از سوی دیگر این برنامه با یک کد عددی به زبان برنامه نویسی Fortran که برای محاسبه نیروهای محیطی موج و جریان در هر حالت اختصاص مقادیر به متغیرهای تصادفی مربوطه توسعه داده شده است، مرتبط شده است.

در این مطالعه تابع حالت حدی به صورت رابطه (۷) تعریف می گردد:

$$g = BS_{Capacity} - BS_{Demand} \quad (7)$$

در رابطه فوق، $BS_{Capacity}$ بیشینه برش پایه ای است که قبل از فروریزش کل سکوه، میتواند تحمل شود و BS_{Demand} حداکثر برش پایه ای است که توسط برخورد بارهای محیطی مشخص به سکوه اعمال می گردد. نمایش شماتیک از برخورد بارهای محیطی و محاسبه برش پایه در شکل (۲) ارائه شده است.

به صورت خطی و با سیستم معادل شمع گیردار که در آن طول شمع ۱۰ برابر قطر خارجی شمع در نظر گرفته شده است، مدل سازی می شود. وزن عرشه شامل وزن المان های فولادی، بارهای عملکردی عرشه (از جمله تجهیزات مکانیکال، لوله کشی، برق، ابزار دقیق و تهویه و غیره) و بار زنده می باشد که به عنوان متغیر دارای عدم قطعیت تعریف می شود و به صورت بار متمرکز بر گره های اصلی جکت اعمال می شود. بارهای سرویس که توسط سازه تحمل می شود شامل بار مرده به علاوه نیمی از بار زنده و همچنین بار محیطی موج و جریان می باشد. نمایی از مدل اجزا محدود و مشخصات اصلی سکوها فوق به ترتیب در شکل (۴) و جدول (۱) نمایش داده شده است.

ظرفیت برش پایه نهایی سکو با استفاده از انجام یک تحلیل بارافزون غیرخطی به دست می آید. برای این منظور، مقادیر متغیرهای از پیش تعیین شده از جمله خوردگی، تنش تسلیم و وزن عرشه از سوی برنامه اصلی به مدل اجزا محدود اعلام می گردد:

- خوردگی با کاهش ضخامت بیرونی اعضا تعریف می گردد.
- تنش تسلیم به مشخصات اعضا معرفی می گردد.
- وزن عرشه بر روی گره های اصلی فوقانی جکت اعمال می شود.

در ادامه، الگوی بارگذاری ۱۰۰ ساله موج و جریان که غالباً در طراحی این نوع سکوها مورد استفاده قرار می گیرد، به سازه اعمال می شود. سپس بارها با اعمال یک ضریب افزایش یافته تا رسیدن سازه به مقاومت نهایی آن افزایش می یابد. بیشینه باری که توسط سکو تحمل می گردد، با استفاده از منحنی نیرو-تغییر مکان بدست می آید. مقدار این نیرو به عنوان ظرفیت برش پایه نهایی در حالت مشخص شده به برنامه اصلی اعلام می گردد. برای تعیین بحرانی ترین حالت جهت برخورد موج، تحلیل های جداگانه ای برای ۸ جهت اصلی انجام می گیرد و بحرانی ترین جهت مشخص می گردد. در تحلیل احتمالاتی آتی از مشخصات این موج برای تمامی جهت ها استفاده خواهد شد.

در این تحلیل قابلیت اعتماد، چندین متغیر دارای عدم قطعیت در مقاومت و بار در نظر گرفته شده است. برای در نظرگیری اثرات خوردگی در اعضای زیرآب از مدل احتمالاتی متغیر در زمان، استفاده شده است [۲۵].

