

## ارزیابی حساسیت مقاومت استاتیکی اتصالات لوله‌ای K سکوه‌ای فراساحلی جکتی نسبت به عوامل تصادفی مؤثر بر مبنای تحلیل قابلیت اعتماد

حمید احمدی<sup>۱</sup>، مهدی بایرامی<sup>۲</sup>، محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین<sup>۳</sup>

h-ahmadi@tabrizu.ac.ir

۱- استادیار دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

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

۳- استاد دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

### چکیده

هدف این پژوهش، تحلیل حساسیت و تعیین مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در طراحی اتصالات لوله‌ای تک‌صفحه‌ای K، بر اساس تحلیل قابلیت اعتماد است. در این مطالعه، تمامی پارامترهای تأثیرگذار روی مقاومت استاتیکی اتصال و همچنین نیروهای داخلی به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و میزان تأثیر عدم قطعیت‌های مختلف روی احتمال شکست اتصال K بر اساس معیار گسیختگی تسلیم بررسی شده است. تابع احتمال حاکم بر نیروهای داخلی شامل کشش و فشار محوری و لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه نیز برای یک سکوی جکتی تپ در شرایط دریایی خلیج فارس استخراج گردیده است. در تحقیق حاضر، اثرات همبستگی بین متغیرهای تصادفی مختلف نیز مورد مطالعه قرار گرفته و ضرایب همبستگی بین توابع حالت حدی تعیین شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای طراحی اتصالات لوله‌ای سکوه‌ای منطقه خلیج فارس مفید واقع شود.

واژگان کلیدی: سکوی فراساحلی جکتی، اتصال لوله‌ای K، مقاومت استاتیکی، تحلیل حساسیت، تحلیل قابلیت اعتماد.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۶/۲۹

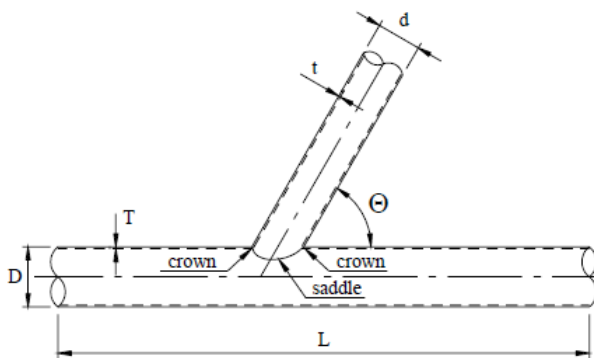
۱- مقدمه

معرض بارهای تصادفی ناشی از امواج و باد قرار داشته و تخمین مؤلفه‌های مؤثر در مقاومت آن‌ها نیز از عدم دانش کافی و خطای انسانی متأثر می‌شود، وجود عدم قطعیت در طراحی این اتصالات مشهود است.

کنترل ضوابط طراحی و الزامات آیین‌نامه‌ای فقط بخشی از ارزیابی کامل ایمنی است. اتخاذ رویکردی برای کاهش عدم قطعیت‌ها در روند طراحی، ضمن حفظ ایمنی طرح، می‌تواند منجر به بهینه شدن آن شود.

تحقیقات قابل توجهی در زمینه ارزیابی قابلیت اعتماد سکوه‌های فراساحلی انجام شده است. تحلیل قابلیت اعتماد در سازه‌های فراساحلی ابتدا برای بررسی پدیده خستگی مطرح شد [۲]. علت این است که تدوین یک برنامه منظم برای تعمیر و بازرسی هدفمند این سکوها ضروری است. چرا که گسیختگی چنین سازه‌هایی عمدتاً به دلیل رشد ترک ناشی از خستگی در اتصالات لوله‌ای است [۳].

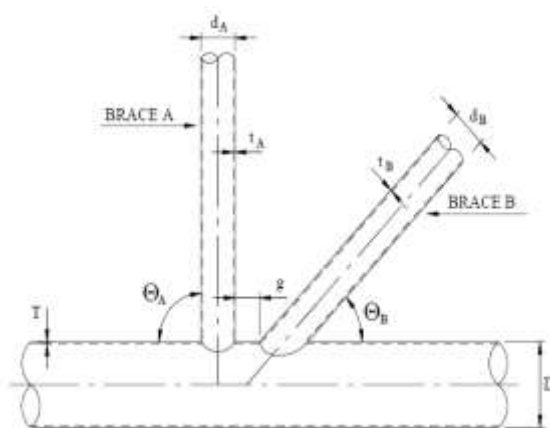
یک سکوی فراساحلی شابلونی (جکتی) یک قاب فضاکار فولادی است که از جوش دادن اعضای لوله‌ای توخالی (CHS)<sup>۱</sup> ساخته می‌شود (شکل (۱-الف)). محل اتصال این اعضا، که در آن انتهای یک یا چند عضو مهاري<sup>۲</sup> به سطح عضو اصلی<sup>۳</sup> جوش می‌شوند، یک اتصال لوله‌ای<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. در مباحث مربوط به مقاومت استاتیکی، اتصالات لوله‌ای به سه دسته اصلی T/Y، K، و X تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل (۱-ب تا ت)). البته باید توجه داشت که این دسته‌بندی نه صرفاً بر مبنای شکل هندسی اتصال بلکه باید بر اساس وضعیت نیروهای محوری وارد بر اتصال انجام شود. برای آشنایی با جزئیات روش دسته‌بندی اتصالات می‌توان به ویرایش ۲۱ آئین‌نامه API-RP2A (WSD) [۱] مراجعه نمود. طراحی نامناسب اتصالات لوله‌ای می‌تواند منجر به خساراتی جبران‌ناپذیر شود. با توجه به این که اتصالات لوله‌ای در



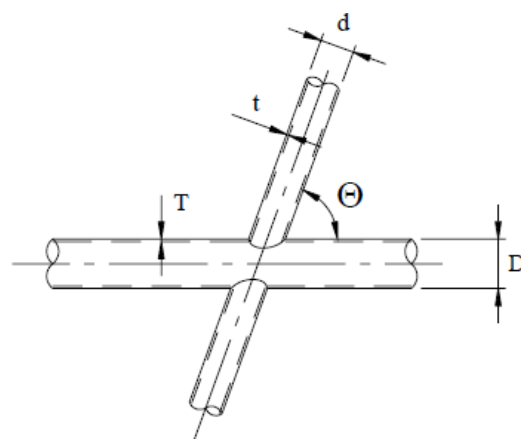
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل (۱) - (الف) سکوه‌های جکتی میدان سلمان خلیج فارس، اتصال لوله‌ای نوع (ب T/Y، پ X و ت)

<sup>3</sup> Chord

<sup>4</sup> Tubular joint

<sup>1</sup> Circular Hollow Section

<sup>2</sup> Brace

تکنیک‌های پاسخ سطحی و روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو کاهش داد. جزئیات بررسی قابلیت اعتماد با استفاده از روش اجزای محدود و تکنیک‌های کاهش هزینه محاسباتی در مراجعی نظیر Waarts و Vrouwenvelder [۱۱] آمده است. توسعه نرم‌افزاری در زمینه ارزیابی قابلیت اعتماد و تحلیل حساسیت نیز اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته است. Rt یک برنامه کامپیوتری برای تحلیل قابلیت اطمینان و تجزیه و تحلیل بهینه‌سازی با مدل‌های احتمالاتی مختلف است. این نرم‌افزار شامل بخش‌های مختلفی مانند تعریف متغیرهای تصادفی با توزیع‌های احتمالاتی مختلف، مدل‌های احتمالاتی، تعریف توابع عملکردی و روش‌های مختلف تحلیل قابلیت اطمینان است. نرم‌افزار قابلیت اطمینان Rt قابلیت کدنویسی عمومی داشته و در صورتی که مدل‌های مدنظر در این برنامه وجود نداشته باشد، می‌توان با کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی جاوا، تحلیل قابلیت اطمینان مدل‌های مدنظر را انجام داد. این نرم‌افزار در سال ۲۰۱۲ توسط Mahsuli و Haukaas در دانشگاه British Columbia ارائه شده است [۱۲].

Lee و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴، یک روش طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد برای قطعات انتقالی تک پایه توربین‌های بادی فراساحلی ارائه نمودند.

Kim و Lee [۱۴] در سال ۲۰۱۵، یک تحلیل قابلیت اعتماد روی سازه پشتیبان توربین‌های بادی فراساحلی تحت اثر بارهای محیطی حدی انجام دادند. Yang و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۵، طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد دینامیکی را برای زیرسازه سه پایه توربین‌های بادی فراساحلی مورد بررسی قرار دادند.

Zhang و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۶، یک تحلیل قابلیت اعتماد روی توربین‌های بادی شناور بر مبنای System Grading و FTA دینامیکی انجام دادند. Wei و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶، اثرات جهتی را روی قابلیت اعتماد سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی فراساحلی تحت اثر بارگذاری حدی موج و باد مورد مطالعه قرار دادند. Lee و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۶ یک روش طراحی مبتنی بر هزینه Life-Cycle برای تعیین بارهای محیطی بهینه و قابلیت اعتماد هدف در تأسیسات فراساحلی ارائه نمودند.

از جمله تحقیقات اخیر در زمینه تعیین مقاومت استاتیکی انواع اتصالات لوله‌ای ساده و تقویت شده می‌توان به کارهای

در کنار بررسی قابلیت اعتماد برای پدیده خستگی، تحلیل قابلیت اعتماد برای تعیین ظرفیت نهایی عضو نیز مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا با توجه به پیچیدگی‌های موجود، محاسبات قابلیت اعتماد با ساده‌سازی‌های زیادی همراه بود [۴].

