

ضرایب اطمینان مبتنی بر تحلیل قابلیت اعتماد جهت طراحی اعضای لوله‌ای تشکیل دهنده مهاربندهای افقی جکت فراساحلی

حمید احمدی^{۱*}، مجید سمیعی زنوزیان^۲، محمدعلی لطف‌اللهی یقین^۳

^۱ دانشیار دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

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

^۳ استاد دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۸/۴/۸، پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۲، نشر آنلاین: ۹۸/۱۰/۲۲)

چکیده

در این مقاله، قابلیت اعتماد اعضای لوله‌ای تشکیل دهنده مهاربندهای افقی یک سازه جکت، در برابر گسیختگی ناشی از اعمال تنش بیش از حد مجاز، ارزیابی می‌شود. به منظور تعریف شرایط گسیختگی، روابطی که توسط ویرایش ۲۱ آئین‌نامه API RP 2A-WSD برای کنترل مقاومت اعضای لوله‌ای تحت ترکیب نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی پیشنهاد شده است، ملاک عمل قرار می‌گیرد. در این مطالعه، پارامترهای تأثیرگذار روی مقاومت عضو و همچنین نیروهای داخلی به‌عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و توابع احتمال حاکم بر این نیروها شامل نیروی محوری فشاری و لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه، برای یک سکوی جکتی تیپ در شرایط دریایی خلیج فارس استخراج می‌گردد. برای مدل‌سازی بارهای محیطی از اطلاعات مربوط به وضعیت دریایی منطقه پارس جنوبی استفاده شده و نتایج روش‌های مختلف تحلیل قابلیت اعتماد شامل HL-RF، MVFOSM و MCS مقایسه می‌شوند. در نهایت، بر مبنای نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، روابطی برای تعیین ضرایب اطمینان مناسب در طراحی اعضای لوله‌ای تشکیل دهنده مهاربندهای افقی یک سازه جکت، برحسب شاخص قابلیت اعتماد هدف و احتمال گسیختگی هدف پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: سکوی شابلونی (جکتی)، ضریب اطمینان، عضو لوله‌ای، مهاربند افقی جکت، تحلیل قابلیت اعتماد.

۱- مقدمه

اعضای لوله‌ای و اتصالات لوله‌ای می‌توان به آئین‌نامه API RP 2A-

WSD (۲۰۰۷) مراجعه نمود.

طراحی نامناسب مهاربندهای جکت می‌تواند منجر به خساراتی جبران‌ناپذیر شود. با توجه به این که مهاربندها در 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 اعضا مشهود است. کنترل ضوابط طراحی و الزامات آئین‌نامه‌ای 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. یک طرح زمانی بهینه خواهد بود که مقاومت عضو سازه‌ای با حداکثر بار اعمالی به آن حداقل اختلاف را داشته باشد.

زیرسازه یک سکوی فراساحلی شابلونی، یک قاب فضاکار فولادی است که جکت^۱ نامیده شده و از جوش دادن اعضای لوله-ای^۲ یا همان مقاطع دایروی توخالی (CHS)^۳ ساخته می‌شود (شکل ۱). اعضای لوله‌ای بکار رفته در یک سازه جکت را می‌توان به دو دسته اصلی شامل پایه‌های جکت^۴ و اعضای مهار^۵ یا مهاربند طبقه‌بندی کرد. محل اتصال اعضای لوله‌ای با زوایای مختلف به هم، اتصال لوله‌ای^۶ نامیده می‌شود (شکل ۲). در هر اتصال لوله-ای، یک عضو اصلی^۷ وجود دارد که یکسره است و سایر اعضای لوله‌ای موجود در اتصال باید بدون عبور از درون عضو اصلی، به آن جوش داده شوند. در شکل (۲)، عضو اصلی همان پایه جکت است و سایر اعضا، مهاربند هستند. برای آشنایی با جزئیات نحوه طراحی

5. Brace members
6. Tubular joint
7. Chord

1. Jacket
2. Tubular member
3. Circular hollow section
4. Jacket legs

به مرور زمان با پیشرفت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، سعی شد با کاهش 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 سیستم سازه‌ای با در نظر گرفتن تعداد زیادی مود خرابی، به جای سازه‌ای با یک مود خرابی حاکم، تعمیم پیدا کرد (Frieze, ۱۹۸۹).

تحقیقات مربوط به سطوح ایمنی و کالیبره کردن ضرایب مقاومت و بار بر مبنای تحلیل 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 (Birkinshaw و Smith, ۱۹۹۶). چهارچوب طراحی سکوه‌های ثابت جکتی تحت بارگذاری موج بر اساس قابلیت اعتماد توسط Manuel و همکاران (۱۹۹۸) ارائه گردیده است. نحوه به‌کارگیری مدل‌های اجزای محدود تصادفی در بررسی قابلیت اعتماد سازه توسط Kiureghian و Ke (۱۹۹۸) و Sørensen و Engelund (۱۹۹۵) تشریح شده است. از تحلیل قابلیت اعتماد توسط Halil و Vrouwenvelder (۲۰۱۰) برای بهینه‌سازی سکوه‌های فراساحلی ثابت استفاده شده است. در این بررسی، اثرات هم‌زمانی بارهای وارده در نظر گرفته شده و براساس یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی با کمینه کردن وزن سازه، سطح ایمنی متناظر 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 تکنیک‌های سطح پاسخ 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 (۲۰۰۲) آمده است.

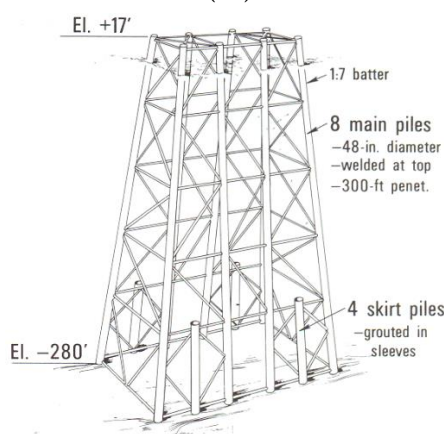
احمدی و لطف‌اللهی‌یقین (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) به تحلیل احتمالاتی ضرایب تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای KT دو صفحه‌ای پرداخته و تأثیر نتایج را روی تحلیل قابلیت اعتماد خستگی این اتصالات بر مبنای منحنی‌های S-N مورد بررسی قرار دادند. توسعه نرم‌افزاری در زمینه ارزیابی قابلیت اعتماد و تحلیل حساسیت نیز اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به برنامه کامپیوتری Rt اشاره کرد که در سال ۲۰۱۲ توسط Mahsuli و Haukaas (۲۰۱۳) برای تحلیل قابلیت اعتماد و بهینه‌سازی با مدل‌های احتمالاتی ارائه شده است.

منشأ ضریب اطمینان، به‌عنوان یک پارامتر مهم در نتیجه طرح نیز عدم قطعیت است. لذا برای دستیابی به سطح ایمنی پایدار، یکی از بهترین روش‌ها، کالیبره کردن ضرایب اطمینان است که از مهم‌ترین کاربردهای تحلیل قابلیت اعتماد می‌باشد. هدف رسیدن به یک سطح ثابت از قابلیت اعتماد است؛ به طوری که بتوان با انتخاب یک مقدار دلخواه برای احتمال گسیختگی، ضریب اطمینان متناظر را تعیین کرد.

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 (Prasad و Pillai, ۲۰۰۰). در کنار بررسی قابلیت اعتماد برای پدیده خستگی، تحلیل قابلیت اعتماد برای تعیین ظرفیت نهایی اعضای لوله‌ای نیز مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا با توجه به پیچیدگی‌های موجود، محاسبات قابلیت اعتماد با ساده‌سازی‌های زیادی همراه بود (Nordal, ۱۹۹۱).



