

تأثیر فاکتور شدت تنش در قابلیت اعتماد اتصالات لوله‌ای سکوه‌های دریایی در معرض خستگی

علیرضا مصنیبی
دانشجوی دوره دکترا

علی اکبر آقاکوچک
استادیار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این مقاله پس از مروری خلاصه بر تئوری‌های متداول آنالیز قابلیت اعتماد، تأثیر فاکتور شدت تنش (S.I.F) در قابلیت اعتماد اتصالات لوله‌ای سکوه‌های دریایی در معرض خستگی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در آنالیزهای قابلیت اعتماد، تاکنون اغلب این فاکتور با استفاده از ضریبی با مقدار ثابت مدل شده است. در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای برای تعیین این فاکتور به صورت متعین (deterministic) صورت گرفته است که نتایج این تحقیقات وابستگی فاکتور مذکور را به مشخصات هندسی اتصال و ترک و بارگذاری به صورت پارامتریک بیان می‌کند. با وجود چنین فرمول‌هایی، آنالیز قابلیت اعتماد را می‌توان به صورت مطمئن‌تر و دقیق‌تری نسبت به گذشته انجام داد. در این مقاله چند سری از فرمول‌های پارامتریک به دست آمده از نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود و آزمایش‌های تجربی در آنالیز قابلیت اعتماد اتصال مورد استفاده قرار گرفته است. این مطالعات حاکی از تأثیر شدید این پارامتر بر نتایج آنالیز قابلیت اعتماد می‌باشد.

The Effect of Stress Intensity Factor on Reliability of Tubular Joints of Offshore Structures Subjected to Fatigue

A. A. Aghakouchak
Assistan Professor

A. R. Mosayyebi
Ph.D Candidate

Civil Eng. Dept. Tarbiat Modarres Univ.

Abstract

In this paper the effect of stress intensity factor (SIF) on reliability of tubular joints of offshore structures subjected to fatigue is investigated. To date in this type of analysis this factor has been modeled using a constant coefficient. A large amount of research in recent years has been carried out to evaluate the SIF's deterministically. The results have been presented as parametric formulae expressing this factor as a function of the geometry of connection and crack as well as loading characteristics. Using these formulae the reliability analysis may be carried out much more accurately. In this paper a number of such parametric formulae derived based on experimental or finite element analysis have been used. The results show the significant effect of SIF on reliability indices.

به عبارت دیگر علیرغم آن که برخی اوقات پس از گذشت مدتی از عمر سکو لازم است مشخص شود، بارهای وارده چقدر در سازه تخریب ایجاد کرده است، با وجود این تنها عامل قابل اندازه‌گیری که ابعاد ترک‌های به وجود آمده ناشی از خستگی است در رابطه فوق مستقیماً دخالت داده نشده است.

ب - روش استفاده از تئوری‌های مکانیک شکست

در این روش براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، روابط تجربی بین اندازه ترک ناشی از خستگی و تعداد سیکل‌های بارگذاری و دامنه تنش اعمالی برآزش داده می‌شود. در حالت کلی این رابطه به فرم:

$$da/dN = F [a, S, C, m, \theta] \quad (2)$$

است در این رابطه a اندازه ترک و S دامنه تنش اعمالی، C و m پارامترهای مربوط به خواص مصالح و θ شامل تمامی پارامترهای دیگر نظیر اثرات خوردگی، شرایط هندسی و مرزی، اثرات درجه حرارت و غیره می‌باشد. یکی از روابط تجربی که مورد استفاده فراوانی پیدا کرده است، رابطه Paris-Erdogan [۱] است که توسط رابطه

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

بیان می‌گردد. البته نتایج آزمایش‌ها، پراکندگی‌های زیادی را در پارامترهای C ، m نشان داده است. مزیت این روش در این است که با اندازه‌گیری‌های ترک‌های ناشی از خستگی می‌توان برنامه ریزی بهینه‌ای برای زمان‌های بازرسی و ترمیم و مرمت سازه انجام داد. در رابطه فوق ΔK تغییرات فاکتور شدت تنش است. فاکتور شدت تنش تابعی از اندازه ترک، تنش دور دست، هندسه سازه و شرایط مرزی می‌باشد. از آنجا که ترک در اتصالات لوله‌ای، ترکی سطحی به فرم تقریباً نیمه بیضوی است، تعیین فاکتور شدت تنش به صورت تحلیلی دارای پیچیدگی‌های خاصی است. از این رو در سال‌های اخیر مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی و یا نیمه تجربی برای تعیین این فاکتور صورت گرفته است. فاکتور شدت تنش عموماً به صورت:

$$K = Y(a, g) \cdot S \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

سکوه‌های دریایی در اثر بارگذاری نوسانی ناشی از امواج دریا، بارهای بهره‌برداری و سایر بارهای محیطی در معرض خستگی قرار دارند. به دلیل هزینه‌های بسیار زیاد تعمیراتی و مشکلات تکنیکی تعمیر و مرمت از یک طرف و خسارات جبران‌ناپذیر مالی و جانی و زیست محیطی ناشی از تخریب سکو از طرف دیگر، در مواردی روش‌های آنالیزهای معمولی و متعارف سازه‌ای کفایت نکرده و انجام آنالیزهای پیچیده‌تری را ایجاب می‌نماید. در همین زمینه عدم قطعیت‌های متعددی که در بارگذاری، تبیین رفتار سازه در اندرکش با آب و خاک و نیز در مدل انتخابی برای تعیین عمر خستگی وجود دارد، گاهی انجام آنالیز قابلیت اعتماد در تعیین عمر خستگی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. بنا به دلایل متعددی نظیر هندسه پیچیده، تنش‌های پس ماند ناشی از جوشکاری، ترک‌های اولیه و خلل فرج‌های جوش، اتصالات لوله‌ای بیشتر از سایر اجزاء در معرض خستگی قرار دارند و اغلب پس از گذشت مدت زمانی از عمر سکو در محل بعضی از این اتصالات ترک‌های بزرگ ناشی از خستگی مشاهده می‌شود. در حالت کلی در اثر پدیده خستگی در اجزای سازه‌ای که تحت تأثیر بارگذاری نوسانی قرار می‌گیرند، توانایی اجزاء در تحمل بارهای وارده کاهش یافته و یا از بین می‌رود. بسته به خواص مصالح و بارگذاری اعمالی و نیز هندسه سازه، میزان کاهش توانایی سازه در هر سیکل بارگذاری ممکن است تغییر پیدا کند. معمولاً دو روش برای تعیین عمر خستگی وجود دارد که عبارتند از: الف) روش S-N و ب) روش استفاده از تئوری‌های مکانیک شکست.

الف - روش استفاده از دیاگرام‌های S-N

در این روش براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها منحنی‌هایی ترسیم می‌شود که اغلب در مقیاس لگاریتمی به صورت خطی می‌باشد. رابطه برآزش داده شده بر این منحنی‌ها به فرم:

$$N = K_1 S^{-b} \quad (1)$$

است که در آن K_1 ، b ضرایب ثابتی هستند که براساس آزمایشات به دست می‌آیند. N تعداد سیکل‌های بارگذاری و S دامنه تنش اعمالی است. اشکال عمده‌ای که این روش دارد این است که اندازه‌گیری میزان تخریب اتفاق افتاده در اثر خستگی با استفاده از آن میسر نیست.

بیان می‌گردد. در رابطه اخیر اثرات هندسی و مرزی است و Y ضریب فاکتور شدت تنش نامیده می‌شود. مقدار Y در دور تا دور اتصال متغیر است [۲]. در آنالیزهای قابلیت اعتماد، اغلب برای این پارامتر مقدار ثابتی (مستقل از اندازه ترک) در نظر می‌گیرند [۳]. در این مقاله هدف آن است که ضمن معرفی برخی از مدل‌های متعین (deterministic) که برای این ضریب وجود دارند، تأثیر پارامتر مذکور در آنالیز قابلیت اعتماد اتصال مورد بررسی قرار گیرد.