به مرور زمان با پیشرفت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، سعی شد تا با کاهش هرچه بیشتر ساده‌سازی‌ها، تأثیر تصادفی بودن عوامل بارگذاری مانند ارتفاع و پرپود موج، سرعت باد، و سرعت جریان و همچنین پارامترهای مقاومت مانند تنش تسلیم و مقاومت خاک به طور واقع‌بینانه‌تری در محاسبات قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی اعضا بررسی شود. سپس بررسی‌ها به یک سیستم سازه‌ای با در نظر گرفتن تعداد زیادی مود خرابی، به جای سازه‌ای با یک مود خرابی حاکم، تعمیم پیدا کرد [۵].

تحقیقات مربوط به سطوح ایمنی و کالیبره کردن ضرایب مقاومت و بار بر مبنای روش‌های قابلیت اعتماد در مباحث بهینه‌سازی اقتصادی سازه‌ها در صنایع فراساحلی نیز کاربرد دارند. نتایج تحقیقات انجام شده روی فرمول‌بندی روش ضرایب بار و مقاومت جزئی بر اساس تحلیل قابلیت اعتماد، ضعف موجود در آیین‌نامه‌های مبتنی بر روش تنش مجاز را در زمینه ارائه یک طرح بهینه با حفظ سطح ایمنی مناسب آشکار نموده است [۶].

نحوه بکارگیری مدل‌های اجزای محدود تصادفی در بررسی قابلیت اعتماد سازه توسط Sørensen و Engelund [۷] در سال ۱۹۹۵ و Ke و Kiureghian [۸] در سال ۱۹۹۸ تشریح شده است.

چهارچوب طراحی سکوه‌های ثابت جکته تحت بارگذاری موج بر اساس قابلیت اعتماد توسط Manuel و همکاران [۹] در سال ۱۹۹۸ ارائه گردیده است. در سال ۲۰۱۰، از تحلیل قابلیت اعتماد توسط Halil و Vrouwenvelder [۱۰] برای بهینه‌سازی سکوه‌های فراساحلی ثابت استفاده شده است. در این بررسی اثرات هم‌زمانی بارهای وارده در نظر گرفته شده و بر اساس یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی با کمینه کردن وزن سازه، سطح ایمنی متناظر با استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه اول تخمین زده شده است.

ترکیب روش‌های قابلیت اعتماد رایج با تحلیل سازه‌ای غیر خطی، گرچه سبب افزایش هزینه محاسباتی می‌شود، اما دقت قابل قبولی دارد و هزینه محاسباتی را نیز می‌توان با

$$P_a = Q_f Q_u \frac{F_{yc} T^2}{FS \sin \theta} \quad (2)$$

$$M_a = Q_f Q_u \frac{d F_{yc} T^2}{FS \sin \theta} \quad (3)$$

در روابط فوق،  $P_a$  ظرفیت مجاز برای بار محوری عضو مهاری و  $M_a$  ظرفیت مجاز برای لنگر خمشی عضو مهاری است.  $Q_u$  ضریب مقاومت<sup>۳</sup> است که به هندسه و نوع بارگذاری اتصال بستگی داشته و بر اساس جدول (۴-۳-۱) و پیرایش ۲۱ آیین‌نامه API-RP2A [۱] تعیین می‌شود.  $Q_f$  ضریب بار عضو اصلی<sup>۴</sup> بوده و بر مبنای روابط بخش (۴-۳-۴) آیین‌نامه محاسبه می‌گردد.  $F_{yc}$  کمترین مقدار بین تنش تسلیم و  $0.8$  برابر مقاومت کششی عضو اصلی است.  $FS$  ضریب اطمینان است که مطابق توصیه آیین‌نامه در شرایط سرویس‌دهی برابر  $1/6$  در نظر گرفته می‌شود. برای اتصالاتی که در آن ضخامت عضو اصلی در طول اتصال ثابت نیست، مقدار  $P_a$  باید طبق ضوابط بخش (۴-۳-۵) و پیرایش ۲۱ آیین‌نامه API-RP2A [۱] اصلاح شود. در این پژوهش فرض شده در تمامی اتصالات ضخامت عضو اصلی ثابت است. در ارزیابی مقاومت استاتیکی اتصالات لوله‌ای، نیروهای داخلی بدین صورت تقسیم‌بندی می‌شوند: نیروی محوری فشاری، نیروی محوری کششی، لنگر خمشی داخل صفحه<sup>۵</sup>، و لنگر خمشی خارج از صفحه<sup>۶</sup>.

جهت ارزیابی مقاومت استاتیکی اتصال برای ترکیب بارگذاری محوری و خمشی باید رابطه زیر کنترل شود:

$$IR = \left| \frac{P}{P_a} \right| + \left( \frac{M}{M_a} \right)_{IPB}^2 + \left| \frac{M}{M_a} \right|_{OPB} \leq 1 \quad (4)$$

$P$  بار محوری فشاری یا کششی در عضو مهاری اتصال،  $M_{IPB}$  لنگر خمشی داخل صفحه در عضو مهاری و  $M_{OPB}$  لنگر خمشی خارج از صفحه در این عضو است.

محدوده اعتبار ضوابط طراحی مذکور به شکل زیر است:

$$\begin{aligned} 0.4 &\leq \tau \leq 1.0 \\ 10 &\leq \gamma \leq 50 \\ 0.2 &\leq \beta \leq 1.0 \\ 30^\circ &\leq \theta \leq 90^\circ \\ F_y &\leq 500 \text{ MPa} \\ \zeta &> -0.6 \end{aligned} \quad (5)$$

که  $\theta$  زاویه بین عضو اصلی و عضو مهاری است (شکل (۱)).

### ۳- تحلیل قابلیت اعتماد

تحلیل و طراحی سازه‌ها مبتنی بر تئوری قابلیت اعتماد،

Nassiraei و همکاران [۱۹-۲۳] اشاره کرد.

در این مقاله، هدف تحلیل حساسیت و تعیین مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در طراحی اتصالات لوله‌ای تک‌صفحه‌ای  $K$ ، بر اساس تحلیل قابلیت اعتماد است. در این مطالعه، تمامی پارامترهای تأثیرگذار روی مقاومت استاتیکی اتصال و همچنین نیروهای داخلی به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و میزان تأثیر عدم قطعیت‌های مختلف روی احتمال شکست اتصال  $K$  بر اساس معیار گسیختگی تسلیم بررسی شده است. تابع احتمال حاکم بر نیروهای داخلی شامل کشش و فشار محوری و لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه، نیز برای یک سکوی جکتی (تیپ) در شرایط دریایی خلیج فارس استخراج گردیده است. در تحقیق حاضر، اثرات همبستگی بین متغیرهای تصادفی مختلف نیز مورد مطالعه قرار گرفته و ضرایب همبستگی بین توابع حالت حدی تعیین شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای طراحی اتصالات لوله‌ای سکوی خلیج فارس مفید واقع شود.

### ۲- ارزیابی مقاومت استاتیکی اتصالات لوله‌ای

پارامترهای هندسی بی‌بعد، که در تحلیل و طراحی اتصالات لوله‌ای کاربرد زیادی دارند، به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \tau &= t/T \\ \gamma &= D/2T \\ \beta &= d/D \\ \alpha &= 2L/D \\ \zeta &= g/D \end{aligned} \quad (1)$$

که  $D$ ،  $T$ ،  $L$ ،  $d$  و  $t$  به ترتیب قطر، ضخامت، و طول عضو اصلی بوده و  $d$ ،  $t$  و  $l$  به ترتیب قطر، ضخامت، و طول عضو مهاری هستند.  $g$  نیز فاصله آزاد بین اعضای مهاری است (شکل (۱)).

یک اتصال لوله‌ای شامل یک عضو اصلی و یک یا چند عضو مهاری است که این اعضا ممکن است در یک یا چند صفحه قرار گیرند. اتصال ساده به اتصالی اطلاق می‌شود که اعضای مهاری فاقد روی‌هم‌رفتگی<sup>۱</sup> بوده و اتصال شامل ورق‌های تقویتی و سخت‌کننده نباشد. و پیرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آیین‌نامه API-RP2A [۱] روابط زیر را برای تعیین ظرفیت استاتیکی اتصالات ساده ارائه داده است. تحت شرایط محیطی طراحی<sup>۲</sup>، این مقادیر می‌توانند ۳۳٪ افزایش داشته باشند:

<sup>4</sup> Chord Load Factor

<sup>5</sup> In-plane Bending (IPB)

<sup>6</sup> Out-of-Plane Bending (OPB)

<sup>1</sup> Overlap

<sup>2</sup> Design Environmental Conditions

<sup>3</sup> Strength Factor

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، و بارهای وارده می‌توانند متغیرهای مسئله باشند. 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. با توجه به رابطه (۶)، 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:

$$P_f = \Pr[g(X, Y) < 0] \quad (7)$$

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

$$P_f = \Pr[g(X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_m) < 0] = \int_{-\infty}^0 f_g(g) dg = \int \int_{g(X, Y) < 0} f_{R, S}(r, s) dr ds \quad (8)$$

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 فوق، بسته به تعداد متغیرهای تصادفی، تابع چگالی احتمال آن‌ها، و شکل تابع حدی، می‌تواند بسیار مشکل و وقت‌گیر باشد. لذا روش‌های مختلفی ارائه شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان حل انتگرال متناظر با احتمال گسیختگی را ساده‌سازی و تسهیل نمود.