(الف)

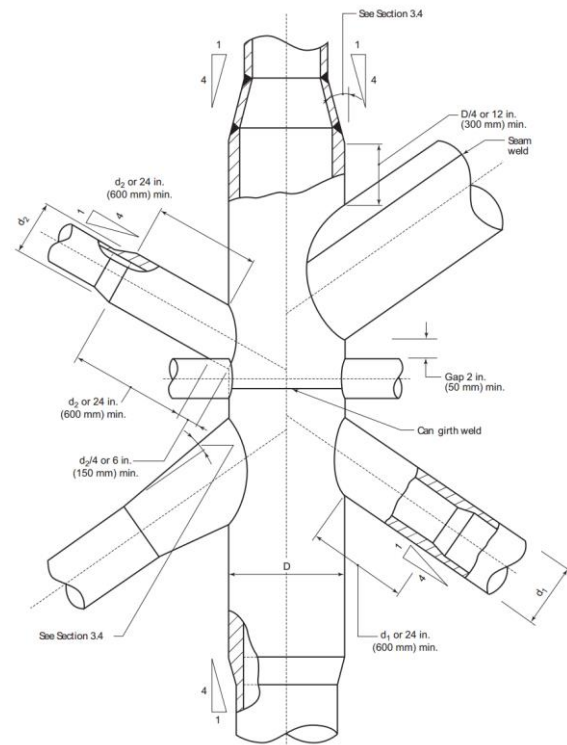


(ب)

شکل ۱- الف) نمونه‌ای از یک سکوی شابلونی (جکتی) در حال سرویس‌دهی، ب) زیرسازه سکو (جکت)

مدل سازی بارهای محیطی از اطلاعات مربوط به وضعیت دریایی منطقه پارس جنوبی استفاده شده و نتایج روش های مختلف تحلیل قابلیت اعتماد شامل MVFOSM، HL-RF، و MCS مقایسه می شوند. در نهایت، بر مبنای نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، روابطی برای تعیین ضرایب اطمینان مناسب در طراحی اعضای لوله ای تشکیل دهنده مهاربندهای افقی یک سازه جکت، بر حسب شاخص قابلیت اعتماد هدف و احتمال گسیختگی هدف پیشنهاد می شود.

تعیین ضرایب اطمینان در آئین نامه های طراحی مبتنی بر روش تنش مجاز، غالباً بر مبنای تجربه بوده است؛ در حالی که در آئین نامه های طراحی مبتنی بر روش ضریب بار و مقاومت (LRFD)، ضرایب اطمینان بر اساس تحلیل های آمار و احتمالی به دست می آیند. لذا از آن جایی که در روش LRFD، عدم قطعیت ها بیشتر و بهتر در فرآیند طراحی لحاظ می شوند، هزینه طرح کاهش می یابد؛ بدون این که احتمال گسیختگی افزایش یابد. در واقع افزایش لحاظ کردن عدم قطعیت ها، منجر به بهبود سیستماتیک معیارهای طراحی شده است. گرچه استفاده از آئین نامه های مبتنی بر روش LRFD^۱ در طراحی سازه های فولادی متداول کاملاً مرسوم است، ولی در مورد سکوهای فراساحلی فولادی این طور نیست و آئین نامه API RP 2A به عنوان شناخته شده ترین آئین نامه طراحی این نوع سازه ها، نسخه LRFD بروز شده ندارد و صرفاً نسخه تنش مجاز آن (WSD) در بازه های زمانی منظم بروز رسانی می شود. در واقع آخرین بروز رسانی نسخه LRFD آئین نامه API RP 2A مربوط به سال ۱۹۹۷ میلادی است (API RP 2A-LRFD، ۱۹۹۷). علت این است که در تدوین نسخه LRFD آئین نامه API RP 2A که اولین بار در سال ۱۹۹۳ میلادی منتشر شد، همان ضرایب بار و مقاومت ارائه شده توسط آئین نامه AISC برای طراحی ساختمان های فولادی، جهت طراحی سکوهای فراساحلی نیز پیشنهاد شده بود که مطالعات بعدی نشان دادند استفاده از این ضرایب برای طراحی سکوهای فراساحلی مناسب نیست و در نتیجه استفاده از نسخه LRFD آئین نامه API RP 2A به سرعت کاهش یافت. سپس توسط API مقرر شد که با انجام یک سری مطالعات آمار و احتمالی جامع، ضرایب مناسب برای روش LRFD جهت طراحی سکوهای فراساحلی ثابت به دست آمده و یک نسخه جدید از آئین نامه API RP 2A-LRFD تدوین شود. از آن جا که ویرایش جدید نسخه LRFD آئین نامه API RP 2A فعلاً منتشر نشده است، نتایج به دست آمده از پژوهش انجام شده در مقاله حاضر می تواند برای طراحی این نوع سازه ها با لحاظ نمودن عدم قطعیت های موجود مفید واقع شود.



شکل ۲- نمونه ای از اتصال مهاربندهای افقی و مورب به پایه جکت در یک اتصال لوله ای (API RP 2A، ۲۰۰۷)

Bai و همکاران (۲۰۱۶) قابلیت اعتماد وابسته به زمان سکوهای فراساحلی جکتی را ارزیابی نمودند. هزارجریبی و همکاران (۲۰۱۳) تحلیل حساسیتی روی سکوهای فراساحلی شابلونی تحت اثر امواج حدی انجام دادند. Karimi و همکاران (۲۰۱۷) حساسیت و قابلیت اعتماد مقاومت سکوی جکتی فاز ۲۰ پارس جنوبی را در برابر آسیب های وارده به اعضا به روش پوش آور^۸ مورد مطالعه قرار دادند.

در پژوهش حاضر، قابلیت اعتماد اعضای لوله ای تشکیل دهنده مهاربندهای افقی یک سازه جکت، در برابر گسیختگی ناشی از اعمال تنش بیش از حد مجاز، ارزیابی می شود. به منظور تعریف شرایط گسیختگی، روابطی که توسط ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز (WSD) آئین نامه API RP 2A (۲۰۰۷) برای کنترل مقاومت اعضای لوله ای تحت ترکیب نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی پیشنهاد شده است، ملاک عمل قرار می گیرد. در این مطالعه، پارامترهای تأثیرگذار روی مقاومت عضو و همچنین نیروهای داخلی به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و توابع احتمال حاکم بر این نیروها شامل نیروی محوری فشاری و لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه، برای یک سکوی جکتی تپ در شرایط دریایی خلیج فارس استخراج می گردد. برای

8. Push-over
9. Load and resistance factored design

در رابطه فوق، P نیروی محوری فشاری بوده و M_x و M_y به ترتیب لنگرهای خمشی حول دو محور متعامد x و y هستند. D قطر عضو لوله‌ای، A مساحت مقطع عضو لوله‌ای و I ممان اینرسی مقطع است که به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} ; I = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D-2t}{2} \right)^4 \right] \quad (3)$$

در رابطه فوق، t ضخامت جدار عضو لوله‌ای است. در رابطه (۱)، F_a تنش مجاز تحت بار محوری فشاری است که با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{5/3 + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} \text{ for } Kl/r < C_c \quad (4)$$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} \text{ for } Kl/r \geq C_c$$

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{F_y} \right)^{1/2} \quad (5)$$

در روابط فوق، E و F_y به ترتیب مدول الاستیسیته و تنش تسلیم فولاد هستند. l طول مهار نشده، K ضریب طول مؤثر و r شعاع ژیراسیون مقطع عرضی عضو است که برابر است با:

$$r = \sqrt{I/A} \quad (6)$$

مقدار ضریب طول مؤثر (K) در رابطه (۴) را می‌توان با استفاده از جدول بخش 3.3.1.d ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آئین‌نامه API RP 2A (۲۰۰۷) تعیین کرد. لازم به ذکر است که رابطه (۱) به شرط $f_a/F_a \leq 0.15$ معتبر است. ضمناً اگر نسبت D/t بزرگتر از ۶۰ باشد، در روابط (۴) و (۵) بایستی با تنش کمانش حلقوی بحرانی جایگزین شود. نحوه تعیین تنش کمانش حلقوی بحرانی در بخش 3.3.2.b ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آئین‌نامه API RP 2A (۲۰۰۷) تشریح شده است. در رابطه (۱)، F_b تنش مجاز خمشی است که از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$F_b = 0.75F_y \quad \text{for } \frac{D}{t} \leq \frac{10340}{F_y}$$

$$F_b = \left[0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{for } \frac{10340}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{20680}{F_y} \quad (7)$$

$$F_b = \left[0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{for } \frac{20680}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300$$

در رابطه فوق، مقادیر تمامی پارامترها بایستی بر حسب واحدهای SI درج شود.