۱- مروری بر روش‌های متعین (deterministic) تعیین فاکتور شدت تنش

به دلیل پیچیدگی‌های هندسی و مرزی و ماهیت تنش سه بعدی، محاسبه فاکتور شدت تنش به صورت تحلیلی، برای اتصالات لوله‌ای کار بسیار دشواری است. ترک‌های به وجود آمده در اثر خستگی در این اتصالات از نوع ترک‌های سطحی هستند (شکل ۱) که به صورت نیمه بیضوی قابل تقریب زدن هستند. برای محاسبه فاکتور شدت تنش اغلب از روش‌های آزمایشی و یا روش‌های اجزای محدود استفاده می‌شود. استفاده از توابع وزن و روش‌هایی نظیر مدل فنر خطی (line spring)، مدل آزادسازی لنگر [۲] و تلفیق آن با روش‌های تعیین فاکتور شدت تنش در صفحات مسطح نیز توسط محققین بررسی شده است. Newman-Raju [۴]، یک فرمول نیمه تحلیلی بر مبنای محاسبات روش اجزاء محدود برای محاسبه فاکتور شدت تنش در هر نقطه از پیرامون یک ترک سطحی در یک صفحه با عرض محدود [شکل ۱] و تحت تأثیر تنش‌های غشایی و خمشی پیشنهاد کرده‌اند. فرمول پیشنهادی Newman-Raju را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$K(\phi) = (S_1 + H \cdot S_0) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{h}, \frac{a}{c}, \frac{c}{l}, \phi\right) \quad (5)$$

در رابطه فوق S_1 تنش غشایی و S_0 تنش خمشی، h ضخامت صفحه، l نصف عرض صفحه، Q فاکتور شکل و H و F فاکتورهای تصحیح شرایط مرزی‌اند. روابط جهت تعیین F, H, Q و محدودیت‌های کاربرد آنها در مرجع [۴] ارائه گردیده است.

Rhee و همکاران [۵] بر مبنای روش اجزاء محدود فرمول‌های پارامتریک برای فاکتور شدت تنش اتصالات

لوله‌ای T شکل ارائه کرده‌اند. فرمول‌های ایشان با توجه به اثرات ترکیبی مدهای مختلف ترک به دست آمده است. به دلیل شرایط هندسی پیچیده اتصال، حتی وقتی که عضو شاخه (brace) تحت تأثیر نیروی کششی خالص قرار می‌گیرد، تمامی مدهای ترک فعال می‌گردند و فاکتور شدت تنش معادل از رابطه:

$$K_e = [K_I^2 + K_{II}^2 + K_{III}^2 / (1 - \nu)]^{1/2} \quad (6)$$

تعیین می‌گردد. بر این مبنا رابطه تجربی برازش داده شده ایشان به صورت زیر قابل بیان است:

$$K_e = F_0 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \sigma_N \cdot \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

F_0 ضریب مربوط به هندسه اتصال، F_1 ضریب مربوط به هندسه ترک و F_2 ضریب مربوط به اثرات ترکیبی هندسه اتصال و ترک است. σ_N تنش اسمی عنصر شاخه است [شکل ۲]. در فرمول‌های فوق جمله‌های T ضخامت chord و d قطر brace است، دخالت دارند.

چند مدل تجربی نیز برای تعیین فاکتور شدت تنش اتصالات لوله‌ای توسعه داده شده است. یکی از مدل‌های مشهوری که در دانشگاه لندن (U.C.L) به دست آمده است، مدلی است که به نام مدل دو فازی (T.P.M (Two Phase Model) مشهور است. در این مدل پدیده رشد ترک‌های خستگی به دو مرحله پیدایش ترک (crack initiation) و گسترش ترک (crack propagation) تقسیم شده است. رابطه برازش داده شده به ضریب فاکتور شدت تنش به صورت:

$$Y = M \cdot B \cdot (T/a)^k \quad (8)$$

است، که در آن k و B توابعی از اندازه ترک بحرانی (ضخامت chord) و نیز ضریب تنش میانگین دور اتصال (S) می‌باشند. M در دو فاز مختلف شروع و گسترش ترک مقادیر جداگانه‌ای دارد. خلاصه روابط به دست آمده برای مدل بالا به صورت زیر قابل بیان است:

$$M = \begin{cases} \left(\frac{0.25T}{a} P_5\right)^P & a < 0.25T \\ 1 & a \geq 0.25T \end{cases} \quad (9)$$

برون صفحه ای OPB و همینطور برای اتصالات Y شکل تحت اثر خمش درون صفحه ای IPB نشان داده اند. مدهای بارگذاری، موضع ترک و نحوه تغییرات ضریب تمرکز تنش در اشکال (۲ الف تا ج) نشان داده شده اند. دامنه تغییرات Y برای مدهای مختلف بارگذاری در اشکال [۶-۴] مشخص شده است.