معیار سنجش قابلیت اعتماد، محاسبه احتمال عدم گسیختگی است. ولی همان‌طور که گفته شد، محاسبه دقیق این احتمال، در بسیاری از اوقات وقت‌گیر و پیچیده است. از این رو، با پذیرش چند فرض ساده کننده، به جای محاسبه دقیق احتمال گسیختگی، از پارامتر شاخص قابلیت اعتماد استفاده می‌شود تا حجم محاسبات کاهش پیدا کند. اگر تابع حالت حدی به شکل  $g = R - S$  تعریف شود، شاخص قابلیت اعتماد بدین گونه بیان می‌گردد:

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

موضوعی است که اخیراً به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است. علت این توجه، طبیعت تصادفی پارامترهای سازه‌ای و محیطی می‌باشد. به کمک تئوری قابلیت اعتماد سیستم‌های سازه‌ای، می‌توان عدم قطعیت‌های ناشی از ماهیت تصادفی این پارامترها را به صورت روابط ریاضی در آورده و ملاحظات ایمنی و عملکردی را به طور کمی وارد روند طراحی نمود. تئوری قابلیت اعتماد در حقیقت راهکاری نوین برای بیان میزان ایمنی یک سازه در برابر عوامل تهدید کننده است. در این روش، برخلاف روش‌های معمول تحلیل و طراحی سازه ها، 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.

منظور از میزان قابلیت اعتماد یک سازه یا عضو، میزان احتمالی است که سازه یا عضو، عملکرد مورد انتظار خود را در طول یک بازه زمانی معلوم (نظیر عمر مفید سازه) و تحت شرایط سرویس‌دهی مشخص، به اجرا برساند. در واقع تئوری قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی (شکست)<sup>۲</sup> سازه را، با تعیین این که آیا توابع حالت حدی<sup>۳</sup> از مقدار مجاز فراتر رفته‌اند یا خیر، ارزیابی می‌کند.

مفهوم حالت حدی برای هر مود گسیختگی را می‌توان از طریق تابع حالت حدی تعریف کرد. 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 با  $R$  نشان داده شده است. در این صورت رابطه زیر به عنوان تابع حالت حدی سیستم مورد نظر تعریف می‌شود:

$$g(X, Y) = R(X) - S(Y) \quad (6)$$

توجه شود که مقاومت و بار وارده مثال‌هایی برای یک مفهوم کلی‌تر هستند. مثلاً  $R$  می‌تواند تنش مجاز و  $S$  تنش موجود باشد؛ یا این که  $R$  تغییر شکل مجاز و  $S$  تغییر شکل موجود باشد؛ و یا مثلاً  $R$  حداکثر لنگر خمشی قابل تحمل توسط عضو بوده و  $S$  لنگر خمشی موجود در عضو باشد. در هر صورت،  $R$  و  $S$  توابعی از متغیرهای تصادفی مختلف  $X$  و  $Y$  هستند. در واقع  $X$  و  $Y$  می‌توانند به صورت برداری از

<sup>3</sup> Limit-State Functions

<sup>4</sup> Failure Surface

<sup>1</sup> Probability Density Function

<sup>2</sup> Failure Probability

متداول ترین روش های تحلیل قابلیت اعتماد را می توان به این شکل خلاصه نمود:

۱- روش های قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM):

۱-۱- روش گشتاور دوم مرتبه اول مقدار میانگین (MVFOSM)<sup>۶</sup>

۱-۲- روش هاسوفر لیند (HL)<sup>۷</sup>

۱-۳- روش هاسوفر لیند - رکویتز فیسلر (HL-RF)<sup>۸</sup>

۲- روش های قابلیت اعتماد مرتبه دوم (SORM):

۱-۲- رابطه Breitung

۲-۲- رابطه Tvedt

۳- روش های نمونه برداری:

۱-۳- شبیه سازی مونت کارلو خام یا مستقیم<sup>۹</sup>

۲-۳- نمونه برداری بر مبنای اهمیت (IS)<sup>۱۰</sup>

۳-۳- نمونه برداری LHS<sup>۱۱</sup>

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

#### ۴- فرمول بندی توابع حالت حدی

در این پژوهش، تجاوز نیروهای وارد بر عضو مهاری از ظرفیت مجاز اتصال به عنوان معیار گسیختگی در نظر گرفته شده و تابع حالت حدی بر این اساس فرمول بندی شده است. هر یک از حالت های نیروی محوری کششی و فشاری و همچنین لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه جداگانه در نظر گرفته شده است. با لحاظ کردن این چهار حالت بارگذاری برای اتصال K چهار تابع حالت حدی به شکل زیر تعریف می شود:

$$g_i(z)_P = Q_f Q_u \frac{F_{yc} T^2}{FS \sin \theta} - P \quad (10)$$

$$g_i(z)_{T_f} = Q_f Q_u \frac{F_{yc} T^2}{FS \sin \theta} - T_f \quad (11)$$

$$g_i(z)_{IPB} = Q_f Q_u \frac{dF_{yc} T^2}{FS \sin \theta} - M_{IPB} \quad (12)$$

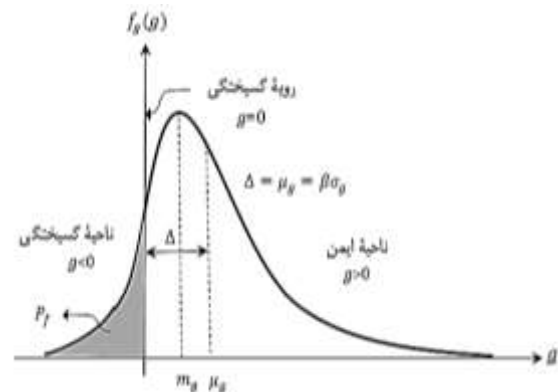
$$g_i(z)_{OPB} = Q_f Q_u \frac{dF_{yc} T^2}{FS \sin \theta} - M_{OPB} \quad (13)$$

در روابط فوق،  $g_i(z)_P$ ،  $g_i(z)_{T_f}$ ،  $g_i(z)_{IPB}$  و  $g_i(z)_{OPB}$  به ترتیب نشان دهنده توابع حالت حدی مربوط به بار محوری فشاری، بار محوری کششی، لنگر خمشی داخل صفحه، و

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

$\beta$  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 ( $P_f$ ) کوچک تر خواهد بود (شکل (۲)).

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)<sup>۲</sup> و مرتبه دوم (SORM)<sup>۳</sup> خواهد شد. راه حل دوم این است که از روش های نمونه برداری<sup>۴</sup> نظیر روش شبیه سازی مونت کارلو (MCS)<sup>۵</sup> استفاده شود.



شکل (۲) تابع چگالی احتمال برای تابع حالت حدی و تعریف ناحیه امن و ناحیه گسیختگی.

<sup>7</sup> Hasofer Lind

<sup>8</sup> Hasofer Lind-Rackwitz Fiessler

<sup>9</sup> Crude or Direct MCS

<sup>10</sup> Importance Sampling

<sup>11</sup> Latin Hypercube Sampling

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

<sup>2</sup> First-Order Reliability Method

<sup>3</sup> Second-order Reliability Method

<sup>4</sup> Sampling Methods

<sup>5</sup> Monte Carlo simulation

<sup>6</sup> Mean-Value First-Order Second-Moment



ترم‌هایی که در توابع حالت حدی وجود دارند، مقدار معین و قطعی نداشته و باید به صورت پارامترهای احتمالاتی در نظر گرفته شوند. یک پارامتر احتمالاتی با یک توزیع احتمال همراه با شاخص‌های آماری بیان می‌شود. برای یک مدل احتمالاتی ساده نظیر یک متغیر تصادفی، مقصود از شاخص آماری، مقدار میانگین و انحراف معیار متغیر تصادفی است. برای لحاظ نمودن عدم قطعیت در تنش تسلیم فولاد، یک توزیع نرمال با پراکندگی  $2/5\%$  در نظر گرفته می‌شود.

برای مشخصات هندسی اتصال از جمله قطر و ضخامت اعضای اصلی و مهار، پراکندگی چندان قابل توجه نبوده و عدم قطعیت ناشی از خطای ساخت و اندازه‌گیری را می‌توان با یک توزیع نرمال و پراکندگی حدود  $2\%$  لحاظ کرد.

مهم‌ترین منبع عدم قطعیت در طراحی سازه‌های فراساحلی مربوط به متغیر بار است. به دلیل عدم شناخت کامل شرایط محیطی تصادفی نظیر امواج و سایر پدیده‌های متنوع دخیل در بارگذاری، عدم دقت کافی در تخمین این متغیر ممکن است سبب طراحی دست بالا و غیر اقتصادی گردد. در واقع به دلیل محافظه‌کاری، عمدتاً مقادیر بار لحاظ شده در طراحی بسیار بزرگ‌تر از مقادیر واقعی موجود هستند.

برای یک وضعیت دریایی تعریف شده به وسیله ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) ثابت، توزیع احتمال رایلی برای  $H_s$  مناسب بوده و پراکندگی ممکن است در شرایط طوفانی از  $7/5\%$  تا  $15\%$  تغییر کند.

توزیع احتمال لاگ‌نرمال برای نیروی داخلی اعضای لوله‌ای در یک اتصال توصیه شده است. برای ضریب مقاومت نهایی اتصال یک پراکندگی  $10\%$  در نظر گرفته می‌شود و عدم قطعیت در مدل‌سازی اتصال نیز با ضریب پراکندگی  $5\%$  تا  $10\%$  لحاظ می‌شود.