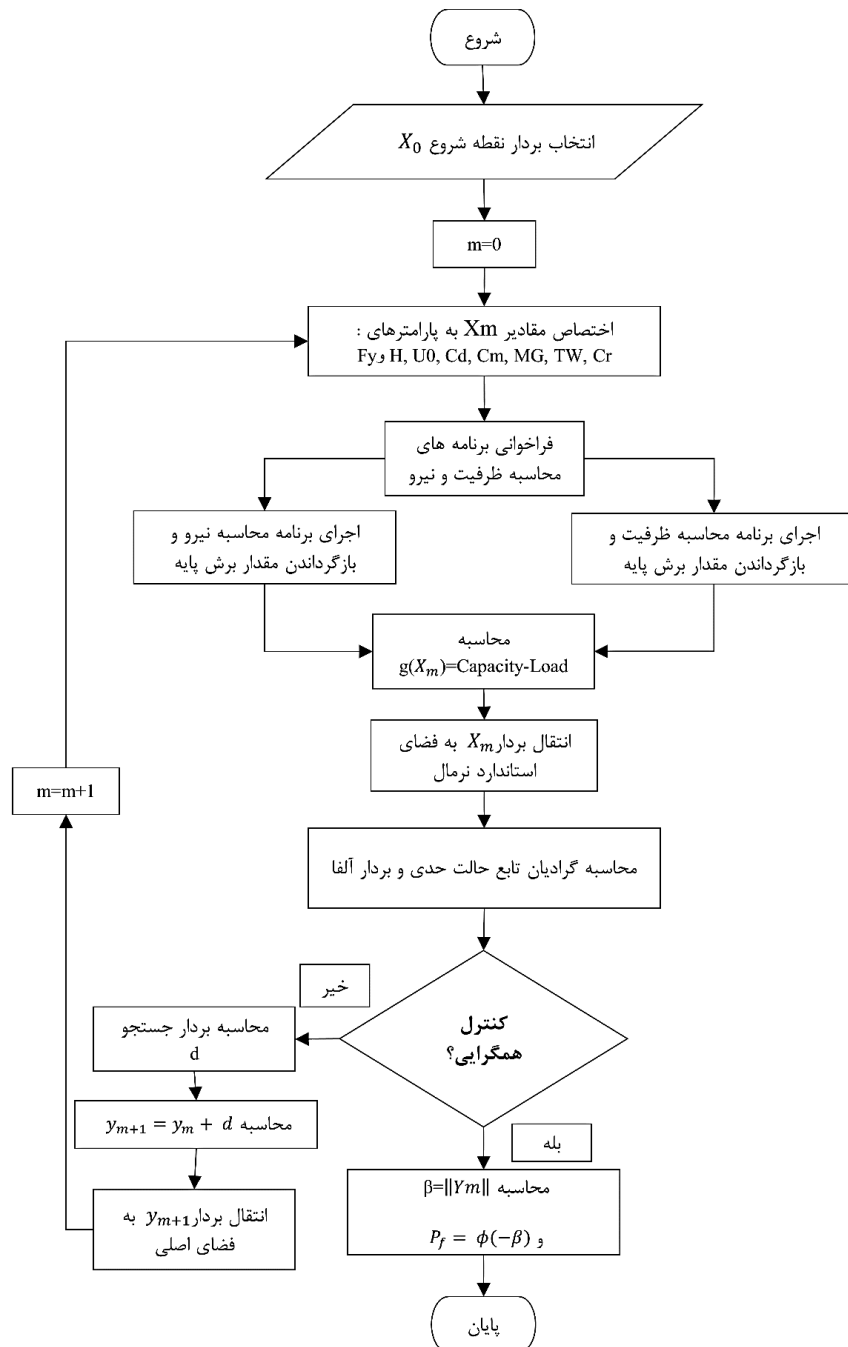
در گام نهایی پس از حصول شروط همگرایی، اندازه بردار \mathbf{y}_m در فضای استاندارد نرمال برابر با شاخص قابلیت اعتماد β خواهد بود. احتمال شکست متناظر با شاخص قابلیت اعتماد β بصورت زیر بدست می آید:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (12)$$

که در آن Φ تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال می باشد. برنامه توسعه داده شده در این مطالعه، برای محاسبه مقدار احتمال شکست سالانه به صورتی که در رابطه (۱) نشان داده شده است، بکار می رود. الگوریتم کلی به کار گرفته شده در این برنامه در شکل (۳) نمایش داده شده است. در ابتدا متغیرهای تصادفی مختلف در نظر گرفته شده در مساله، با اختصاص توابع توزیع متناسب با آنها و تعریف پارامترهای توزیع مربوطه تعریف می شوند. سپس الگوریتم حل بازگشتی به ترتیبی که در بخش قبل ارائه شد بکار می رود تا شاخص قابلیت اعتماد محاسبه گردد. برای محاسبه تابع حالت حدی و بردار گرادینان در هر گام حل m ساله، برنامه مدل های محاسبه بارهای هیدرو دینامیکی (به زبان فرترن) و محاسبه ظرفیت سازه (دستورات OpenSees) را فرا می خواند و ضمن اعلام مقادیر متغیرهای تصادفی به مدل های محاسباتی فوق، دستور اجرای آنها را صادر می نماید. پس از انجام محاسبات، پاسخ مورد نظر به برنامه بازگشت داده می شود. برای انجام محاسبات، الگوریتم حل توضیح داده شده در بخش قبل مورد استفاده قرار می گیرد. پس از حصول شروط همگرایی و دستیابی به نقطه طراحی، شاخص قابلیت اعتماد و متعاقب آن احتمال شکست سالانه محاسبه می گردد.