در شکل (۷) مقایسه ای بین روابط مختلف پیشنهادی Y انجام گرفته است. ملاحظه می گردد که در ترک های ریز $a/T < 0.25$ مدل های مختلف مقادیر بسیار متفاوتی را پیش بینی می کنند، در حالی که در ترک های بزرگ $a/T > 0.5$ اختلاف بین مدل ها کمتر می شود. بررسی تأثیر این اختلافات در اندیس قابلیت اعتماد، در این مقاله مورد نظر قرار گرفته است.

۲- مروری بر روش های قابلیت اعتماد

در روش های قابلیت اعتماد ایمنی سازه به جای اینکه با یک سری ضرایب ایمنی جزئی (partial safety factor) محاسبه گردند، با محاسبه احتمال رسیدن و یا نرسیدن سازه به حالت حدی خود برآورد می گردد. احتمال نرسیدن سازه به حالت حدی خود به قابلیت اعتماد و یا احتمال بقاء معروف است. بحث تفصیلی تئوری های قابلیت اعتماد خارج از حوصله این مقاله بوده و به تفصیل در مرجع [۸] توضیح داده شده است. در اینجا فقط به صورت خلاصه برخی از این روش ها مرور می گردند.

اولین قدم در آنالیز قابلیت اعتماد، تشخیص پارامترهایی است که به عنوان متغیر تصادفی پایه می توانند در مد گسیختگی و یا رسیدن سازه به حالت حدی مشارکت داشته باشند. متغیرهای تصادفی می توانند بارهای وارده، خصوصیات مصالح متغیرهای هندسی، و یا عدم قطعیت های ناشی از عدم کفایت اطلاعات آماری و یا مدل فیزیکی مورد مطالعه باشد. هر یک از متغیرهای تصادفی فوق الذکر از یک توزیع احتمالی پیروی می کنند. فرض کنید تعداد n متغیر تصادفی وجود دارد که در حالت حدی L_1 تأثیر می گذارند. این متغیرها با بردار $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ نشان داده می شوند. تابع حالت حدی را می توان به صورت زیر:

$$M = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (15)$$

$$tk = (0.353 + 0.057 \times S) (T / 0.016)^{-0.099P_2} \quad (10)$$

$$B = (0.669 - 0.1625 \times S) (T/0.016)^{0.11 \times P_1} \quad (11 \text{ الف})$$

$$P = 0.231 (T/0.016)^{-1.71} \beta^{0.31} S_{ch}^{0.18} \times P_3 \quad (11 \text{ ب})$$

در رابطه فوق S_{ch} ضریب تمرکز تنش hot spot است که در این مقاله از روابط پیشنهادی Lloyd's [۶] استخراج گردیده اند. S نسبت میانگین تنش دور اتصال است که به صورت زیر:

$$S = S_{ch} / \pi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_c(\theta) d\theta \quad (12)$$

بیان می گردد. $S_c(\theta)$ ضریب تمرکز تنش در زاویه θ نسبت به نقطه hot spot است. ضرایب P_1, P_2, P_3, P_5 در فرمول اصلی T.P.M وجود ندارند. در این مقاله این ضرایب به صورت ضرایبی با مقدار ثابت برابر واحد جهت آنالیز حساسیت منظور گردیده اند. به عبارت دیگر جهت تعیین حساسیت اندیس قابلیت اعتماد نسبت به تغییرات هر یک از ترم های رابطه T. P. M ضرایب P_1 تا P_5 اضافه شده اند.

مدل ساده دیگری توسط H.O. Madsen [۷] به کار برده شده است. در این مدل Y به صورت:

$$Y = Y_{unwelded}(a) \cdot M_k(a) \quad (13)$$

بیان شده است. در رابطه فوق علاوه بر اثرات هندسه اتصال، اثرات مربوط به جوش نیز منظور گردیده است. جمله دوم $(M_k(a))$ در رابطه فوق تأثیرات جوش را منظور می کند. مستقل از نوع بارگذاری جمله های رابطه (۱۳) توسط روابط زیر بیان می شوند:

$$Y_{unwelded}(a) = [1.08 - 0.7 (a/T)] \quad (14 \text{ الف})$$

$$M_k(a) = [1.0 + 1.24 \cdot e^{-22.1(a/T)} + 3.17 \cdot e^{-357(a/T)}] \quad (14 \text{ ب})$$