در این پژوهش، به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت، یک سکوی جک‌تی نمونه توسط نرم‌افزار SACS مدل‌سازی و تحت شرایط بارگذاری طراحی منطقه خلیج فارس تحلیل شده است (شکل ۳). با انجام تحلیل استاتیکی برجا، نوع اتصالات و نیروهای داخلی آن‌ها تعیین گردیده است. سپس از طریق تحلیل آماری توسط نرم‌افزارهای SPSS و Rt مقادیر شاخص‌های آماری متغیرها، توابع توزیع و همچنین همبستگی آن‌ها تعیین شده است. جهت لحاظ کردن عدم قطعیت‌های تابع حالت حدی، برای هر متغیر تصادفی نظیر  $X_i$  به صورت زیر عمل می‌شود:

لنگر خمشی خارج از صفحه در عضو مهارى اتصال می‌باشند.  $M_{OPB}$  و  $M_{IPB}, T_f, P$  نیز به ترتیب بیانگر نیروی محوری فشاری، نیروی محوری کششی، لنگر خمشی داخل صفحه و لنگر خمشی خارج از صفحه در عضو مهارى هستند.

به ازای شاخص قابلیت اعتماد هدف برابر  $3/09$  که معادل سطح ایمنی نرمال مطابق با توصیه آیین نامه API-RP2A است، ابتدا ضرایب اطمینان برای حالت‌های بارگذاری محوری فشاری، محوری کششی، خمش داخل صفحه و خمش خارج صفحه در حالت استقلال آماری و وجود همبستگی، کالیبره شده و از این مقادیر کالیبره شده در محاسبات استفاده شده است. از آن‌جا که بر اساس یک سطح ایمنی معادل با شاخص قابلیت اعتماد  $3/09$ ، ضرایب اطمینان کالیبره شده است، بنابراین استفاده از مقادیر کالیبره شده ضرایب اطمینان، مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف را تغییر نخواهد داد. مقادیر کالیبره شده ضرایب اطمینان به قرار زیر هستند:

- استقلال آماری: ۱ (محوری فشاری)، ۶ (محوری کششی)،  $1/2$  (خمش داخل صفحه)،  $0/8$  (خمش خارج صفحه)
- وجود همبستگی:  $1/2$  (محوری فشاری)،  $3/2$  (محوری کششی)،  $1/3$  (خمش داخل صفحه)،  $0/9$  (خمش خارج صفحه)

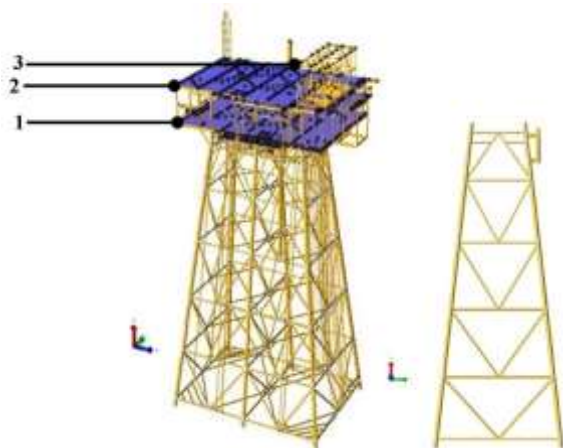
#### ۵- مدل‌سازی عدم قطعیت

در طبیعت اکثر قریب به اتفاق پارامترها مقادیر قطعی و معین ندارند. با این وجود، در مسائل مهندسی بعضاً به منظور اجتناب از تعیین تابع توزیع احتمال، برای پارامترهای فیزیکی مقادیر معین در نظر گرفته می‌شود که با واقعیت همخوانی نداشته و موجب بروز عدم قطعیت می‌شود. عدم قطعیت‌ها ممکن است شناختی (قابل کاهش) یا ذاتی (غیر قابل کاهش) باشند. عموماً عدم قطعیت‌های شناختی ناشی از کمبود دانش و اطلاعات هستند و کاهش این نوع عدم قطعیت‌ها منجر به کاهش خطای محاسباتی و بهینه شدن طرح می‌شود. با توجه به عدم قطعیت‌های قابل توجهی که در هر دو ترم بار و مقاومت در فرایند طراحی اتصالات لوله‌ای وجود دارد، تحلیل احتمالاتی این اتصالات با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های دخیل در طراحی، می‌تواند حاوی نتایج مفیدی باشد.

سرعت باد	سرعت جریان	پرپود موج	ارتفاع موج	تئوری موج غالب	زاویه موج (درجه)	$X_i = B_x X_c$
(m/s)	(m/s)	(s)	(m)			(۱۴)
۲۶/۰	۰/۳	۱۰/۲	۱۰/۴	استوکس	۳۰	
۱۹/۰	۰/۳	۸/۲	۶/۷		۷۵	
۱۷/۰	۰/۲	۷/۸	۶/۱		۱۲۰	
۱۹/۰	۰/۱	۸/۱	۶/۵		۱۶۵	
۲۲/۰	۰/۲	۹/۰	۸/۱		۲۱۰	
۲۱/۰	۰/۱	۸/۹	۷/۹		۲۲۵	
۲۱/۰	۰/۲	۸/۴	۷/۱		۳۰۰	
۲۷/۰	۰/۲	۱۰/۵	۱۱/۰		۳۴۵	

جدول (۲) مشخصات عرشه سکوی مورد مطالعه [۲۷].

مساحت عرشه	ارتفاع نسبت به سطح مرجع (متر)	مساحت عرشه (متر مربع)
۱	۱۰	۹۷۱/۹
۲	۱۵	۳۱۶/۵
۳	۱۹	۹۲۸/۳



شکل (۳) نماهای دو و سه بعدی سکوی مدل شده و ترازهای عرشه.

#### ۶- استخراج توابع احتمال و شاخص‌های آماری ترم-های بار و مقاومت

با انجام تحلیل استاتیکی برجا، نوع اتصالات و نیروهای داخلی آن‌ها استخراج شد. سپس با تحلیل آماری توسط نرم‌افزارهای SPSS و Rt مقادیر شاخص‌های آماری متغیرها، توابع توزیع و همبستگی آن‌ها تعیین گردید. این متغیرها به دو دسته مقاومت و بار تقسیم‌بندی می‌شوند. توابع توزیع جمععی حاصل برای بارگذاری‌های مختلف در شکل (۵) آمده است.

در نتیجه عدم قطعیت  $X_i$  است. به عبارتی دیگر  $B_x$  یک ضریب است که سبب می‌شود متغیر  $X_i$  دارای میانگین بایاس گردد.

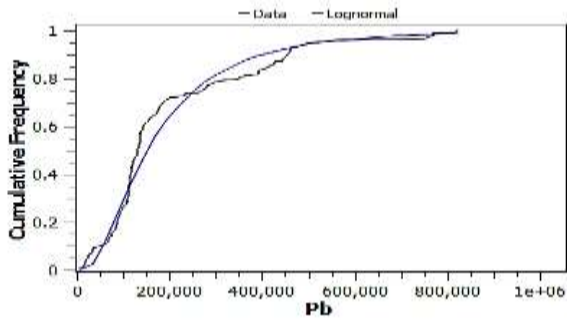
در مدل‌سازی عدم قطعیت بار، هدف برازش تابع توزیع احتمال متناسب و تعیین شاخص‌های آماری نیروهای داخلی است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از بار، یک سکوی شش پایه مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات عرشه سکو و هندسه کلی سکو برگرفته از اطلاعات یکی از سکوهایی موجود در خلیج فارس است که در عمق ۶۰ متری قرار گرفته است. سازه جکتی مورد نظر برای شرایط دریایی ۱۰۰ ساله از هشت جهت و برای دو حالت کمترین و بیشترین تراز سطح آب طراحی گردیده است. تراز آب جزومدی ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. المان‌های سازه‌ای اعم از اعضا، اتصالات و شمع‌ها بر اساس ضوابط ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آیین‌نامه API-RP2A [۱] طراحی و کنترل شده‌اند. در جدول (۱) شرایط دریایی ۱۰۰ ساله برای ۸ جهت مورد بررسی ارائه شده است. بارهای قائم دائمی شرایط طراحی روی عرشه برابر ۲۱۵۰ تن در نظر گرفته شده [۲۷] و مشخصات عرشه در جدول (۲) آمده است.

برای مدل‌سازی اثرات غیر خطی شمع و خاک در طراحی شمع از نمودارهای  $Q - z$  و  $t - z$ ،  $p - y$  به دست‌آمده از برداشت‌های میدانی واقعی استفاده شده است. نمونه‌ای از این نمودارها در شکل (۴) نشان داده شده است. شمع‌ها از داخل پایه‌ها عبور کرده و فاصله بین شمع و پایه با گروت پر شده است.