۴- مطالعه موردی

در این مثال کاربرد مدل احتمالاتی پیشنهاد شده در تحلیل قابلیت اعتماد سه سکوی ثابت فلزی فراساحل موجود در منطقه خلیج فارس که در سالهای مختلف طراحی، ساخته و نصب شده اند، نشان داده می شود. در اینجا فرض می گردد که پوشش محافظ و سیستم حفاظت کاتدی بعد از سال بیست و پنجم از عمر بهره برداری سکو بی اثر می گردند و اعضای سازه ای بر اساس الگوی تعریف شده، دچار خوردگی خواهند شد. فرض می شود که تمام اعضای لوله ای زیرسطح آب دارای میانگین خوردگی یکسانی می باشند. برای کاهش زمان تحلیل و با حفظ دقت مورد نیاز، سیستم شمع-خاک



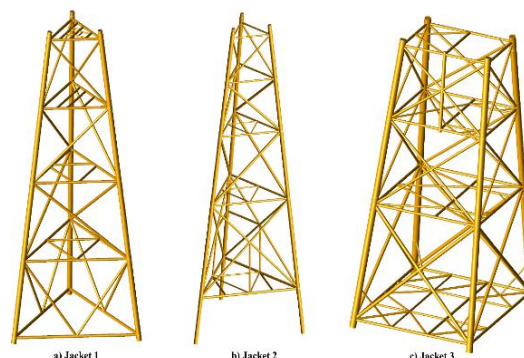
شکل (۳) روند تحلیل قابلیت اعتماد در این مطالعه.

جدول (۱) مشخصات اصلی سکوی مورد مطالعه

شماره سکو	تعداد پایه ها	عمق آب (متر)	وزن جکت (تن)	وزن عرشه (تن)	زمان نصب سکو	مشخصات شمع
سکوی شماره ۱ سکوی سرچاهی	۳	۴۵	۱۴۰	۲۰۰	۱۹۷۴	۳ شمع تزریقی با عمق نفوذ ۵۵ متر و قطر بیرونی ۷۶۲ میلیمتر
سکوی شماره ۲ سکوی پایه پل	۳	۶۴,۹۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۱۲	۳ شمع غیرتزریقی با عمق نفوذ ۶۴ متر و قطر بیرونی ۹۱۴ میلیمتر
سکوی شماره ۳ سکوی سرچاهی	۴	۶۴,۷۰	۲۱۰۰	۳۰۰۰	۲۰۱۲	۴ شمع تزریقی با عمق نفوذ ۹۵ متر و قطر بیرونی ۱۵۲۴ میلیمتر

material که در کتابخانه نرم افزار موجود می باشد، استفاده می شود. برای تعریف حد مجاز در ناحیه غیرخطی از نسبت شکل پذیری ۲۰ استفاده می شود. میزان سخت شدگی کرنشی ۲٪ برای توصیف رفتار فولاد پس از نقطه تسلیم در نظر گرفته می شود. اثرات تغییر شکل های بزرگ با به کارگیری سیستم انتقال Corotational برای انتقال محورها و نیرو و سختی در هرگام از تحلیل در نظر گرفته می شود.

بارهای محیطی که تمامی تحلیل ها اعمال می شود، بارهای موج و جریان می باشد. برای محاسبه بار موج یک زیربرنامه به زبان برنامه نویسی فرترن توسعه داده شده است. این برنامه قادر است که معادلات موج را با استفاده از تئوری موج استوکس مرتبه ۵ حل نماید. سرعت و شتاب ذرات آب در اعماق مختلف در هرگام زمانی محاسبه می شود [۲۷]. سرعت جریان بصورت برداری با سرعت ناشی از موج ترکیب می شود. برای در نظر گیری اثرات روئیدنی های دریایی، ضخامت اختصاص داده شده به آن به قطر خارجی اعضا اضافه می گردد. با داشتن سرعت و شتاب ذرات آب و اعلام ضرایب درگ و اینرسی تو وسط برنامه اصلی، نیروی موج و جریان با استفاده از معادله موریسون محاسبه می شود. قابل ذکر است که اعضای عرشه در مدل محاسبه بار مدلسازی نشده است، بنابراین نیروی موج وارد بر عرشه در نظر گرفته نمی شود.