در این روابط e پایه لگاریتم طبیعی است. آقا کوچک و همکاران [۲] بر مبنای روش توابع وزن، مدل آزاد سازی لنگر و نتایج آزمایش ها، حدود تغییرات و پراکندگی Y را برای اتصالات T شکل تحت اثر نیروی محوری، خمش

نشان داد. M را حاشیه ایمنی (safety margin) می نامند. حاشیه ایمنی در شرایط زیر صدق می کند.

$$M > 0 \quad X \in W_s$$

$$M \leq 0 \quad X \in W_f$$

W_f و W_s به ترتیب فضای ایمن و شکست را نشان می دهند. سطح $n-1$ بعدی که در شرط:

$$g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (16)$$

صدق کند، به نام سطح گسیختگی نامیده می شود. بنابراین سطح گسیختگی فضای متغیرهای تصادفی را به دو ناحیه ایمن (W_s) و غیر ایمن (W_f) تقسیم می کند. قابلیت اعتماد و یا احتمال نرسیدن به حالت حدی عبارت است از:

$$R = 1 - P_f = 1 - \int_{X \in W_f} f_x(x) dx \quad (17)$$

$f_x(x)$ چگالی احتمالی مشترک n متغیر پایه و P_f احتمال شکست است. نتیجه بالا دقیق است، ولی از نقطه نظر علمی دو عیب دارد: اولاً معمولاً داده های کافی به منظور ساختن تابع چگالی احتمالی مشترک متغیرهای تصادفی در دست نیست، ثانیاً به فرض داشتن تابع چگالی احتمال مشترک متغیرهای پایه، محاسبه انتگرال چند گانه فوق روی فضای پیچیده W_f بسیار دشوار است و اغلب از روش های شبیه سازی نظیر مونت کارلو و یا مونت کارلو با نمونه گیری تطابقی (adaptive sampling) استفاده می شود که بسیار وقت گیر و پرهزینه می باشد. به منظور گریز از این مشکلات اغلب از روش های تقریبی سطح Π استفاده می شود. در این روش ها به جای اینکه معادله (17) به صورت مستقیم محاسبه شود، از اندیسی به نام اندیس قابلیت اعتماد (β) استفاده می شود، که با تعیین آن احتمال شکست از رابطه $P_f = \Phi(-\beta)$ که تابع توزیع تجمعی احتمالی نرمال (گوسی) است، به دست می آید. جهت محاسبه اندیس قابلیت اعتماد، ابتدا متغیرهای تصادفی X که ممکن است دارای چگالی احتمال مشترک غیر نرمال باشند، به فضای n متغیر تصادفی مستقل، دارای توزیع نرمال استاندارد U انتقال می یابند [8]. بنابراین متغیرهای فضای U مستقل دارای توزیع احتمالی نرمال، میانگین $\mu_{x_i} = 0$ انحراف معیار $\sigma_{x_i} = 1.0$ می باشند. متناظر با چنین انتقالی، سطح

شکست نیز از فضای اصلی به فضای نرمال انتقال خواهد یافت. در فضای نرمال سطح جدید شکست عبارت خواهد بود از $g^*(u) = 0$. نقطه ای روی این سطح شکست که کمترین فاصله را تا مبدأ مختصات داشته باشد به نام نقطه طراحی نامیده می شود و اندیس قابلیت اعتماد فاصله مبدأ مختصات نقطه طراحی می باشد. بنابراین اگر نقطه طراحی را u^* بنامیم، خواهیم داشت

در روند تعیین اندیس قابلیت اعتماد سطح شکست با یک ابرصفحه (hyper-plane) و یا یک hyper-paraboloid تخمین زده می شود که حالت نخست به FORM (First order reliability method) و حالت اخیر به SORM (second order reliability method) معروف است. در کنار این روش ها به منظور تعیین دقیق تر نقطه طراحی، روش های تلفیقی SORM یا FORM با نمونه گیری تطابقی نیز توسعه یافته اند. پس از تعیین قابلیت اعتماد، می توان حساسیت احتمال شکست را نسبت به هر یک از متغیرهای تصادفی با تعیین α_i ها، ضرایب حساسیت و ضرایب الاستیسیته تعیین کرد. پارامترهای فوق الذکر چنین تعریف می شوند:

α_i یا گرادیان سطح شکست در نقطه طراحی، میزان حساسیت اندیس قابلیت اعتماد را به تغییرات جزئی در هر یک از متغیرهای پایه بیان می کند.