۲- مبانی واسنجی (کالیبراسیون) بر اساس قابلیت اعتماد

یکی از عملکردهای مهم تحلیل قابلیت اعتماد سازه، کالیبره کردن ضرایب اطمینان در طراحی برای دستیابی به یک سطح ایمنی پایدار است. در این رویکرد، ضرایب اطمینان به گونه‌ای تعیین می‌شوند که احتمال گسیختگی برای سطوح مختلف به سطح قابلیت اعتماد هدف محدود گردد. این سطح هدف می‌تواند بسیاری از عدم قطعیت‌هایی که در طول طراحی لحاظ نشده‌اند را پوشش دهد. برای کالیبره کردن ضرایب اطمینان بر اساس تحلیل قابلیت اعتماد، هفت گام اساسی وجود دارد (Bai, ۲۰۰۳):

- تشخیص مودهای گسیختگی
- تعیین ضوابط طراحی
- تعریف توابع حالت حدی
- مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها
- تخمین احتمال گسیختگی
- تعیین سطح ایمنی هدف
- کالیبره کردن ضرایب اطمینان

در بحث کالیبره کردن بر اساس قابلیت اعتماد، تعیین تابع حالت حدی و مدل‌سازی عدم قطعیت از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در این پژوهش، ابتدا ضوابط طراحی برای ارزیابی مقاومت اعضای لوله‌ای بر مبنای ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آئین‌نامه API RP 2A (۲۰۰۷) ارائه می‌گردند. سپس تابع حالت حدی برای مود گسیختگی مورد نظر فرمول‌بندی می‌شود و پارامترهایی که در تابع حالت حدی ظاهر شده‌اند به‌عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و تمامی عدم قطعیت‌ها به صورت احتمالاتی مدل‌سازی می‌شوند. مقصود از مدل‌سازی احتمالاتی این است که اولاً یک تابع توزیع احتمال متناسب به متغیر تصادفی مورد نظر برازش شود و ثانیاً شاخص‌های آماری شامل میانگین و انحراف معیار برای این متغیر تصادفی برآورد گردد.

۳- ضوابط طراحی اعضای لوله‌ای در سازه جکت

ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آئین‌نامه API RP 2A (۲۰۰۷) رابطه زیر را برای کنترل مقاومت اعضای لوله‌ای، تحت ترکیب نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی ارائه داده است:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (1)$$

در رابطه فوق، f_a تنش موجود ناشی از نیروی محوری فشاری بوده و f_{bx} و f_{by} به ترتیب تنش‌های موجود ناشی از لنگرهای خمشی حول دو محور متعامد x و y هستند:

$$f_a = \frac{P}{A} ; f_{bx} = \frac{M_x D}{2I} ; f_{by} = \frac{M_y D}{2I} \quad (2)$$

$$P_f = \Pr[g(X, Y) < 0] \quad (9)$$

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

$$P_f = \Pr[g(X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_m) < 0] \\ = \int_{-\infty}^0 f_g(g) dg = \int \int_{g(X, Y) < 0} f_{R, S}(r, s) dr ds \quad (10)$$

که $f_g(g)$ تابع چگالی احتمال تابع حالت حدی بوده و $f_{R, S}(r, s)$ تابع چگالی احتمال توأم R و S است.

حل انتگرال رابطه (۱۰)، 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^{۱۳} بدین‌گونه بیان می‌گردد:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (11)$$

μ_g میانگین تابع حالت حدی بوده و σ_g انحراف معیار تابع حالت حدی را نشان می‌دهد. β که یک پارامتر بی‌بعد است، به عنوان معیاری برای میزان قابلیت اعتماد در نظر گرفته می‌شود. اگر تابع حالت حدی، تک‌بعدی باشد ($g(X, Y) = g(X)$)، پارامتر β می‌تواند به عنوان معیاری برای فاصله حاشیه اطمینان میانگین^{۱۴} از رویه گسیختگی در نظر گرفته شود. در واقع، ایده تعریف β این است که فاصله موقعیت نقطه میانگین (μ_g) از رویه گسیختگی ($g = 0$) می‌تواند شاخصی برای میزان قابلیت اعتماد باشد. چرا که هرچه این فاصله بیشتر باشد، مساحت کوچکتری از تابع چگالی احتمال $g(X)$ در قسمت منفی g قرار گرفته و در نتیجه احتمال گسیختگی (P_f) کوچک‌تر خواهد بود (شکل (۳)). 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

۴- تحلیل قابلیت اعتماد

به کمک تحلیل قابلیت اعتماد 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 و به فضای احتمالاتی وارد می‌شود که در آن هر پارامتر، یک متغیر تصادفی بوده و با یک تابع چگالی احتمال (PDF) مشخص می‌گردد. تئوری قابلیت اعتماد، احتمال گسیختگی^{۱۵} سازه را، با تعیین این که آیا از حالت حدی^{۱۱} متناظر تخطی شده یا خیر، ارزیابی می‌کند. در واقع، تابع حالت حدی (LSF)^{۱۲} ناحیه ایمن و ناحیه گسیختگی را از هم تفکیک می‌کند.

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:

$$g(X, Y) = R(X) - S(Y) \quad (8)$$

توجه شود که مقاومت و بار وارده مثال‌هایی برای یک مفهوم کلی‌تر هستند. مثلاً R می‌تواند تغییر شکل مجاز و S تغییر شکل موجود باشد. در هر صورت، R و S توابعی از متغیرهای تصادفی مختلف X و Y هستند، که هر کدام بر اساس توابع چگالی احتمالشان، مشخص می‌شوند. در واقع X و Y می‌توانند به صورت برداری از متغیرهای تصادفی مختلف معرفی شوند.

در حالت کلی، در هر مسئله مهندسی، تعدادی متغیر تصادفی وارد عمل می‌شوند. مثلاً در مسائل سازه‌ای، مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، مشخصات هندسی نظیر طول و سطح مقطع، و بارهای وارده می‌توانند متغیرهای مسئله باشند. در این صورت، تابع حالت حدی برحسب تمامی متغیرهای تصادفی 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 (۸)، 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 نامیده می‌شود.

با توجه به توضیحات ارائه شده، احتمال گسیختگی برابر است با:

13. Reliability index
14. Mean margin of safety

10. Failure probability
11. Limit state
12. Limit-state function

به رابطه (۱) و توضیحات بخش (۳)، تابع حالت حدی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$g = 1 - \frac{f_a}{F_a} - \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \quad (12)$$

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 اعضای لوله‌ای وجود دارد، تحلیل احتمالاتی این اعضا با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های دخیل در طراحی، می‌تواند حاوی نتایج مفیدی باشد.

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.

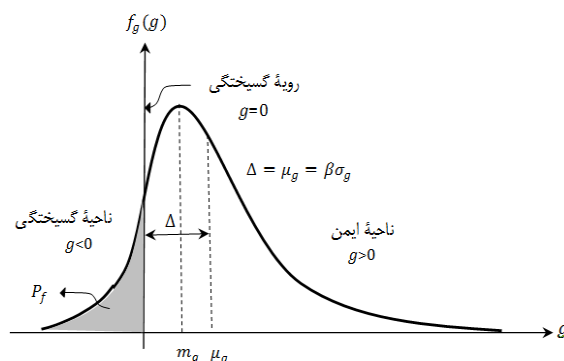
برای لحاظ نمودن عدم قطعیت در تنش تسلیم فولاد، یک توزیع لاگ‌نرمال^{۲۵} با ضریب تغییرات^{۲۶} ۰/۰۵۷ و بایاس میانگین^{۲۷} ۱/۱۲۷ در نظر گرفته می‌شود (Nizamani, ۲۰۱۵). مقدار بایاس میانگین به شکل نسبت میانگین مشاهداتی به میانگین محاسباتی تعریف می‌شود (ایزدپرست، ۱۳۸۴). خصوصیات عدم قطعیت مربوط به مشخصات هندسی عضو لوله‌ای شامل قطر (D)، ضخامت جدار (t)، طول (l) و ضریب طول مؤثر (K) در جدول (۱) ارائه شده است. خصوصیات عدم قطعیت مربوط به مقاومت محاسبه شده برای عضو لوله‌ای تحت ترکیب تنش‌های مختلف طبق نسخه تنش مجاز آیین‌نامه API RP 2A (۲۰۰۷) در جدول (۲) ارائه شده است (ایزدپرست، ۱۳۸۴).