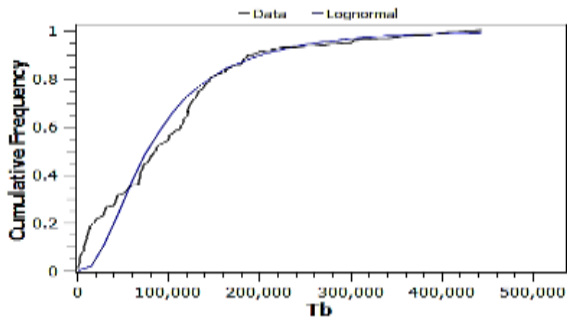
سازه مورد نظر متشکل از ۲۶۵ عدد اتصال از نوع K بوده است که در برخی از این اتصالات، مقادیر قطر و ضخامت جدار اعضای اصلی و مهار و همچنین تنش تسلیم، با دیگر اتصالات متفاوت بوده است. پس از انجام تحلیل استاتیکی برجا، اطلاعات مربوط به تک‌تک اتصالات استخراج گردیده و با انجام تحلیل آماری، پارامترهای میانگین، انحراف معیار و شکل تابع توزیع برای متغیرهای مربوطه استخراج گردیده است.

جدول (۱) شرایط دریایی ۱۰۰ ساله برای ۸ جهت موج برخوردی به سکوی مورد مطالعه [۲۷].

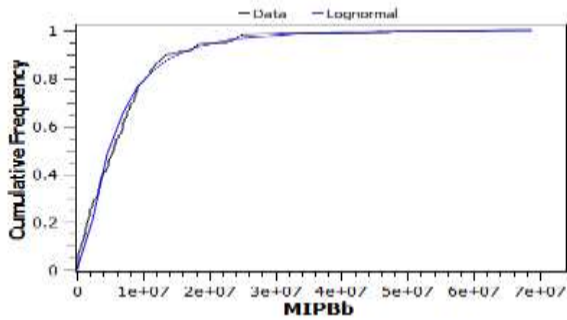




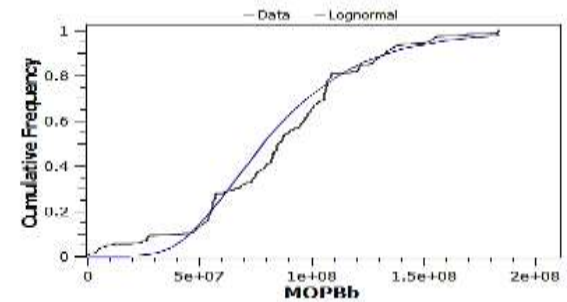
(الف)



(ب)



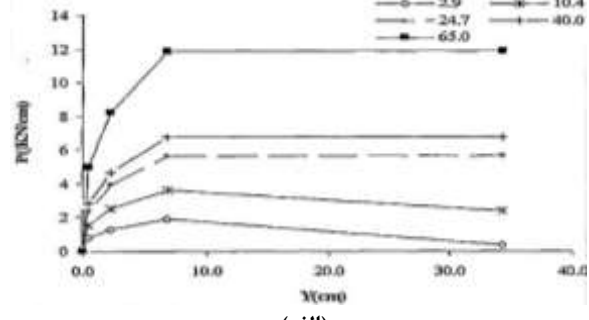
(پ)



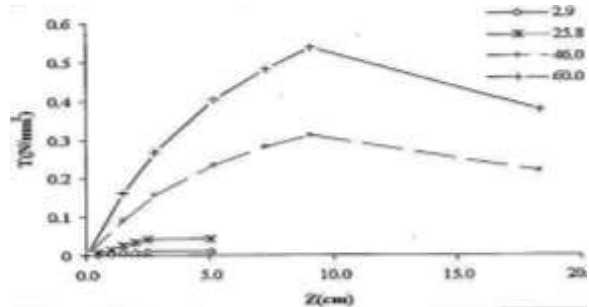
(ت)

شکل (۵) تابع توزیع تجمعی نیروهای داخلی برای اتصالات لوله-ای نوع K: الف) نیروی محوری فشاری، ب) نیروی محوری کششی، پ) لنگر خمشی داخل صفحه و ت) لنگر خمشی خارج از صفحه.

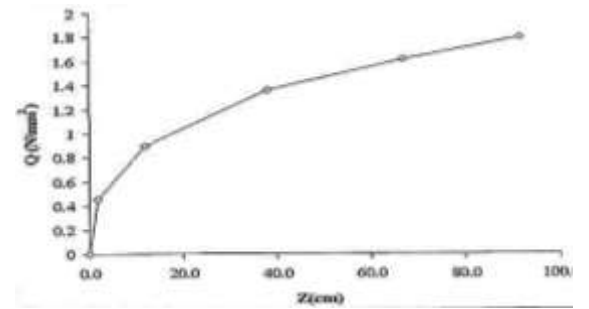
علت این امر ممکن است هزینه محاسباتی نسبتاً زیاد تحلیل قابلیت اعتماد همبسته باشد. ضریب همبستگی بین دو متغیر تصادفی دلخواه نظیر X و Y به صورت زیر تعریف می‌شود.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۴) نمونه‌ای از نمودارهای از دست آمده از برداشت‌های میدانی: الف)  $y - \mu$ ، ب)  $t - z$ ، پ)  $Q - z$  (اعداد ذکر شده مربوط به تراز لایه از بستر دریا هستند) [۲۷].

همان طور که مشاهده می‌شود تابع توزیع تجمعی مربوط به داده‌های هر چهار نوع نیروی داخلی بررسی شده انطباق مناسبی به توزیع لاگ‌نرمال دارند. مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های آماری این چهار توزیع احتمال در جدول (۳) آورده شده‌اند. پارامترهای احتمالاتی متغیرهای تصادفی مربوط به ترم مقاومت در توابع حالت حدی نیز در جدول (۴) ارائه شده است.

ممکن است بین متغیرهای تصادفی ظاهر شده در توابع حالت حدی همبستگی وجود داشته باشد. لذا ضروری است برای ارزیابی قابلیت اعتماد، تحلیل همبستگی بین متغیرها انجام شود. در کارهای گذشته به ندرت همبستگی بین متغیرها در تحلیل لحاظ شده است و نتایج قابلیت اعتماد عمدتاً مربوط به یک سری داده ناهمبسته هستند.

جدول (۳) شاخص‌های آماری و توزیع احتمال متغیرهای تصادفی مربوط به ترم بار در اتصالات نوع K.

متغیر تصادفی	نماد	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	تابع توزیع
نیروی محوری فشاری	$P$	۲۰۳۹۲۲	۱۷۹۷۵۵	۰/۸۸	لاگ‌نرمال
نیروی محوری کششی	$T_f$	۱۰۲۷۳۴	۹۰۰۶۰	۰/۸۷	لاگ‌نرمال
لنگر خمشی داخل صفحه	$M_{IPB}$	۷۲۸۰۰۰۰	۸۱۱۰۰۰۰	۰/۱۱	لاگ‌نرمال
لنگر خمشی خارج صفحه	$M_{OPB}$	۷۰۰۰۰۰۰	۳۷۸۰۰۰۰	۰/۵۴	لاگ‌نرمال

جدول (۴) شاخص‌های آماری و توزیع احتمال متغیرهای تصادفی مربوط به ترم مقاومت در اتصالات نوع K.

متغیر تصادفی	نماد	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	تابع توزیع
ضخامت عضو اصلی	$T$	۱۹/۸۹	۰/۸۸	۰/۰۴	لاگ‌نرمال
قطر عضو مهاری	$d$	۳۹۰/۵	۴/۴۷	۰/۰۱	نرمال
زاویه بین عضو اصلی و مهاری	$\theta$	۲۸	۰/۱۵	۰/۱۸	نرمال
تنش تسلیم عضو اصلی	$F_{yc}$	۲۷۳/۷۳	۱۵/۷۶	۰/۰۵	لاگ‌نرمال
ضریب مقاومت (کشش)	$Q_{u(T)}$	۲۷/۵۴	۱۲/۱۴	۰/۴۴	لاگ‌نرمال
ضریب مقاومت (فشار)	$Q_{u(P)}$	۲۳/۷۸	۱۱/۶۷	۰/۴۸	لاگ‌نرمال
ضریب مقاومت (لنگر داخل صفحه)	$Q_{u(IPB)}$	۱۱/۷۴	۶/۶۰	۰/۵۲	لاگ‌نرمال
ضریب مقاومت (لنگر خارج از صفحه)	$Q_{u(OPB)}$	۶/۶۷	۳/۳۴	۰/۱۵	لاگ‌نرمال
ضریب بار عضو اصلی (کشش)	$Q_{f(T)}$	۰/۸۸	۰/۰۶۲	۰/۰۷	لاگ‌نرمال
ضریب بار عضو اصلی (فشار)	$Q_{f(P)}$	۰/۸۶	۰/۰۵۴	۰/۰۶۲	لاگ‌نرمال
ضریب بار عضو اصلی (لنگر داخل صفحه)	$Q_{f(IPB)}$	۰/۹۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۷	لاگ‌نرمال
ضریب بار عضو اصلی (لنگر خارج از صفحه)	$Q_{f(OPB)}$	۰/۹۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۷	لاگ‌نرمال

جدول (۶) ضرایب همبستگی پارامترهای تابع حالت حدی

مقاومت استاتیکی اتصال K برای بار محوری کششی .

	$T$	$F_{yc}$	$Q_{u(P)}$	$Q_{f(P)}$	$\sin\theta$	$T_f$
$T$	1	-0.075	-0.795	-0.842	-0.058	0.55
$F_{yc}$		1	-0.3	-0.098	0.314	-0.102
$Q_{u(P)}$			1	0.695	0.418	-0.292
$Q_{f(P)}$			متقارن	1	0.223	-0.425
$\sin\theta$					1	-0.366
$T_f$						1

جدول (۷) ضرایب همبستگی پارامترهای تابع حالت حدی

مقاومت استاتیکی اتصال K برای لنگر خمشی داخل صفحه .