$$\alpha_i = \frac{\partial \beta}{\partial u_i} \Big|_{u = u^*} \quad (18)$$

u^* نقطه طراحی است و داریم: $\beta = |u^*|$ ضرایب الاستیسیته جهت بدون بعد کردن α_i ها چنین تعریف می شوند:

$$e_i = \frac{\partial \beta}{\partial u_i} \frac{u_i}{\beta} \Big|_{u = u^*} = \alpha_i \frac{u_i}{\beta} \Big|_{u = u^*} \quad (19)$$

۳- فرمولبندی مسئله آنالیز خستگی اتصالات لوله ای

معمولاً فرض می شود که خستگی اتصالات لوله ای سکوهای دریایی از قانون Paris (رابطه ۲) تبعیت می کند. با ترکیب روابط (۲) و (۴) رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{da}{dN} = CS^m Y^m (\sqrt{\pi a})^m \quad (20)$$

که با جداسازی ترم های وابسته به طول ترک (a) رابطه فوق را می توان به صورت زیر:

$$\int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{da}{Y^m (\sqrt{\pi a})^m} = \int_{N_0}^N CS^m dN \quad (21)$$

نوشت. طرف راست معادله فوق را می توان با $CE[S^m] (N-N_0)$ جایگزین کرد. در رابطه فوق a_0 عمق ترک اولیه، a_{cr} عمق ترک بحرانی، N تعداد سیکل هایی است که باعث بحرانی شدن ترک می شود. محققین سعی کرده اند که تنش معادلی را جایگزین $E[S^m]$ کنند. اگر این تنش معادل را S_h بنامیم خواهیم داشت:

$$\int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{da}{Y^m (\sqrt{\pi a})^m} = C S_h^m (N - N_0) \quad (22)$$

یکی از روابط ساده ای که برای طیف تنش های با باند پهن کاربرد دارد، رابطه به دست آمده توسط Wirsching [۹] است که به صورت زیر:

$$S_h = 2\sqrt{2} \lambda \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right)^{1/m} \cdot \sigma_0 \quad (23)$$

بیان می گردد. λ پارامتری است که به خصوصیات پهنای طیف و نیز ثابت m وابسته است و σ_0 جذر سطح زیر منحنی طیف تنش است. به دلیل عدم قطعیت های متعدد، سعی شده است که رابطه (۲۲) اصلاح گردد. در این مقاله عدم قطعیت های مختلف به صورت زیر تأثیر داده شده است.

$$\int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{da}{G \cdot (B_k \cdot B_{ga} \cdot B_{hs} \cdot Y)^m (\sqrt{\pi x})^m} = C S_h^m (N - N_0) \quad (24)$$

که در رابطه فوق a_0 (اندازه ترک اولیه)، G (تأثیرات تنش آستانه)، B_k (اثرات عدم قطعیت های فیزیکی فاکتور شدت تنش)، B_{ga} (اثرات عدم قطعیت نیروی داخلی عضو)، B_{hs} (عدم قطعیت های تنش hot spot)، C (ضریب رابطه پاریس) به عنوان متغیرهای تصادفی اختیار گردیده اند. خصوصیات متغیرهای تصادفی در جدول (۱) نشان داده شده است.

جهت بررسی اثرات فاکتور شدت تنش یک اتصال T

شکل و یک اتصال Y شکل با مشخصات جدول (۲) مورد مطالعه قرار گرفته اند. سپس با آنالیز حساسیتی که روی پارامترهای هندسی این اتصالات انجام گرفته است، در واقع یک محدوده وسیعی از اتصالات در نظر گرفته شده اند. اتصالات تحت تأثیر حالات دریایی (sea states) با مشخصات جدول (۳) قرار گرفته اند. در محاسبات تنش hot spot از ضرایب تمرکز تنش Lloyd's (۶) استفاده شده است. روش های زیر در محاسبات قابلیت اعتماد مقایسه گردیده اند.

روش ۱ - در این روش B_k به صورت یک ضریب ثابت با مقدار واحد مدل گردیده است و برای Y نیز مقدار واحد منظور شده است.

روش ۲ - در این روش B_k به صورت یک ضریب ثابت با مقدار 0.8 مدل گردیده است و برای Y نیز مقدار واحد منظور شده است.