مهم‌ترین منبع عدم قطعیت در طراحی اعضای لوله‌ای مربوط به متغیر بار است. به دلیل عدم شناخت کامل شرایط محیطی

(FORM)^{۱۵} و مرتبه دوم (SORM)^{۱۶} خواهد شد. راه حل دوم این است که از روش‌های نمونه‌برداری^{۱۷} نظیر روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)^{۱۸} استفاده شود. متداول‌ترین روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد را می‌توان به شکل زیر خلاصه نمود:

- ۱- روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM):
 - ۱-۱- روش گشتاور دوم مرتبه اول مقدار میانگین (MVFOSM)^{۱۹}
 - ۲-۱- روش هاسوفر لیند (HL)^{۲۰}
 - ۳-۱- روش هاسوفر لیند - رکویتر فیسلر (HL-RF)^{۲۱}
- ۲- روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه دوم (SORM):
 - ۱-۲- رابطه Breitung
 - ۲-۲- رابطه Tvedt
- ۳- روش‌های نمونه‌برداری:
 - ۱-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) خام یا مستقیم^{۲۲}
 - ۲-۳- نمونه‌برداری بر مبنای اهمیت (IS)^{۲۳}
 - ۳-۳- نمونه‌برداری LHS^{۲۴}

برای آشنایی با جزئیات تحلیل به این روش‌ها می‌توان به عنوان نمونه به Choi و همکاران (۲۰۰۷)، Collins و Nowak (۲۰۰۰) و Lemaire (۲۰۰۹) مراجعه نمود.



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

۵- فرمول‌بندی تابع حالت حدی و مدل‌سازی عدم قطعیت در این پژوهش، تجاوز تنش‌های ناشی از ترکیب نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی وارد بر عضو لوله‌ای، از ظرفیت مجاز آن به عنوان معیار گسیختگی در نظر گرفته شده است. لذا با توجه

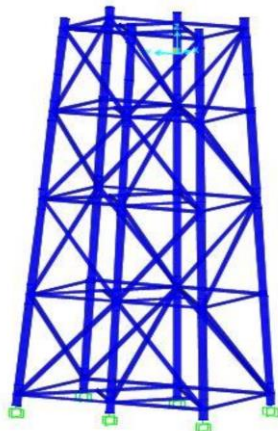
22. Crude or direct MCS
 23. Importance sampling
 24. Latin hypercube sampling
 25. Lognormal distribution
 26. Coefficient of variations
 27. Mean bias

15. First-order reliability method
 16. Second-order reliability method
 17. Sampling methods
 18. Monte Carlo simulation
 19. Mean-value first-order second-moment
 20. Hasofer Lind
 21. Hasofer Lind-Rackwitz FieSSLer

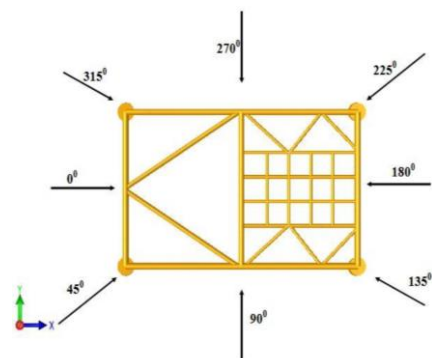
سپس نیروهای داخلی اعضای لوله‌ای جکت شامل نیروی محوری و لنگر خمشی تعیین شده و از طریق تحلیل احتمالاتی، مقادیر شاخص‌های آماری متغیرها و توابع توزیع احتمال حاکم بر آن‌ها تعیین گردیده است. مشخصات سکوی مدل‌سازی شده برگرفته از اطلاعات سکوی SPD1 در خلیج فارس است که در حوزه گازی پارس جنوبی در عمق ۷۰/۷ متری (نسبت به LAT) نصب شده است. زیرسازه (جکت) این سکو ۷۸/۶ متر ارتفاع داشته و برای شرایط دریایی ۱۰۰ ساله و برخورد امواج از هشت جهت، طراحی گردیده است (شکل‌های (۴) و (۵)).

در جداول (۴) و (۵)، شرایط دریایی ۱۰۰ ساله برای هشت جهت مورد بررسی ارائه شده است. ضریب سینماتیک موج 2^8 برابر با ۰/۹۵ و ضریب انسداد جریان 2^9 ۰/۸۵ در نظر گرفته شد. ضریب درگ برای سطوح صاف و زبر به ترتیب ۰/۶۵ و ۱/۰۵ انتخاب گردید و ضریب اینرسی نیز برای برای سطوح صاف و زبر به ترتیب ۱/۶ و ۱/۲ لحاظ شد.

مدول یانگ و مدول برشی فولاد به ترتیب ۲۰۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلونیوتن بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده و چگالی فولاد ۷/۸۴۹ تن بر متر مکعب لحاظ شد.



شکل ۴- مدل سکوی SPD1 در نرم‌افزار SAP2000



شکل ۵- هشت جهت برخورد موج به سازه

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) و سرعت جریان (V)، توزیع احتمال Weibull با مشخصات داده شده در جدول (۳) مناسب است.

در این پژوهش، به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در بارگذاری سازه، یک سکوی جکتی با مشخصات متداول (تیپ) توسط نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و تحت شرایط بارگذاری طراحی منطقه خلیج فارس تحلیل گردیده است. جزئیات نحوه مدل‌سازی سازه توسط سمیعی زنونیان (۱۳۹۵) تشریح شده است.

جدول ۱- عدم قطعیت هندسی عضو لوله‌ای (ایزدپرست، ۱۳۸۴)

متغیر تصادفی	تابع احتمال	بایاس میانگین	ضریب تغییرات	انحراف معیار
قطر	نرمال	۱	۰/۰۰۲۵	-
ضخامت جدار	نرمال	۱	۰/۲۵۴±۰/۰۰۴	-
طول	نرمال	۱	۰/۰۰۲۵	-
ضریب طول مؤثر	نرمال	۱/۱	-	۰/۰۹۳۵

جدول ۲- عدم قطعیت مقاومت عضو لوله‌ای (ایزدپرست، ۱۳۸۴)

ترکیب تنش	تابع احتمال	بایاس میانگین	ضریب تغییرات
کشش محوری و خمش	لاگ‌نرمال	۱/۰۹۳	۰/۰۵۸
فشار محوری (کمانش پایه) و خمش	لاگ‌نرمال	۱/۰۷۵	۰/۰۵۳
فشار محوری (کمانش موضعی) و خمش	لاگ‌نرمال	۱/۲۲۲	۰/۰۶۴
فشار هیدرواستاتیک	لاگ‌نرمال	۰/۹۹	۰/۰۹۵
کشش محوری و فشار هیدرواستاتیک	لاگ‌نرمال	۱/۰۱۸	۰/۱۰۶
فشار محوری و فشار هیدرواستاتیک	لاگ‌نرمال	۱/۰۸۲	۰/۱۰۴

جدول ۳- عدم قطعیت وضعیت دریایی (ایزدپرست، ۱۳۸۴)

متغیر تصادفی	تابع احتمال	بایاس میانگین	ضریب تغییرات	ضریب مقیاس
H_s	Weibull	۰/۷	۰/۳۷	۳/۱۲
V	Weibull	۰/۹۸	۰/۱۶۶	۷/۱

جدول ۴- شرایط امواج ۱۰۰ ساله و باد (سمیعی زنونیان، ۱۳۹۵)

زاویه موج (درجه)	تئوری موج غالب	ارتفاع موج (m)	پریود موج (s)	سرعت باد (m/s)
۰		۶/۳	۸/۳	۲۱/۷
۴۵		۶/۰	۸/۱	۲۲/۲
۹۰		۵/۱	۸/۱	۲۱/۵
۱۳۵	استوکس	۵/۵	۷/۸	۲۲/۰
۱۸۰	مرتبه ۵	۶/۷	۸/۶	۲۲/۷
۲۲۵		۶/۰	۸/۱	۲۲/۰
۲۷۰		۵/۰	۷/۴	۲۰/۴
۳۱۵		۵/۶	۷/۹	۲۰/۶

جدول ۵- شرایط جریان دریایی (سمیعی زنونیان، ۱۳۹۵)

جهت	سرعت	سرعت	سرعت	سرعت
جریان	جریان، ۰/۵ متر بالاتر از بستر (m/s)	جریان، ۱/۰ متر بالاتر از نیم عمق (m/s)	جریان در سطح دریا (m/s)	جریان در تمام جهات
	۰/۶۲	۰/۶۸	۰/۹	۰/۹