	$T$	$F_{yc}$	$Q_{u(P)}$	$Q_{f(P)}$	$\sin\theta$	$M_{IPB}$	$d$
$T$	1	-0.075	-0.658	-0.663	-0.058	-0.108	-0.064
$F_{yc}$		1	-0.195	0.014	0.314	-0.121	-0.495
$Q_{u(P)}$			1	0.590	0.012	0.279	0.395
$Q_{f(P)}$				1	0.006	0.089	0.330
$\sin\theta$				متقارن	1	0.452	-0.062
$M_{IPB}$						1	0.144
$d$							1

$$\rho_{X,Y} = \frac{COV[X,Y]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (15)$$

که  $COV[X, Y]$  کواریانس  $X$  و  $Y$  بوده و  $\sigma_X$  و  $\sigma_Y$  به ترتیب انحراف معیار متغیرهای  $X$  و  $Y$  هستند. ضرایب همبستگی به دست آمده برای متغیرهای تصادفی دخیل در توابع حالت حدی مربوط به مقاومت استاتیکی اتصالات لوله‌ای نوع K در جداول (۵) تا (۸) ارائه شده است. مقادیر جدول (۴) بر اساس مدل سازه واقعی و تحلیل آماری انجام شده روی ۲۶۵ اتصال از نوع K سکوی مدل شده، محاسبه شده‌اند. واحد طول میلی‌متر، واحد تنش تسلیم مگاپاسکال، واحد نیرو نیوتن، و واحد لنگر نیوتن در میلی‌متر بوده و ضرایب بدون بعد هستند.

جدول (۵) ضرایب همبستگی پارامترهای تابع حالت حدی

مقاومت استاتیکی اتصال K برای بار محوری فشاری .

	$T$	$F_{yc}$	$Q_{u(P)}$	$Q_{f(P)}$	$\sin\theta$	$P_b$
$T$	1	-0.075	-0.787	-0.565	-0.058	0.372
$F_{yc}$		1	-0.121	0.118	0.314	0.188
$Q_{u(P)}$			1	0.493	-0.193	-0.646
$Q_{f(P)}$				1	-0.027	-0.143
$\sin\theta$				متقارن	1	0.272
$P_b$						1

در رابطه فوق،  $G(y)$  تقریب خطی از تابع حالت حدی در فضای نرمال استاندارد،  $\gamma$  بردار متغیرهای تصادفی اصلی در فضای نرمال استاندارد،  $\nabla G(y^*)$  گرادیان تابع حالت حدی  $G(y)$  در نقطه طراحی،  $\gamma^*$  بردار نقاط طراحی در فضای نرمال استاندارد،  $\beta$  شاخص قابلیت اعتماد، و  $\alpha^T$  ترانهاده بردار یکه‌ای است که به عنوان بردار اهمیت به صورت  $\alpha = \|\nabla G(y)/\|\nabla G(y^*)\|$  تعریف می‌شود. سهم بردار  $\alpha$  در محاسبه واریانس تابع حالت حدی با توجه به رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$Var[G(y)] = \|\nabla G\|^2 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2) \quad (17)$$

واریانس تابع حالت حدی مستقیماً در محاسبه شاخص قابلیت اعتماد تأثیرگذار است. لذا  $\alpha_i$  ها که کسینوس‌های هادی بردار یکه نرمال تابع حالت حدی هستند، ضرایب حساسیت نامیده می‌شوند. هرچه مقدار  $\alpha_i$  بزرگ‌تر باشد، متغیر تصادفی متناظر با آن مشارکت نسبی بیشتری در احتمال گسیختگی خواهد داشت. چرا که:

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2 = 1 \quad (18)$$

در رابطه فوق،  $n$  نشان دهنده تعداد متغیرهای تصادفی دخیل در تابع حالت حدی است.

مؤلفه‌های منفی بردار  $\alpha$  متناظر با متغیرهای مربوط به مقاومت (ظرفیت) بوده و مؤلفه‌های مثبت بردار  $\alpha$  مربوط به متغیرهای بار (تقاضا) در یک تابع حالت حدی هستند.

برای متغیرهایی که همبستگی داشته باشند، به جای بردار  $\alpha$ ، از بردار  $\gamma$  برای بیان اهمیت متغیرها استفاده می‌شود [۲۰]:

$$\gamma = \frac{\alpha^T J_{y^*,x^*}}{\|\alpha^T J_{y^*,x^*}\|} D \quad (19)$$

در رابطه فوق،  $J_{y^*,x^*}$  ژاکوبین بین بردار نقاط طراحی در فضای استاندارد ( $y^*$ ) و بردار طراحی فضای اصلی متغیرها ( $x^*$ ) است که با استفاده از همبستگی بین متغیرها به دست می‌آید. ماتریس  $D$  یک ماتریس قطری است که المان‌های روی قطر اصلی آن برابر جذر المان‌های روی قطر اصلی ماتریس کواریانس متغیرهای نرمال معادل است.

ماتریس کواریانس متغیرهای نرمال معادل به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود. در صورتی که متغیرهای اصلی همبستگی نداشته باشند، خواهیم داشت:  $\alpha = \gamma$

$$\sum XX = J_{y^*,x^*}^{-1} J_{y^*,x^*}^{-T} \quad (20)$$

جدول (۸) ضرایب همبستگی پارامترهای تابع حالت حدی مقاومت استاتیکی اتصال K برای لنگر خمشی خارج از صفحه.

	T	$F_{yc}$	$Q_{u(P)}$	$Q_{f(P)}$	$\sin\theta$	$M_{OPB}$	d
T	1	-0.075	-0.675	-0.663	-	0.682	-
$F_{yc}$		1	-0.201	0.014	0.058	-	0.064
$Q_{u(P)}$			1	0.510	0.034	0.293	0.494
$Q_{f(P)}$				1	0.006	-	0.452
$\sin\theta$					1	0.338	-
$M_{OPB}$						1	0.568
d							1

محاسبه ضرایب همبستگی بر اساس داده‌های برداشت شده از ۲۶۵ اتصال K بوده و این محاسبات توسط نرم‌افزار SPSS انجام شده است. نتایج تحلیل قابلیت اعتماد با در نظر گرفتن همبستگی بین ضریب مقاومت، ضریب بار عضو اصلی مهارى، مشخصات هندسی اتصال (ضخامت عضو اصلی اتصال و قطر عضو مهارى) و بارگذاری داخلی، ارائه گردیده است. سایر اثرات همبستگی به دلیل ناچیز بودن (نزدیک صفر بودن) ضرایب همبستگی و تأثیر اندک در محاسبات قابلیت اعتماد، در نظر گرفته نشده‌اند.

## ۷- تحلیل حساسیت

برای یک سیستم، حساسیت عبارت است از تغییرات خروجی سیستم به ازای تغییرات در ورودی آن. خروجی تحلیل قابلیت اعتماد، احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد است. این خروجی‌ها نسبت به ورودی‌هایی که پارامترهای احتمالاتی متغیرهای تصادفی هستند، حساس می‌باشند. با محاسبه مشتق شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست نسبت به این پارامترها می‌توان نسبت به مسئله دید فیزیکی بهتری پیدا کرده و مهم‌ترین پارامترهای دخیل در مسئله را تعیین نمود. بردارهای اهمیت بردارهای یکه‌ای هستند که می‌توانند این حساسیت را به خوبی بیان کنند. تقریب خطی هر تابع حالت حدی حول نقطه طراحی  $\gamma^*$  در فضای نرمال استاندارد به روش قابلیت اعتماد مرتبه اول به صورت زیر است:

$$G(y) \cong \|\nabla G(y^*)\|(\beta - \alpha^T y) \quad (16)$$

نرمال اتصالات در مودهای گسیختگی چهارگانه هستند. در این جداول، ستون‌های حساسیت  $\beta$  نسبت به انحراف معیار، میزان حساسیت شاخص قابلیت اعتماد نسبت به انحراف معیار متغیرها را نشان می‌دهند. مقادیر موجود در ستون‌های با عنوان حساسیت  $\beta$  نسبت به میانگین، نیز میزان حساسیت شاخص قابلیت اعتماد نسبت به میانگین متغیر تصادفی را بیان می‌کنند.

تحلیل حساسیت در این پژوهش با در نظر گرفتن همبستگی بین مشخصات هندسی اتصال شامل ضخامت عضو اصلی اتصال و قطر عضو مهار، ضریب مقاومت، ضریب بار عضو اصلی اتصال و بارگذاری انجام شده است. در جداول (۹) و (۱۰) مقادیر عددی مؤلفه‌های بردارهای اهمیت برای تمامی متغیرهای تصادفی دخیل در تحلیل حساسیت اتصال K آمده است. این مقادیر مربوط به ضریب اطمینان سطح ایمنی

جدول (۹) نتایج تحلیل حساسیت برای تابع حالت حدی تعریف شده جهت مقاومت استاتیکی اتصال K در مود گسیختگی محوری.