شکل (۴) نمایی از مدل اجزا محدود جکت های مورد مطالعه.

در اینجا فرض می شود که مقدار خوردگی برای تمامی اعضا مستغرق و اعضای موجود در ناحیه پاشش یکسان می باشد. عدم قطعیت های مربوط به سایر عوامل با پارامترهای تعریف شده در نظر گرفته می شود. خلاصه ای از پارامترهای آماری و توصیف متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده در تحلیل احتمالاتی در جدول (۲) ارائه شده است.

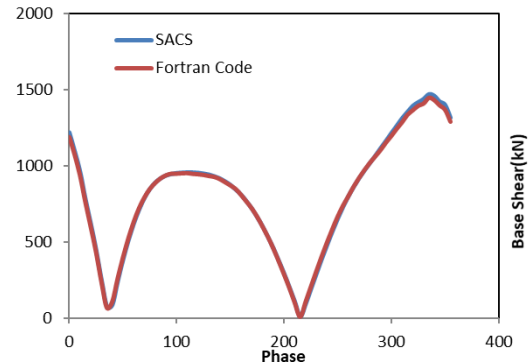
در این مطالعه برای انجام تحلیل بارافزون از نرم افزار متن باز OpenSees استفاده شده است [۲۶]. کلید اعضای فولادی از جمله پایه ها، شمع ها و مهاربندهای قائم و افقی با استفاده از المان تیر-ستون غیرخطی مدلسازی می شوند. سطح مقطع اعضا با استفاده از المان Fiber تعریف می شود. برای تعریف رفتار فولاد از ماده Steel02 به همراه Fatigue

جدول (۲) مشخصات آماری متغیرهای تصادفی تعریف شده در مساله

مرجع	پارامترها	تابع توزیع احتمال	توضیح	متغیر تصادفی	
[25]	$\beta = \frac{1.0}{-0.0033T + 0.2417}$	$\alpha = 0.126T - 2.158$	Log-Logistic	خوردگی (میلیمتر)	C
[28]	$COV = 0.10$	$\mu = 275$	Log-Normal	تنش تسلیم (N/mm ²)	$F_y(\text{Jacket } 1)$
[28]	$COV = 0.10$	$\mu = 355$	Log-Normal	تنش تسلیم (N/mm ²)	$F_y(\text{Jacket } 2\&3)$
[29]	$COV = 0.20$	$\mu = 1.05$	Log-Normal	ضریب درگ	C_d
[29]	$COV = 0.20$	$\mu = 1.20$	Log-Normal	ضریب اینرسی	C_m
[29]	$COV = 0.30$	$\mu = 0.050$	Log-Normal	روئیدنی های دریایی (متر)	MG
[29]	Scale Parameter $\sigma = 1.18$	Location Parameter $\mu = 6.70$	Gumbel	ارتفاع موج (متر)	H
[30]	Shape Parameter $b = 3.7$	Scale Parameter $a = 1.1$	Weibull	سرعت جریان سطحی (m/s)	U_0
[28]	$COV = 0.10$	$\mu = 200.0$	Log-Normal	وزن عرشه (Ton)	$TW(\text{Jacket } 1)$
[28]	$COV = 0.10$	$\mu = 250.0$	Log-Normal	وزن عرشه (Ton)	$TW(\text{Jacket } 2)$
[28]	$COV = 0.10$	$\mu = 3000.0$	Log-Normal	وزن عرشه (Ton)	$TW(\text{Jacket } 3)$

اعمال می‌گردد. برای در نظرگیری اثرات نیروی موج بر روی اعضا غیرسازه‌ای که مدلسازی نشده‌اند، از جمله پهلوگیرها، لوله‌های هادی، رایزرها و آندها، نیروی محیطی در تمامی حالات تحلیل ۱۰٪ افزایش یافته است. برای اطمینان از دقت محاسبه برنامه توسعه داده شده، مجموع نیروی موج بدست آمده از این برنامه با نتایج حاصل شده برای نیروی موج که با استفاده از نرم افزار SACS بدست آمده است صحت سنجی شده است. در شکل (۵) مقایسه نتایج بدست آمده برای تخمین نیروی موج مشاهده می‌گردد.