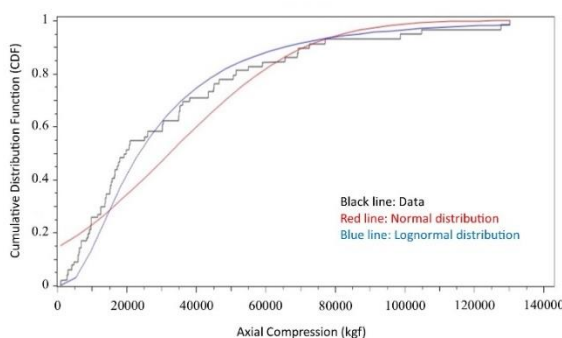
۶- استخراج توابع احتمال حاکم بر نیروهای داخلی و شاخص‌های آماری آن‌ها

با انجام تحلیل استاتیکی، نیروهای داخلی اعضای لوله‌ای استخراج شده است. سپس با تحلیل آماری توسط نرم‌افزار Rt (Mahsuli و Haukaas، ۲۰۱۳) مقادیر شاخص‌های آماری متغیرها و توابع توزیع احتمال حاکم بر آن‌ها تعیین شده است. جزئیات نحوه تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Rt توسط سمیعی زنونیان (۱۳۹۵) تشریح شده است.

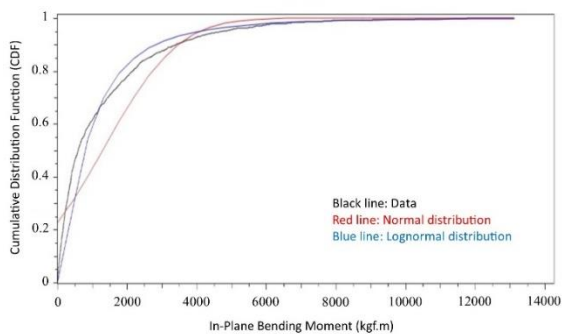
به‌عنوان نمونه، تابع توزیع تجمعی (CDF) برای نیروهای داخلی یکی از مهاربندهای افقی جکت شامل نیروی محوری فشاری، لنگر خمشی داخل صفحه و لنگر خمشی خارج از صفحه در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع توزیع تجمعی مربوط به داده‌های هر سه نوع نیروی داخلی بررسی شده، انطباق مناسبی به توزیع لاگ‌نرمال دارند. مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های آماری این نیروهای داخلی در جداول (۶) تا (۸) آورده شده‌اند. شماره‌های موجود در نام مهاربندها، همان شماره‌هایی هستند که توسط نرم‌افزار SAP2000 به عنوان شماره المان به این اعضا اختصاص داده شده است. عبارت horiz شماره به عنوان مخفف کلمه horizontal نشان‌دهنده این است که مهاربند مورد نظر، افقی بوده است.

جدول ۶- توزیع احتمال حاکم بر نیروی محوری فشاری برای ۱۰ عضو لوله‌ای که مهاربندهای افقی جکت را تشکیل می‌دهند

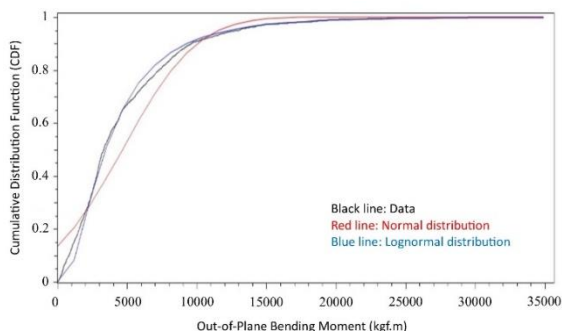
نام مهاربند	تابع احتمال حاکم	میانگین (kgf)	ضریب تغییرات
horiz47	لاگ‌نرمال	۳۲۴۲۳/۷۲	۰/۵۱
horiz48	لاگ‌نرمال	۱۷۶۳۷/۳۸	۰/۴۸
horiz36	لاگ‌نرمال	۱۲۰۲/۴۶	۰/۴۲
horiz38	لاگ‌نرمال	۱۱۸۶/۸۳	۰/۵۱
horiz30	لاگ‌نرمال	۴۸۴۶۰/۹۸	۰/۴۷
horiz27	لاگ‌نرمال	۱۶۷۱۹/۱۵	۰/۴۷
horiz19	لاگ‌نرمال	۱۳۶۳۴/۸۱	۰/۴۲
horiz190	لاگ‌نرمال	۱۱۶۵۰/۳۹	۰/۳۹
horiz9	لاگ‌نرمال	۳۸۹۴/۷۵	۰/۳۷
horiz6	لاگ‌نرمال	۴۸۴۶۰/۹۸	۰/۴۹



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۶- تابع توزیع تجمعی (CDF) نیروهای داخلی برای مهاربند افقی horiz47: (الف) نیروی محوری فشاری، (ب) لنگر خمشی داخل صفحه، (پ) لنگر خمشی خارج از صفحه

جدول ۷- توزیع احتمال حاکم بر لنگر خمشی داخل صفحه برای ۱۰ عضو که مهارندهای افقی جکت را تشکیل می‌دهند

نام مهاربند	تابع احتمال	میانگین (kgf.m)	ضریب تغییرات
horiz47	لاگ‌نرمال	۱۲۹۲/۵۸	۰/۴۲
horiz48	لاگ‌نرمال	۲۱۵۱/۸۸	۰/۴۴
horiz36	لاگ‌نرمال	۴۹۱/۵۱	۰/۳۷
horiz38	لاگ‌نرمال	۲۲۳۹/۱۸	۰/۴۹
horiz30	لاگ‌نرمال	۱۱۱/۲۱	۰/۳۸
horiz27	لاگ‌نرمال	۲۶۸۴/۶۲	۰/۴۹
horiz19	لاگ‌نرمال	۸۱۲/۴۲	۰/۳۶
horiz190	لاگ‌نرمال	۵۳۲/۹۶	۰/۴۱
horiz9	لاگ‌نرمال	۲۶۸۴/۶۲	۰/۴۳
horiz6	لاگ‌نرمال	۲۲۳۹/۱۸	۰/۴۸

جدول ۸- توزیع احتمال لنگر خمشی خارج از صفحه برای ۱۰ عضو لوله‌ای که مهارندهای افقی جکت را تشکیل می‌دهند

نام مهاربند	تابع احتمال	میانگین (kgf.m)	ضریب تغییرات
horiz47	لاگ‌نرمال	۴۶۵۹/۲۹	۰/۳۶
horiz48	لاگ‌نرمال	۲۱۱۱/۶۵	۰/۳۹
horiz36	لاگ‌نرمال	۲۱۱۱/۵۳	۰/۴۱
horiz38	لاگ‌نرمال	۲۱۱۹/۱۷	۰/۴۴
horiz30	لاگ‌نرمال	۴۶۷۰/۰۲	۰/۳۹
horiz27	لاگ‌نرمال	۲۶۳۱/۳۷	۰/۴۵
horiz19	لاگ‌نرمال	۲۷۲۳/۹۶	۰/۳۸
horiz190	لاگ‌نرمال	۱۰۹۳۷/۴۴	۰/۴۹
horiz9	لاگ‌نرمال	۴۶۵۹/۲۹	۰/۴۱
horiz6	لاگ‌نرمال	۱۰۹۳۷/۴۴	۰/۴۵

جدول ۹- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد برای ۱۰ عضو لوله‌ای که مهارندهای افقی جکت را تشکیل می‌دهند