$\alpha$	$\gamma$	حساسیت $\beta$ نسبت به		متغیر تصادفی	نیروی داخلی
		میانگین	انحراف معیار		
-0.051	-0.097	0.106	0.12	ضخامت عضو اصلی اتصال	فشار محوری
-0.064	-0.063	0.0041	-0.001	تنش تسلیم عضو اصلی اتصال	
-0.378	-0.507	0.085	-0.073	ضریب مقاومت	
-0.281	-0.068	1.404	-1.695	ضریب بار عضو اصلی اتصال	
0.181	0.177	-1.236	-0.681	سینوس زاویه بین اعضای اتصال	
0.858	0.831	2.22E-07	-6.46E-06	نیروی محوری فشاری	
-0.036	-0.099	0.109	0.072	ضخامت عضو اصلی اتصال	کشش محوری
-0.064	-0.064	0.0041	-0.00072	تنش تسلیم عضو اصلی اتصال	
-0.279	-0.473	0.06	-0.044	ضریب مقاومت	
-0.345	-0.079	1.382	-1.576	ضریب بار عضو اصلی اتصال	
0.191	0.192	-1.276	-0.461	سینوس زاویه بین اعضای اتصال	
0.872	0.848	-5.2E-05	-6.43E-06	نیروی محوری کششی	

جدول (۱۰) نتایج تحلیل حساسیت برای تابع حالت حدی تعریف شده جهت مقاومت استاتیکی اتصال K در مود گسیختگی محوری.

$\alpha$	$\gamma$	حساسیت $\beta$ نسبت به		متغیر تصادفی	نیروی داخلی
		میانگین	انحراف معیار		
-0.128	-0.163	0.178	0.325	ضخامت عضو اصلی اتصال	لنگر خمشی داخل صفحه
-0.111	-0.105	0.0071	-0.0027	تنش تسلیم عضو اصلی اتصال	
-0.68	-0.912	0.403	-0.446	ضریب مقاومت	
-0.621	-0.105	2.288	-3.459	ضریب بار عضو اصلی اتصال	
0.302	0.287	-2.013	-1.803	سینوس زاویه بین اعضای اتصال	
0.183	0.203	-2.51E-08	-1.12E-08	لنگر خمشی داخل صفحه	
-0.028	-0.036	0.005	-0.0071	قطر عضو مهارى اتصال	لنگر خمشی خارج از صفحه
-0.123	-0.169	0.185	0.341	ضخامت عضو اصلی اتصال	
-0.115	-0.109	0.0075	-0.0027	تنش تسلیم عضو اصلی اتصال	
-0.698	-0.923	0.7	-0.77	ضریب مقاومت	
-0.6	-0.108	2.38	-3.65	ضریب بار عضو اصلی اتصال	
0.313	0.299	-2.1	-1.86	سینوس زاویه بین اعضای اتصال	
0.173	0.102	-2.78E-08	-1.19E-08	لنگر خمشی خارج از صفحه	
-0.018	-0.037	0.0053	-0.0079	قطر عضو مهارى اتصال	

ترتیب اهمیت پارامترها بدین شکل است: ضریب مقاومت، ضریب بار عضو اصلی اتصال، زاویه بین اعضای اصلی و مهاری اتصال، لنگر خمشی، ضخامت عضو اصلی، تنش تسلیم عضو اصلی، و قطر عضو مهاری. این در حالی است که در همین نوع اتصال و برای همین توابع حالت حدی، با لحاظ کردن همبستگی بین متغیرها، مشاهده می‌شود که ترتیب اهمیت پارامترها تغییر می‌کند. به طوری که برای تابع حالت حدی مربوط به لنگر خمشی داخل صفحه، ترتیب بدین صورت است: ضریب مقاومت، زاویه بین اعضای اصلی و مهاری اتصال، لنگر خمشی، ضخامت عضو اصلی، تنش تسلیم عضو اصلی، ضریب بار عضو اصلی اتصال، و قطر عضو مهاری؛ در شرایطی که برای تابع حالت حدی مربوط به لنگر خمشی خارج از صفحه، ترتیب بدین شکل است: ضریب مقاومت، زاویه بین اعضای اصلی و مهاری اتصال، ضخامت عضو اصلی، تنش تسلیم عضو اصلی، ضریب بار

عضو اصلی اتصال، لنگر خمشی، و قطر عضو مهاری. هدف از تحلیل حساسیت، بیان تغییرات خروجی به ازای تغییرات ورودی است. در شکل‌های (۶) تا (۹)، نحوه تغییرات تابع حالت حدی در اثر تغییر مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال K نشان داده شده است. در این اشکال، محور قائم، مقدار تابع حالت حدی را نشان می‌دهد. جایی که این تابع افزایش یابد، محدوده ایمنی اتصال نیز افزایش یافته و بنابراین احتمال شکست کاهش می‌یابد. در هر نمودار، نتایج چهار مود گسیختگی مربوط به کشش و فشار محوری و لنگر خمشی داخل و خارج صفحه در کنار هم ارائه شده است. با توجه به اشکال مذکور، واضح است که تغییرات پارامترهای هندسی اتصال (ضخامت جدار عضو اصلی و قطر عضو مهاری) نسبت به تغییرات توابع حالت حدی شیب مثبت دارند. این بدین معنی است که افزایش این پارامترها ایمنی اتصال را نیز افزایش می‌دهد.

شکل (۶) نشان می‌دهد افزایش تنش تسلیم عضو اصلی اتصال در تمامی توابع حالات حدی سبب افزایش سطح قابلیت اعتماد می‌شود. شکل (۷) نیز نشان می‌دهد افزایش ضخامت عضو اصلی سبب افزایش سطح قابلیت اعتماد می‌شود. با توجه به شکل‌های (۶) و (۷)، تأثیر تنش تسلیم و ضخامت عضو اصلی روی تابع حالت حدی در مود گسیختگی کشش محوری بیشتر از مود گسیختگی فشار محوری می‌باشد. همچنین تأثیر این پارامترها در حالت

اعداد این ستون‌ها ممکن است منفی یا مثبت باشند. اگر برای متغیری، این عدد مثبت باشد، بدین معنی است که افزایش انحراف معیار آن متغیر سبب افزایش شاخص قابلیت اعتماد می‌شود؛ و اگر برای متغیری این عدد منفی باشد، بدین معنی است که افزایش انحراف معیار آن متغیر سبب کاهش شاخص قابلیت اعتماد می‌گردد. عدد مربوط به ستون ۷ این جداول نشان دهنده میزان اهمیت متغیر تصادفی در حالتی است که بین متغیرها همبستگی وجود داشته باشد. اعداد ستون  $\alpha$  نیز میزان اهمیت متغیرهای تصادفی را در حالت استقلال آماری بین متغیرها بیان می‌کنند. مقصود از اهمیت، میزان مشارکت نسبی واریانس متغیرها در واریانس تابع حالت حدی است. اعداد مثبت این ستون‌ها مربوط به پارامترهای بار تابع حالت حدی است و اعداد منفی، پارامترهای مقاومتی تابع حالت حدی را نشان می‌دهند.

با توجه به جدول (۹) مشاهده می‌شود که برای اتصال نوع K، به عنوان مثال در تابع حالت حدی مربوط به نیروی محوری فشاری، با فرض استقلال آماری بین متغیرها، ترتیب اهمیت پارامترها بدین شکل است: نیروی محوری فشاری، ضریب مقاومت، ضریب بار عضو اصلی اتصال، زاویه بین اعضای اصلی و مهاری اتصال، تنش تسلیم عضو اصلی، و ضخامت عضو اصلی. این در حالی است که در همین نوع اتصال و برای همین تابع حالت حدی، با لحاظ کردن همبستگی بین متغیرها، مشاهده می‌شود که تأثیر زاویه بین اعضای اصلی و مهاری اتصال بیشتر از ضریب بار عضو اصلی اتصال بوده و تأثیر ضخامت عضو اصلی نیز از تنش تسلیم آن بیشتر است. لذا همبستگی بین متغیرها در تعیین مهم-ترین پارامترهای دخیل در محاسبات قابلیت اعتماد نقش بسزایی داشته و ممکن است تأثیر یک پارامتر را کاهش یا افزایش دهد.

ضمناً با مقایسه مودهای گسیختگی فشار و کشش محوری در شرایط استقلال آماری متغیرها مشخص می‌شود که در مود گسیختگی کششی، بر خلاف مود گسیختگی فشاری، ضریب بار عضو اصلی نسبت به ضریب مقاومت مشارکت نسبی بیشتری در احتمال گسیختگی دارد.

با توجه به جدول (۱۰) ملاحظه می‌شود که برای اتصال نوع K، در توابع حالت حدی مربوط هر دو نوع لنگر خمشی داخل و خارج صفحه، با فرض استقلال آماری بین متغیرها،

### ۸- بررسی همبستگی بین موده‌های مختلف گسیختگی

برای محاسبه ضریب همبستگی بین دو تابع حالت حدی دلخواه نظیر  $i$  و  $j$  کافی است ضرب داخلی بردار  $\alpha$  برای دو تابع به دست آید:

$$\rho_{ij} = \alpha_i \cdot \alpha_j^T \quad (21)$$

ضرایب همبستگی بین توابع حالت حدی چهارگانه در جدول (۱۱) ارائه شده است. محدوده این ضریب بین -۱ و ۱ است. هرچه قدر مطلق این ضریب به ۱ نزدیکتر باشد، نشان دهنده این است که رابطه خطی قوی‌تری بین دو تابع حالت حدی برقرار است؛ و بالعکس هرچه مقدار این ضریب به صفر نزدیک‌تر باشد، نشانگر این است که رابطه خطی ضعیفی بین این دو تابع برقرار است. یعنی اگر هم رابطه‌ای هست، این رابطه خطی نخواهد بود.

خمش داخل صفحه بیشتر از خمش خارج از صفحه است. شکل (۸) نشان می‌دهد افزایش زاویه بین اعضای اصلی و مهاري سطح قابلیت اعتماد را کاهش می‌دهد. شکل (۹) نیز نشان می‌دهد که افزایش قطر عضو مهاري در حالت خمش داخل صفحه نسبت به خمش خارج از صفحه، مقدار شاخص قابلیت اعتماد را بیشتر افزایش می‌دهد.