برنامه اصلی برای سال‌های مختلف عمر سکو از سال ۲۵ تا ۴۵ عمر سکوها اجرا می‌شود. همچنین جهت مقایسه بهتر، این برنامه برای حالت بدون خوردگی نیز اجرا گردیده است. تغییرات مقدار احتمال شکست سالانه $P_f annual$ و مقادیر نقطه طراحی برای تمامی متغیرهای تصادفی برای هر ۳ سکو در طول سالهای مختلف به ترتیب در شکل (۶) و جدول (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۵) صحت سنجی برنامه توسعه داده شده برای تخمین نیروی موج.

اگرچه برنامه توسعه داده شده قادر است که این نیرو را محاسبه نماید، اما بر اساس اهداف در نظر گرفته شده در این مطالعه، از این نیرو در این مثال صرفه نظر شده است. نیروی کلی با استفاده از جمع برداری تمامی نیروهای وارده بر اعضا محاسبه می‌شود و در حالت بیشینه برش پایه در تراز بستر، بر روی تمامی گره‌های جکت در مدل OpenSees

جدول (۳) خلاصه نتایج بدست آمده در تحلیل قابلیت اعتماد.

جکت شماره ۱									
مقادیر نقطه طراحی برای متغیرهای تصادفی موجود در مساله								احتمال شکست سالانه	عمر سکو (سال)
TW (Ton)	Fy (N/m ²)	C (mm)	H (m)	U0 (m/s)	MG (cm)	Cm	Cd		
199.57	2.57E+08	0.000	17.516	1.278	5.095	1.177	1.428	3.58E-06	0
199.54	2.57E+08	1.025	17.114	1.276	5.088	1.177	1.417	5.93E-06	25
199.52	2.57E+08	1.295	16.996	1.276	5.085	1.177	1.414	6.83E-06	27
199.46	2.58E+08	1.718	16.912	1.262	5.068	1.177	1.390	9.35E-06	30
199.45	2.58E+08	2.422	16.615	1.262	5.064	1.177	1.384	1.30E-05	35
199.44	2.58E+08	3.060	16.311	1.262	5.060	1.177	1.379	1.87E-05	40
199.42	2.59E+08	3.789	15.999	1.262	5.055	1.177	1.372	2.65E-05	45
جکت شماره ۲									
مقادیر نقطه طراحی برای متغیرهای تصادفی موجود در مساله								احتمال شکست سالانه	عمر سکو (سال)
TW (Ton)	Fy (N/m ²)	C (mm)	H (m)	U0 (m/s)	MG (cm)	Cm	Cd		
249.26	3.29E+08	0.000	18.478	1.310	5.065	1.177	1.455	8.93E-07	0
249.23	3.29E+08	1.035	17.940	1.310	5.058	1.177	1.443	1.71E-06	25
249.23	3.32E+08	1.318	17.830	1.310	5.057	1.177	1.441	2.04E-06	27
249.22	3.32E+08	1.735	17.598	1.310	5.054	1.177	1.436	2.69E-06	30
249.22	3.33E+08	2.432	17.225	1.310	5.049	1.177	1.427	4.28E-06	35
249.21	3.33E+08	3.093	16.813	1.309	5.043	1.177	1.417	6.90E-06	40
249.19	3.33E+08	3.761	16.414	1.308	5.037	1.177	1.407	1.13E-05	45
جکت شماره ۳									
مقادیر نقطه طراحی برای متغیرهای تصادفی موجود در مساله								احتمال شکست سالانه	عمر سکو (سال)
TW (Ton)	Fy (N/m ²)	C (mm)	H (m)	U0 (m/s)	MG (cm)	Cm	Cd		
3034.28	3.26E+08	0.0000	21.34	1.2786	5.0118	1.177	1.463	3.49E-08	0
3033.48	3.26E+08	1.0134	21.00	1.2793	5.0099	1.177	1.459	5.18E-08	25
3032.76	3.26E+08	1.2741	20.96	1.2795	5.0091	1.177	1.457	5.43E-08	27
3032.49	3.26E+08	1.6689	20.86	1.2798	5.0084	1.177	1.456	6.18E-08	30
3032.16	3.26E+08	2.3302	20.65	1.2804	5.0069	1.177	1.452	7.88E-08	35
3031.18	3.26E+08	2.9799	20.46	1.2808	5.0054	1.177	1.449	9.91E-08	40
3030.14	3.26E+08	3.6071	20.28	1.2810	5.0038	1.177	1.446	1.25E-07	45