نام مهاربند	MCS		HL-RF (FORM)		MVFOSM	
	P_f	β	P_f	β	P_f	β
horiz47	۰/۰۰۰۰۴۹۸	۳/۸۴۵۸۱	۰/۰۰۰۰۴۴۸	۳/۹۱۲۰۳	-	۸/۴۳۲۹۵
horiz48	۰/۰۰۰۰۱۶۳	۴/۱۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰۱۳۵	۴/۱۹۲۸۶	-	۸/۳۲۷۹۵
horiz36	۰/۰۰۰۰۰۰۸۶۲	۴/۷۷۷۵۷	۰/۰۰۰۰۰۰۷۳۱	۴/۸۱۵۳۲	-	۸/۵۱۳۹۴
horiz38	۰/۰۰۰۰۰۰۸۶۱	۴/۷۸۶۳۲	۰/۰۰۰۰۰۰۷۰۳	۴/۸۲۱۶۷	-	۸/۶۴۲۶۵
horiz30	۰/۰۰۰۰۰۹۸۱	۳/۷۱۸	۰/۰۰۰۰۰۵۵۳	۳/۸۶۴۱۹	-	۸/۳۶۹/۱۱
horiz27	۰/۰۰۰۰۰۴۴۸	۳/۹۱۳۶۸	۰/۰۰۰۰۰۴۵۵	۳/۹۴۲۶۸	-	۸/۰۹۸۷۳
horiz19	۰/۰۰۰۰۰۳۹۹	۳/۹۴۲۸۴	۰/۰۰۰۰۰۳۶۲	۳/۹۵۵۱۲	-	۸/۷۴۳۶۹
horiz190	۰/۰۰۰۰۰۲۸۵	۴/۰۱۸۹۳	۰/۰۰۰۰۰۲۱۳	۴/۰۹۳۶۸	-	۸/۸۱۶۹۱
horiz9	۰/۰۰۰۰۰۹۱۴	۴/۲۸۲۱۷	۰/۰۰۰۰۰۷۹۶	۴/۳۱۵۸۲	-	۷/۹۴۳۹۱
horiz6	۰/۰۰۰۰۲۱۷	۴/۵۱۰۷۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۳/۵۸۵۳۲	-	۸/۵۲۶۴۳

۷- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد به روش‌های مختلف

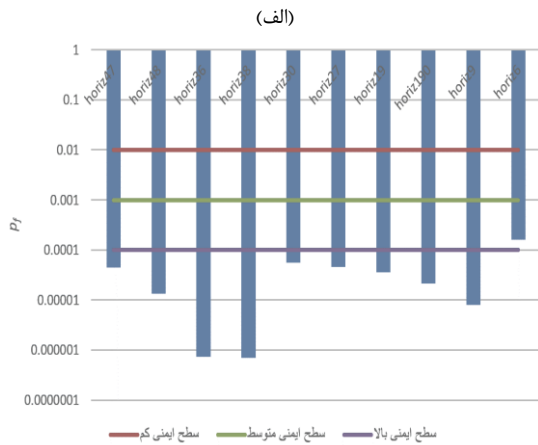
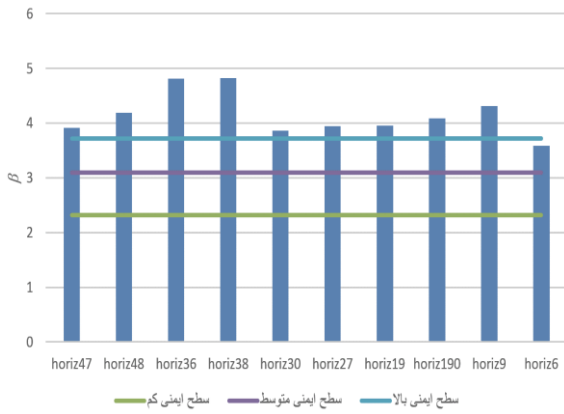
در این بخش، نتایج تحلیل قابلیت اعتماد به روش‌های MVFOSM، HL-RF (FORM) و MCS ارائه شده است (جدول ۹). خروجی‌ها شامل شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی هستند. تعداد نمونه‌گیری‌های مورد استفاده در روش MCS، برابر پانصد هزار انتخاب شد. انتخاب این عدد نیز بر مبنای تست همگرایی صورت گرفت. بدین ترتیب که تعداد نمونه‌گیری‌ها به تدریج افزایش داده شد تا زمانی که نتیجه حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد به روش MCS، با افزایش تعداد نمونه‌ها بدون تغییر باقی بماند و به عبارت دیگر نتیجه حاصله، متأثر از تعداد کم نمونه‌ها نباشد. به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، می‌توان مقایسه‌ای بین نتایج روش‌های HL-RF و MCS انجام داد. با توجه به این که تست همگرایی برای تعیین تعداد مناسب نمونه‌ها در روش MCS انجام شده و نتایج روش HL-RF نیز به نتایج روش MCS نزدیک هستند، می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل قابلیت اعتماد به طور صحیح انجام شده است. ضمناً باید توجه داشت که

روش HL-RF در مقایسه با MCS به زمان تحلیل به مراتب کمتری نیاز دارد. مقادیر به دست آمده برای شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی به روش‌های مختلف برای ۱۰ مهاربند افقی مورد مطالعه در شکل (۷) مقایسه شده‌اند.

شکل (۷) نشان می‌دهد با توجه به این که تابع حالت حدی تعریف شده، غیر خطی بوده و ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی دخیل در این تابع نیز نسبتاً بزرگ هستند، تحلیل MVFOSM که تابع حالت حدی را حول نقطه میانگین خطی‌سازی می‌کند، خطای تخمین قابل توجهی دارد.

۸- کالیبره کردن ضرایب اطمینان

در پژوهش حاضر، ریسک قابل قبول برای کالیبراسیون ضرایب اطمینان، مطابق جدول (۱۰) در نظر گرفته شده است. در شکل (۸)، مقادیر به دست آمده برای شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی به روش HL-RF (FORM) در کنار سطوح ایمنی هدف برای ۱۰ مهاربند افقی مورد مطالعه نشان داده‌اند. مشاهده می‌شود



شکل ۸- مقادیر به دست آمده برای: الف) شاخص قابلیت اعتماد، ب) احتمال گسیختگی به روش HL-RF (FORM) در کنار سطوح ایمنی هدف برای ۱۰ مهاربند افقی مورد مطالعه

حال چنانچه ضرایب R_1 و R_2 که به ترتیب به صورت نسبت F_a/F_y و F_b/F_y تعریف شده‌اند، به جای مقادیر ثابتی که توسط ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آئین‌نامه API RP 2A (۲۰۰۷) داده شده است، به شکل تابعی از شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی تعریف شوند، می‌توان ضریب اطمینان متناظر با هر سطح ایمنی هدف دلخواهی را تعیین نمود. یادآوری می‌شود که طبق تعاریف روش تنش مجاز، ضرایب اطمینان در برابر نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی به ترتیب برابر $1/R_2$ و $1/R_1$ خواهند بود. بدین منظور، ابتدا مقادیر مختلفی برای ضرایب R_1 و R_2 فرض شده و با انجام تحلیل به روش HL-RF، شاخص قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی در هر حالت محاسبه گردید. سپس با انجام تحلیل رگرسیون غیر خطی روی داده‌های حاصله، روابط زیر بین ضرایب R_1 و R_2 و مقادیر شاخص قابلیت اعتماد (β) و احتمال گسیختگی (P_f) به دست آمد:

$$\beta = 1.8851R_1^2 - 5.4147R_2 + 8.1072 \quad (14)$$

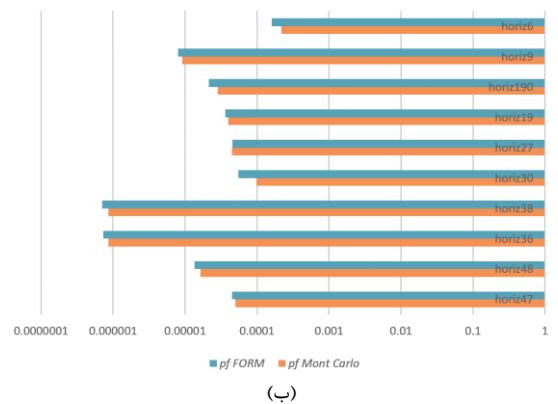
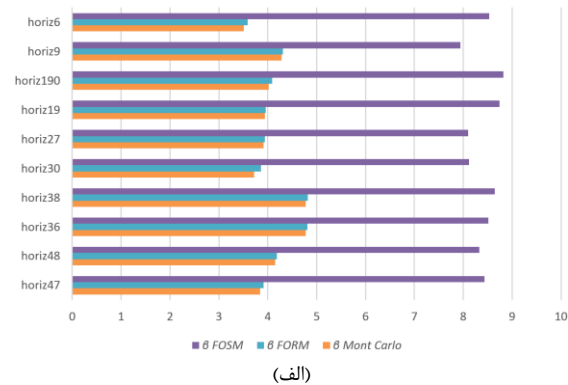
که فقط یک مهاربند افقی از سطح ایمنی بالایی برخوردار نیست. با این حال، تمامی مهاربندهای افقی شرایط سطح ایمنی متوسط را دارا هستند.