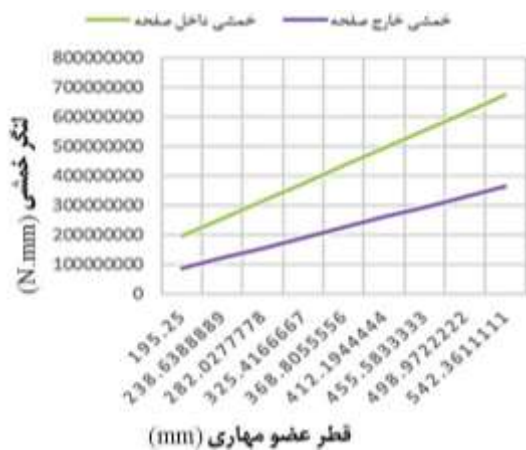
در مرحله انجام تحلیل حساسیت، تحلیل المان محدود صورت نگرفته است. به عبارتی تحلیل قابلیت اعتماد از نوع صریح می‌باشد. بنابراین مسأله تغییر فرم و شکل سازه در حین تغییرات مقادیر مشخصات هندسی به وجود نمی‌آید. در مورد مغایرت مقادیر متغیرهای تصادفی با جدول (۴) نیز ذکر این نکته ضروری است که مقدار اشاره شده در جدول (۴) میانگین می‌باشد، در حالی که در اشکال (۶) تا (۹) محدوده تغییرات مورد بحث است.



شکل (۸) تغییر مقدار تابع حالت حدی به ازای تغییر زاویه بین اعضای اصلی و مهاري.



شکل (۶) تغییر مقدار تابع حالت حدی به ازای تغییر تنش تسلیم عضو اصلی.



شکل (۹) تغییر مقدار تابع حالت حدی به ازای تغییر قطر عضو مهاري.



شکل (۷) تغییر مقدار تابع حالت حدی به ازای تغییر ضخامت جدار عضو اصلی.



۱۰ - مراجع

- [1] American Petroleum Institute (API), "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design: RP2A-WSD", 21<sup>st</sup> Edition, Errata and Supplement 3, Washington DC, US, 2007.
- [2] Pillai, T., Parasad, A., "Fatigue Reliability Analysis in Time Domain for Inspection Strategy of Fixed Offshore Structures", Ocean Engineering, Vol.27, pp.167-186, 2000.
- [۳] آسوده، ش.، "بررسی تأثیر خصوصیات هندسی اتصال روی درجه خمش (DoB) در اتصالات لوله‌ای K سازه‌های فراساحلی تحت بارگذاری خمشی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳.
- [4] Nordal, H., "Application of Ultimate Strength Analysis in Design of Offshore Structures System", Conference on Integrity of Offshore structures, Glasgow; 1991.
- [5] Frieze, P., "Some Implications for Offshore Design Code Development of Loading Strength and Reliability Modeling", International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 1989.
- [6] Birkinshaw, M., Smith, D., "The Setting of Target Safety Levels for the Assessment of Offshore Structures", The 6<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, 26-31 May, LA, California, US; 1996.
- [7] Sørensen, J. D., Engelund, S., "Stochastic Finite Elements in Reliability-Based Structural Optimization", The 1<sup>st</sup> World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Germany; 1995.
- [8] Kiureghian, A. D., Ke, J., "The Stochastic Finite Element Method in Structural Reliability", Structural Safety, Vol. 12, pp. 417-426; 1998.
- [9] Manuel, L., Schmucker, D. G., Cornell, C. A., "A Reliability-Based Design Format for Jacket Platforms under Wave Loads", Marine Structures, Vol.11, pp.413-428, 1998.
- [10] Halil, K., Vrouwenvelder, T., "Reliability-Based Optimisation of Offshore Jacket-Type Structures with an Integrated-Algorithms System", Ships and Offshore Structures, Vol.5, pp.67-74, 2010.
- [11] Waarts, P., Vrouwenvelder, T., "Structural Reliability Using the Finite Element Method", Asranet Conference, 2002.
- [12] Mahsuli, M., Haukaas, T., "Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.27, pp.87-98, 2013.

جدول (۱۱) ضرایب همبستگی توابع حالت حدی چهارگانه.

	فشاری محوری	کشش محوری	خمش داخل صفحه	خمش خارج از صفحه
فشار محوری	۱	۰/۹۹	۰/۶۵	۰/۶۵
کشش محوری	۰/۹۹	۱	۰/۶۳	۰/۶۲
خمش داخل صفحه	۰/۶۵	۰/۶۳	۱	۰/۹۹
خمش خارج از صفحه	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۹۹	۱

با توجه به جدول (۱۱) مشاهده می‌شود که بین توابع حالت حدی برای مودهای گسیختگی کشش و فشار محوری همبستگی خطی قوی وجود دارد. این همبستگی خطی قوی بین توابع حالت حدی تحت لنگر خمشی داخل و خارج صفحه نیز برقرار است.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با انجام تحلیل حساسیت، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی مقاومت استاتیکی اتصالات لوله‌ای تک‌صفحه‌ای K تحت اثر نیروهای محوری کششی و فشاری و لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه، بر اساس تحلیل قابلیت اعتماد مشخص گردید. در این مطالعه، تمامی پارامترهای تأثیرگذار روی مقاومت استاتیکی اتصال و همچنین نیروهای داخلی به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و میزان تأثیر عدم قطعیت‌های مختلف روی احتمال شکست اتصال K بر اساس معیار گسیختگی تسلیم بررسی گردید. تابع توزیع لاگ‌نرمال به عنوان تابع احتمال حاکم بر نیروهای داخلی برای یک سکوی جکتی تپ در شرایط دریایی خلیج فارس پیشنهاد شده و پارامترهای آن برای چهار حالت بارگذاری، شامل کشش و فشار محوری و لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه، به طور جداگانه تعیین گردید. اثرات همبستگی بین متغیرهای تصادفی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شد که همبستگی بین متغیرها در تعیین مهم‌ترین پارامترهای دخیل در محاسبات قابلیت اعتماد نقش بسزایی دارد. در نهایت، ضرایب همبستگی بین توابع حالت حدی چهارگانه نیز تعیین گردید.

- [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
- [۲۷] ایزددوست، ا.، "طراحی سکوه‌های شابلونی تحت اثر بارگذاری‌های دریا به روش قابلیت اعتماد و سطوح عملکردی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.
- [13] Lee, Y., Choi, B., Lee, J., Kim, S. Y., Han, S., "Reliability-Based Design Optimization of monopile transition piece for Offshore Wind Turbine System", *Renewable Energy*, Vol.71, pp.729-741, 2014.
- [14] Kim, D. H., Lee, S. G., "Reliability Analysis of Offshore Wind Turbine Support Structures under Extreme Ocean Environmental Loads", *Renewable Energy*, Vol.79, pp.161-166, 2015.
- [15] Yang, H., Zhu, Y., Lu, Q., Zhang, J., "Dynamic Reliability Based Design Optimization of the Tripod Substructure of Offshore Wind Turbines", *Renewable Energy*, Vol.78, pp.16-25, 2015.
- [16] Zhang, X., Sun, L., Sun, H., Guo, Q., Bai, X., "Floating Offshore Wind Turbine reliability Analysis based on System Grading and Dynamic FTA", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.154, pp.21-33; 2016.
- [17] Wei, K., Arwade, S.R., Myers, A.T., Valamanesh, V., "Directional Effects on the Reliability of Non-axisymmetric Support Structures for Offshore Wind Turbines under Extreme Wind and Wave Loading", *Engineering Structures*, Vol.106, pp.68-79; 2016.
- [18] Lee, S., Jo, C., Bergan, P., Pettersen, B., Chang, D., "Life-cycle Cost-based Design Procedure to Determine the Optimal Environmental Design Load and Target Reliability in Offshore Installations", *Structural Safety*, Vol.59, pp.96-107, 2016.
- [19] Nassiraei, H., Lotfollahi-Yaghin, M. A., Ahmadi, H., "Static Strength of Collar Plate Reinforced Tubular T/Y-joints under Brace Compressive Loading", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.119, pp.39-49, 2016.
- [20] Nassiraei, H., Lotfollahi-Yaghin, M. A., Ahmadi, H., Zhu, L., "Static Strength of Doubler Plate Reinforced Tubular T/Y-joints under in-plane Bending Load", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.136, pp.49-64, 2017.
- [21] Nassiraei, H., Zhu, L., Lotfollahi-Yaghin, M. A., Ahmadi, H., "Static Capacity of Tubular X-joints Reinforced with Collar Plate Subjected to Brace Compression", *Thin-Walled Structures*, Vol.119, pp.256-265, 2017.
- [22] Nassiraei, H., Mojtahedi, A., Lotfollahi-Yaghin, M. A., Ahmadi, H., "Static Strength of X-joints Reinforced with Collar Plates Subjected to Brace Tensile Loading", *Ocean Engineering*, Vol.161, pp.227-241, 2018.
- [23] Nassiraei, H., Lotfollahi-Yaghin, M. A., Neshaei, S. A., Zhu, L., "Structural Behavior of Tubular X-joints Strengthened with Collar Plate under Axially Compressive Load at Elevated Temperatures", *Marine Structures*, Vol.61, pp.46-61, 2018.