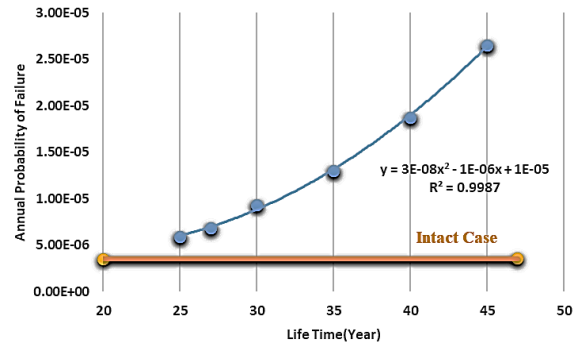
احتمال شکست سالانه بدست آمده در زمان مورد نظر ۷٪ کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که عدم در نظرگیری خوردگی به‌عنوان یکی از عوامل عدم قطعیت در تحلیل‌های احتمالاتی می‌تواند منجر به حصول پاسخ‌های غیرواقعی گردد.

۵- نتیجه گیری

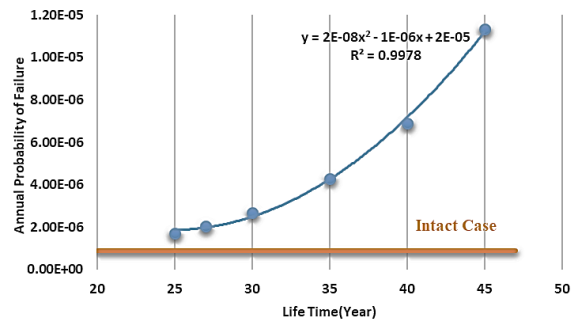
در این مطالعه با توجه به اهمیت تحلیل قابلیت اعتماد در ارزیابی احتمالاتی وضعیت سکوها موجود، یک برنامه کامپیوتری ارائه شده است. در حال حاضر نرم افزارهای معدودی که در این حوزه وجود دارند، غالباً تجاری بوده و امکان دسترسی به آنها وجود ندارد. همچنین در بسیاری از موارد امکان کوپل نمودن نرم افزارهای تحلیل سازه‌ای فراساحل از قبیل SACS با برنامه‌ها و کدهای توسعه داده شده برای تحلیل‌های احتمالاتی وجود ندارد. لذا در این مقاله تلاش گردید ضمن ارائه روابط نظری استفاده شده، چارچوب جدیدی برای تحلیل قابلیت اعتماد متغیر در زمان پیشنهاد گردد و بر مبنای آن چارچوب، برنامه کامپیوتری ارائه گردد. برای نشان دادن قابلیت‌های این برنامه، تحلیل قابلیت اعتماد بر روی سه سکوی فراساحل انجام پذیرفت و نتایج آن ارائه گردید.

برای انجام تحلیل قابلیت اعتماد بر روی سکوها ثابت دریایی، روش FORM بکار گرفته شده است. در رویکرد تحلیل قابلیت اعتماد به کار گرفته شده در این مطالعه، برخلاف بسیاری از مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر که از یک تابع بار و یا روابط تقریبی و تجربی برای دریافت پاسخ مورد نیاز استفاده می‌گردد، نیروهای محیطی یا پاسخ سازه در هر گام از تحلیل قابلیت اعتماد مستقیماً محاسبه می‌شود. این رویکرد این امکان را فراهم می‌نماید که تمامی پارامترهای موجود در مساله بتواند به‌عنوان متغیر دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شود. همچنین دقت محاسبات به میزان قابل توجهی افزایش یافته و زمان تحلیل نیز کاهش می‌یابد.