در طراحی به روش تنش مجاز، مقادیر تنش‌های مجاز تحت بار محوری فشاری (F_a) و لنگر خمشی (F_b)، در واقع مضاربی از تنش تسلیم فولاد (F_y) هستند که به منظور افزایش ایمنی طرح در برابر عدم قطعیت‌های موجود در بارگذاری و مقاومت، تعریف می‌شوند. لذا با توجه به رابطه (۱۲) می‌توان نوشت:

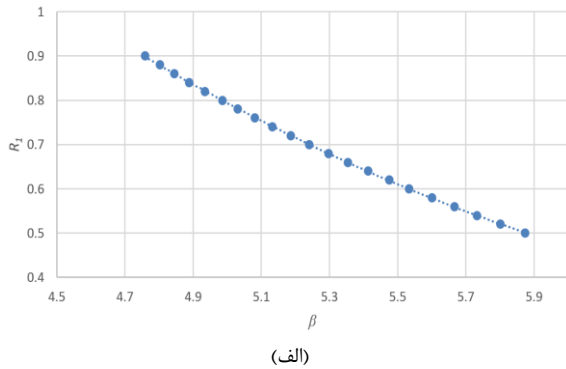
$$g = 1 - \frac{f_a}{R_1 F_y} - \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{R_2 F_y} \quad (13)$$

جدول ۱۰- سطوح ایمنی هدف برای کالیبره کردن ضرایب اطمینان (Bai, ۲۰۰۳)

ایمنی	احتمال گسیختگی (P_f) هدف	شاخص قابلیت اعتماد (β)
پایین	10^{-2}	۲/۳۲
متوسط	10^{-3}	۳/۰۹
بالا	10^{-4}	۳/۷۲



شکل ۷- مقایسه: الف) شاخص قابلیت اعتماد، ب) احتمال گسیختگی ۱۰ مهاربند افقی به روش‌های مختلف

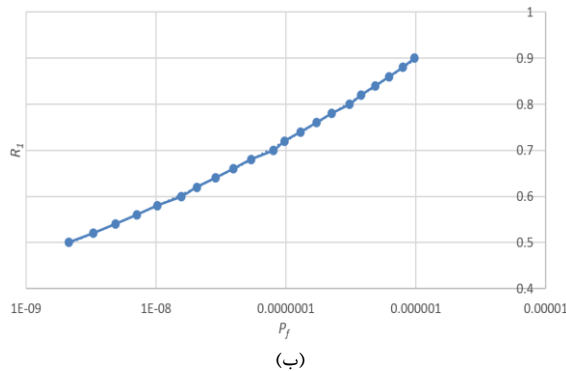


$$R_1 = 0.087\beta^2 - 1.2804\beta + 5.0218 \quad (15)$$

$$P_f = 0.000003R_1^{10.418} \quad (16)$$

$$R_1 = 3.3857P_f^{0.096} \quad (17)$$

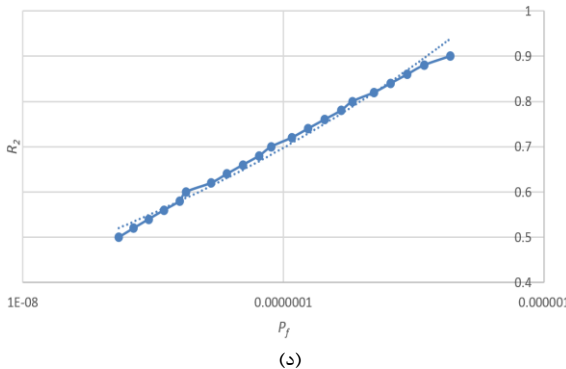
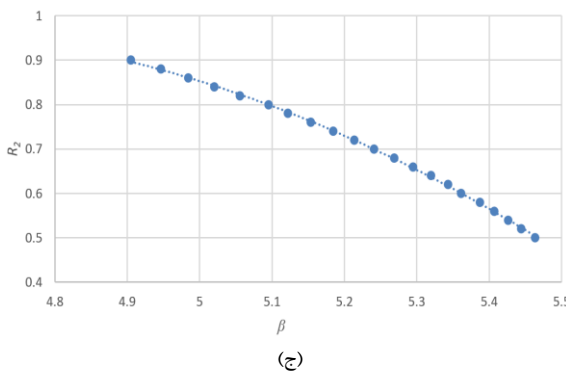
$$\beta = -1.4365R_2^2 + 0.6296R_2 + 5.505 \quad (18)$$



$$R_2 = -0.5274\beta^2 + 4.7658\beta - 9.7909 \quad (19)$$

$$P_f = 0.0000006R_2^{4.9082} \quad (20)$$

$$R_2 = 17.859P_f^{0.2013} \quad (21)$$



مقادیر به دست آمده برای ضریب تعیین (R^2) با تقریب دو رقم اعشار برای روابط (۱۴) تا (۱۹) برابر ۰/۹۹ و برای روابط (۲۰) و (۲۱) برابر ۰/۹۸ بود که نشان دهنده خطای بسیار کم در تخمین حاصل از رگرسیون است.

در شکل (۹) نمونه‌هایی از ارتباط بین ضرایب R_1 و R_2 با مقادیر β و P_f ارائه شده است که به ترتیب مبتنی بر روابط (۱۵)، (۱۷)، (۱۹) و (۲۱) هستند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش شاخص قابلیت اعتماد هدف، R_1 و R_2 کاهش یافته و در نتیجه ضرایب اطمینان متناظر با بار محوری فشاری و لنگر خمشی افزایش خواهند یافت. ضمناً مشاهده می‌شود که با افزایش احتمال گسیختگی هدف، مقادیر R_1 و R_2 افزایش یافته و در نتیجه مقادیر ضرایب اطمینان متناظر با بار محوری فشاری و لنگر خمشی کاهش می‌یابند. شاخص قابلیت اعتماد هدف و متعاقباً احتمال گسیختگی مورد قبول، تا حدود زیادی بر مبنای عواقب گسیختگی و هزینه قابل صرف برای تأمین ایمنی سازه انتخاب می‌شوند. واضح است که افزایش شاخص قابلیت اعتماد هدف و کاهش احتمال گسیختگی، منجر به انتخاب ضرایب اطمینان بزرگ‌تر می‌شود که متعاقباً افزایش هزینه پروژه را به دنبال خواهد داشت. جهت مشاهده مقادیر پیشنهادی به منظور تأمین سطح ایمنی متوسط و بالا می‌توان به عنوان مثال به Bai (۲۰۰۳) مراجعه نمود.

شکل ۹- ارتباط بین ضرایب R_1 و R_2 با مقادیر β و P_f بر مبنای: (الف) رابطه (۱۵)، (ب) رابطه (۱۷)، (ج) رابطه (۱۹)، (د) رابطه (۲۱)

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، قابلیت اعتماد اعضای لوله‌ای تشکیل‌دهنده مهاربندهای افقی یک سازه جکت، در برابر گسیختگی ناشی از اعمال تنش بیش از حد مجاز، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعریف