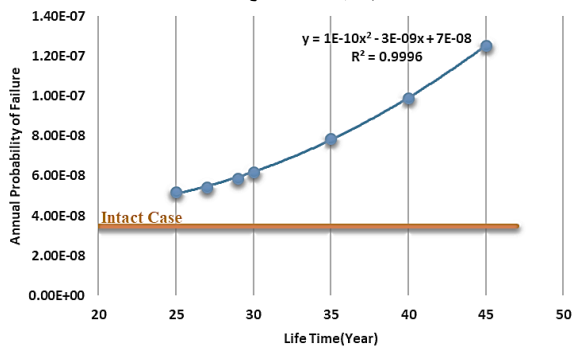
این چارچوب برای تحلیل احتمالاتی ۳ سکوی فراساحلی موجود مورد استفاده قرار گرفت و احتمال شکست سالانه در سال‌های مختلف در طول عمر بهره‌برداری از سکو محاسبه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد سکوها نشان می‌دهد که با توجه به کاهش



الف: جکت شماره ۱



ب: جکت شماره ۲



ج: جکت شماره ۳

شکل (۶) تغییرات احتمال شکست سالانه در طول زمان.

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، احتمال شکست سالانه برای مدل‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در مقیاس 10^{-6} ، 10^{-7} و 10^{-8} می‌باشد. به علاوه پس از سپری شدن عمر طراحی این سکوها (در اینجا ۲۵ سال) و در طول زمان ۲۵ الی ۴۵ سال، مقدار احتمال شکست سالانه برای جکت‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب 4.46، 6.60 و 2.41 برابر می‌گردد. برای حصول درک بهتر از میزان اهمیت عدم قطعیت در نظر گرفته شده برای خوردگی، میزان خوردگی برای یک سال مشخص از عمر سکو (برای مثال ۴۰ سال) به صورت تعیینی در نظر گرفته می‌شود. مقدار خوردگی در این حالت برابر میانگین بدست آمده از مدل احتمالاتی در نظر گرفته می‌شود و بر اساس آن تحلیل قابلیت اعتماد انجام می‌گیرد. در این حالت

- [9] Puskar, F. J., Spong, R. E., Ku, A., Gilbert, R. B., and Choi, Y. J. "Assessment of Fixed Offshore Platform Performance in Hurricane Ivan", Offshore Technology Conference, 2006.
- [10] Zhang, M. Q., Beer, M., Quek, S. T., and Choo, Y. S. "Comparison of Uncertainty Models in Reliability Analysis of Offshore Structures under Marine Corrosion", *Struct. Saf.*, Vol.32, No.6, pp.425-432, 2010.
- [11] Golafshani, A. A., Ebrahimian, H., Bagheri, V., and Holmas, T. "Assessment of Offshore Platforms under Extreme Waves by Probabilistic Incremental Wave Analysis", *J. Constr. Steel Res.*, 67(5), pp. 759-769, 2011.
- [12] Gholizad, A., Golafshani, A. A., and Akrami, V. "Structural Reliability of Offshore Platforms Considering Fatigue Damage and Different Failure Scenarios", *Ocean Eng.*, 46, pp. 1-8, 2012.
- [13] Dong, W., Moan, T., and Gao, Z. "Fatigue Reliability Analysis of the Jacket Support Structure for Offshore Wind Turbine Considering the Effect of Corrosion and Inspection", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 106, pp. 11-27, 2012.
- [14] Diznab, M. A. D., Mohajernassab, S., Seif, M. S., Tabeshpour, M. R., and Mehdigholi, H. "Assessment of Offshore Structures under Extreme Wave Conditions by Modified Endurance Wave Analysis", *Mar. Struct.*, 39, pp. 50-69, 2014.
- [15] Nava-Viveros, I., and Heredia-Zavoni, E. "Assessment of Statistical Parameter Uncertainty in the Reliability Analysis of Jacket Platforms", *Ocean Eng.*, 2018.
- [16] Clark, C. E., and DuPont, B. "Reliability-Based Design Optimization in Offshore Renewable Energy Systems", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol.97, pp.390-400, 2018.
- [17] Guédé, F. "Risk-Based Structural Integrity Management for Offshore Jacket Platforms", *Mar. Struct.*, Vol.63, pp.444-461, 2019.
- [18] Horn, J.T., and Leira, B. J., "Fatigue Reliability Assessment of Offshore Wind Turbines with Stochastic Availability", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, p. 106550, 2019.
- [19] Horn, J.T., Krokstad, J.R., and Leira, B.J. "Impact of Model Uncertainties on the Fatigue Reliability of Offshore Wind Turbines", *Mar. Struct.*, Vol.64, pp.174-185, 2019.
- [20] Haukaas, T. "Finite Element Reliability and Sensitivity Methods for Performance-Based Engineering", University of California, Berkeley, 2003.
- [21] Ang, A. H.S., and Tang, W.H. "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", 1984.
- [22] Thoft-Cristensen, P., and Baker, M.J. "Structural Reliability Theory and Its Applications", Springer Science & Business Media, 2012.
- [23] Madsen, H.O., Krenk, S., and Lind, N.C. "Methods of Structural Safety", Courier
- کارایی سیستم حفاظت از خوردگی پس از پایان عمر طراحی سکوها که در اینجا ۲۵ سال در نظر گرفته شده است، مقدار احتمال شکست به فرم یک تابع درجه ۲ افزایش می‌یابد. همچنین سکوهایی که با استانداردهای گذشته طراحی شده‌اند، شاخص قابلیت‌اعتماد پایین‌تری نسبت به سکوهای طراحی شده در سال‌های اخیر دارند. یک دلیل آن اتخاذ رویکردهای محافظه کارانه‌تر در استانداردها در طول سال‌های اخیر می‌باشد.
- برای تعیین اهمیت بکارگیری خوردگی به‌عنوان متغیر دارای عدم قطعیت، یک تحلیل جداگانه انجام شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد، هنگامی که اثر خوردگی به‌عنوان متغیر دارای عدم قطعیت نادیده گرفته می‌شود، مقدار احتمال شکست سالانه، ۷٪ پایین‌تر نسبت به حالت واقعی تخمین زده می‌شود. در نهایت بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل احتمالاتی ملاحظه می‌گردد که مقدار شاخص قابلیت اطمینان در این نوع از سکوهای فراساحل، به میزان قابل توجهی تحت تاثیر عدم قطعیت‌های ناشی از نیروی امواج قرار دارند.

۶- مراجع

- [1] Mortazavi, M. "A Probabilistic Screening Methodology for Use in Assessment and Requalification of Steel, Template-Type Offshore Platforms", 1997.
- [2] Mortazavi, M., and Bea, R.G. "Screening Methodologies for Use in Platform Assessments and Requalifications", Rep. Final para la Jt. Ind. Spons. Proj. Mar. Technol. Manag. Group, Dept. Civ. Eng. Univ. California, Berkely, Junio, 1995.
- [3] Bea, R. G., and Mortazavi, M. M. "ULSLEA: A Limit Equilibrium Procedure to Determine the Ultimate Limit State Loading Capacities of Template-Type Platforms", *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, Vol.118, No.4, pp.267-275, 1996.
- [4] Manuel, L., Schmucker, D. G., Cornell, C. A., and Carballo, J.E. "A Reliability-Based Design Format for Jacket Platforms under Wave Loads", *Mar. Struct.*, Vol.11, No.10, pp.413-428, 1998.
- [5] Benjamin, J.R., and Cornell, C.A. "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers", Courier Corporation, 2014.
- [6] Allin, C. "Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment", *PEER Newsl*, 2000.
- [7] Ersdal, G. "Assessment of Existing Offshore Structures for Life Extension", *Dep. Mech. Struct. Eng. Mater. Sci. Univ. Stavanger, Norw*, 2005.
- [8] Ergo Engineering, I. "Reliability vs. Consequence of Failure for API RP2A Platforms Using RP2MET" , 2009.

- Corporation, 2006.
- [24] Melchers, R. E., and Beck, A. T. "Structural Reliability Analysis and Prediction", John Wiley & Sons, 2018.
- [25] Gholami, H., Asgarian, B., and Gharebaghi, S. A. "Time-Variant Ultimate Reliability Analysis of Jacket Platforms Considering a New Probabilistic Corrosion Model for the Persian Gulf", J. Offshore Mech. Arct. Eng, 2018.
- [26] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., and Fenves, G. L. "The Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES) User Command-Language Manual" , 2006.
- [27] Chakrabarti, S. K., "Hydrodynamics of Offshore Structures", WIT press, 1987.
- [28] Code, J.P.M., "Joint Committee on Structural Safety", URL www.jcss.ethz.ch , 2001.
- [29] South Pars Project Document, "Structural Design Basis & Design Brief", Tehran,Iran, 2009.
- [30] Yau, M.W.J., "Localization of Surface or Near-Surface Drifting Mines for Unmanned Systems in the Persian Gulf" , 2012.