- Choi SK, Grandhi RV, Canfield RA, "Reliability-based structural design", Springer-Verlag, UK, 2007.
- Birkinshaw M, Smith D, "The setting of target safety levels for the assessment of offshore structures", The 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, LA, California, US, 26-31 May, 1996.
- Frieze P, "Some implications for offshore design code development of loading strength and reliability modeling", International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1989.
- Halil K, Vrouwenvelder T, "Reliability-based optimisation of offshore jacket-type structures with an integrated-algorithms system", Ships and Offshore Structures, 2010, 5, 67-74.
- Hezarjaribi M, Bahaari MR, Bagheri V, Ebrahimian H, "Sensitivity analysis of jacket-type offshore platforms under extreme waves", Journal of Constructional Steel Research, 2013, 83, 147-155.
- Karimi HR, Karamzadeh NS, Golami EODR, "Effect of elevational and member damage on jacket strength: sensitivity and reliability review of South Pars Phase-20 jacket using push-over analysis", Ocean Engineering, 2017, 143, 209-216.
- Kiureghian AD, Ke J, "The stochastic finite element method in structural reliability", Structural Safety, 1998, 12, 417-426.
- Pillai T, Parasad A, "Fatigue reliability analysis in time domain for inspection strategy of fixed offshore structures", Ocean Engineering, 2000, 27, 167-186.
- Lemaire M, "Structural reliability", John Wiley & Sons Inc., US, 2009.
- Mahsuli M, Haukaas T, "Computer program for multimodel reliability and optimization analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, 2013, 27, 87-98.
- Manuel L, Schmucker DG, Cornell CA, "A reliability-based design format for jacket platforms under wave loads", Marine Structures, 1998, 11, 413-428.
- Nizamani Z, "Environmental load factors and system strength evaluation of offshore jacket platforms", Springer, 2015.
- Nordal H, "Application of ultimate strength analysis in design of offshore structures system", Proceedings of the Conference on Integrity of Offshore structures, Glasgow, 1991.
- Nowak AS, Collins KR, "Reliability of structures", McGraw-Hill Inc., US, 2000.
- Sørensen JD, Engelund S, "Stochastic finite elements in reliability-based structural optimization", The 1st World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Germany, 1995.
- Waarts P, Vrouwenvelder T, "Structural reliability using the finite element method", Asranet Conference, 2002.
- شرایط گسیختگی، روابط ویرایش ۲۱ نسخه تنش مجاز آئین‌نامه API RP 2A برای کنترل مقاومت اعضای لوله‌ای تحت ترکیب نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی، ملاک عمل قرار گرفت. در این مطالعه، پارامترهای تأثیرگذار روی مقاومت عضو و همچنین نیروهای داخلی به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و توابع احتمال حاکم بر نیروهای داخلی شامل نیروی محوری فشاری و لنگرهای خمشی داخل و خارج صفحه، برای یک سکوی جک‌تیپ در شرایط دریایی خلیج فارس استخراج گردید.
- برای مدل‌سازی بارهای محیطی از اطلاعات مربوط به وضعیت دریایی منطقه پارس جنوبی استفاده شد و نتایج روش‌های مختلف تحلیل قابلیت اعتماد شامل MVFOSM، HL-RF و MCS مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت، بر مبنای نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد، روابطی برای تعیین ضرایب اطمینان مناسب در طراحی اعضای لوله‌ای تشکیل‌دهنده مهاربندهای افقی یک سازه جک‌ت، برحسب شاخص قابلیت اعتماد هدف و احتمال گسیختگی هدف پیشنهاد شد.
- ۱۰- مراجع**
- ایزدپرست ا، "طراحی سکوه‌های شابلونی تحت اثر بارگذاری‌های دریا به روش قابلیت اعتماد و سطوح عملکردی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.
- سمیعی زنونزبان م، "تعیین ضرایب اطمینان در طراحی اعضای لوله‌ای سکوه‌های شابلونی بر مبنای تحلیل قابلیت اعتماد"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵.
- Ahmadi H, Lotfollahi-Yaghin MA, "A probability distribution model for stress concentration factors in multi-planar tubular DKT-joints of steel offshore structures", Applied Ocean Research, 2012, 34, 21-32.
- Ahmadi H, Lotfollahi-Yaghin MA, "Effect of SCFs on S-N based fatigue reliability of multi-planar tubular DKT-joints of offshore jacket-type structures", Ships and Offshore Structures, 2013, 8 (1), 55-72.
- American Petroleum Institute (API), "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-load and resistance factor design: RP2A-LRFD", 1st Edition, Supplement 1, Washington DC, US, 1997.
- American Petroleum Institute (API), "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms- working stress design: RP2A-WSD", 21st Edition, Errata and Supplement 3, Washington DC, US, 2007.
- Bai Y, Yan HB, Cao Y, Kim Y, Yang YY, Jiang H, "Time-dependent reliability assessment of offshore jacket platforms", Ships and Offshore Structures, 2016, 11 (6), 591-602.
- Bai Y, "Marine structural design", Elsevier, 2003.

EXTENDED ABSTRACT

Reliability Analysis Based Safety Factors for Designing the Tubular Members of Horizontal Braces in Offshore Jacket Structures

Hamid Ahmadi*, Majid Samiee-Zonoozian, Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 30 June 2019; Accepted: 12 January 2020

Keywords:

Jacket-type platform, Safety factor, Tubular member, Horizontal brace, Reliability analysis.

1. Introduction

In the present paper, the reliability of tubular members used in the horizontal braces of an offshore jacket structure against the failure induced by the presence of stresses higher than the allowable values is evaluated. In order to define the failure criteria, equations proposed by the 21th edition of API RP 2A-WSD (2007) for the design of tubular members under the combined axial pressure and bending are used. In this study, internal forces of the tubular members and the parameters involved in the member strength are considered as random variables and the probability distribution functions governing these forces including the axial compressive force and in-plane and out-of-plane bending moments are derived for a typical jacket-type platform installed in the Persian Gulf. For the modeling of environmental loads, information available on the sea states in the South Pars region has been used and the results of three different methods of reliability analysis including MVFOSM, HL-RF, and MCS are compared. Finally, based on the results of reliability analysis, a set of equations are proposed for the determination of suitable safety factors for designing the tubular members in horizontal braces of a jacket structure as a function of target reliability index and target failure probability.

2. Development of the limit-state function

Based on the 21st edition of API RP 2A-WSD (2007), following equation should be used to check the static strength of a tubular member subjected to the combination of compressive force and flexural moment:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (1)$$

in which, f_a and f_b are nominal axial and bending stresses, respectively; and F_a and F_b are corresponding allowable stresses.

The limit-state function (g) for the reliability analysis of the tubular member was then developed based on Eq. (1) as follows:

$$g = 1 - \frac{f_a}{F_a} - \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \quad (2)$$

Since in working stress design (WSD) method, allowable stresses are defined as a function of yield stress (F_y), Eq. (2) can be rewritten as follows in order to take the loading and strength uncertainties into account:

* Corresponding Author

$$g = 1 - \frac{f_a}{R_1 F_y} - \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{R_2 F_y} \quad (3)$$

in which, R_1 and R_2 are usage factors defined as F_a/F_y and F_b/F_y , respectively. Safety factors for compressive force and bending moment are thus $1/R_1$ and $1/R_2$, respectively.

3. Proposing reliability-based safety factors

In API RP 2A-WSD (2007), R_1 and R_2 are calculated based on deterministic inputs. Hence, the safety factors are fixed values. In the present research, the usage factors are formulated as a function of the reliability index (β) and the probability of failure (P_f). Consequently, the safety factors can be calculated as a function of target level of safety.

After performing a large number of reliability analyses using *Rt* software (Mahsuli and Haukaas, 2013), on the data extracted from FE analyses performed by SAP2000 on a typical jacket structure, values of the reliability index (β) and the probability of failure (P_f) were calculated considering the loading and strength uncertainties. Afterwards, a set of nonlinear regression analyses was performed to develop the design equations as follows:

$$\beta = 1.8851R_1^2 - 5.4147R_1 + 8.1072 \quad (4)$$

$$R_1 = 0.087\beta^2 - 1.2804\beta + 5.0218 \quad (5)$$

$$P_f = 0.000003R_1^{10.418} \quad (6)$$

$$R_1 = 3.3857P_f^{0.096} \quad (7)$$

$$\beta = -1.4365R_2^2 + 0.6296R_2 + 5.505 \quad (8)$$

$$R_2 = -0.5274\beta^2 + 4.7658\beta - 9.7909 \quad (9)$$

$$P_f = 0.0000006R_2^{4.9082} \quad (10)$$

$$R_2 = 17.859P_f^{0.2013} \quad (11)$$

Values obtained for the coefficient of determination are 0.99 for Eqs. (4)-(9) and 0.98 for Eqs. (10) and (11) indicating the quite acceptable accuracy of the fit.

4. Conclusions

In the present research, based on the results of reliability analysis, a set of equations was proposed for the determination of suitable safety factors for designing the tubular members in horizontal braces of a jacket structure as a function of target reliability index and target failure probability.

5. References

- American Petroleum Institute (API), "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: RP2A-WSD", 21st Edition, Errata and Supplement 3, Washington DC, US, 2007.
- Mahsuli M, Haukaas T, "Computer program for multimodel reliability and optimization analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, 2013, 27, 87-98.