روش ۳ - در این روش B_k به صورت یک توزیع لوگ نرمال با میانگین ۱ و انحراف معیار 0.12 و Y به صورت ضریب ثابت با مقدار واحد مدل شده است.

روش ۴ - در این روش B_k به صورت یک توزیع لوگ نرمال با میانگین 0.8 و انحراف معیار 0.12 و Y به صورت ضریب ثابت با مقدار واحد مدل شده است.

روش ۵ - در این روش بر مبنای دامنه تغییرات فاکتور شدت تنش (اشکال ۴، ۵، ۶) توابعی به صورت چند جمله ای های درجه چهارم بر میانگین تغییرات برازش داده شده است. سپس عدم قطعیت های ضریب فاکتور شدت تنش به صورت ضریبی به نام V_D مدل گردیده است. برای V_D توزیع یکنواخت در دامنه ای برابر با دامنه تغییرات اشکال فوق الذکر منظور گردیده است. در اشکال ۷-۱۱ این روش به نام مدل آفاکوچک نامیده شده است. فرمول های برازش داده شده بر این اشکال به صورت زیر قابل بیان است:

الف) اتصالات T شکل تحت اثر نیروی محوری شاخه (brace): (شکل ۴ و ۷ الف)

$$Y_1(a) = 1.4557 - 6.3512 \left(\frac{a}{T}\right) + 20.8333 \left(\frac{a}{T}\right)^2 - 30.506 \left(\frac{a}{T}\right)^3 + 15.744 \left(\frac{a}{T}\right)^4 \quad (25)$$

ب) اتصالات T تحت اثر خمش برون صفحه ای (OPB): (شکل ۵ و ۷ ب)

$$Y_1(a) = 1.003 - 2.5869 \left(\frac{a}{T}\right) + 6.333 \left(\frac{a}{T}\right)^2 - 8.1845 \left(\frac{a}{T}\right)^3 + 3.988 \left(\frac{a}{T}\right)^4 \quad (26)$$

ج) اتصالات Y شکل تحت اثر خمشی درون صفحه (IPB): (شکل ۶ و ۷ - ج)

$$Y_1(a) = 0.94774 - 3 \left(\frac{a}{T}\right) + 8.083 \left(\frac{a}{T}\right)^2 - 10.179 \left(\frac{a}{T}\right)^3 + 4.881 \left(\frac{a}{T}\right)^4 \quad (27)$$

جهت تأثیر پراکنندگی های فاکتور شدت تنش (اشکال ۴-۶) می توان فاکتور شدت تنش را به صورت

$$Y(a) = Y_1(a) \cdot V_D \quad (28)$$

بیان کرد. که در این رابطه V_D یک متغیر تصادفی با توزیع مستطیلی در دامنه (0.85, 1.15) است.

روش ۶ - نظیر روش ۵، ولی Y از فرمول های پیشنهادی Rhee (۵) محاسبه شده است. برای نسبت $\frac{\text{طول ترک}}{\text{عمق ترک}} = \text{Coa}$ مقدار ثابت برابر با ۵ اختیار گردیده است.

روش ۷ - نظیر روش ۵، ولی Y از روش TPM محاسبه گردیده است. برای ضریب S مقدار ثابت برابر با 2.25 اختیار گردیده است (باتوجه به شکل (۳-ج) و رابطه (۱۲) و سپس نسبت به آن آنالیز حساسیت انجام گرفته است. جهت آنالیزهای حساسیت ضرایب P_1 تا P_5 با مقداری برابر واحد در پارامترهای این روش ضرب گردیده است.

روش ۸ - نظیر روش ۵، ولی Y از فرمول پیشنهادی Madsen محاسبه گردیده است. در این روش تابع Y مستقل از نوع بارگذاری است.

۴ - نتایج آنالیز قابلیت اعتماد

نتایج محاسبات در اشکال (۱۱-۸) رسم گردیده است. از روش SORM جهت محاسبه استفاده شده است.

در اشکال (۸-الف) تا (۱۰-الف) تغییرات اندیس قابلیت اعتماد بر حسب زمان برای اتصالات T شکل تحت اثر نیروی محوری، خمشی OPB، و Y شکل تحت اثر خمشی IPB رسم گردیده است. مدل TPM و آقاچوک اندیس قابلیت اعتماد بالاتری به دست داده اند. مدل

Madsen در اتصالات T_{OPB} و Y_{IPB} اندیس قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به وقتی که فاکتور شدت تنش برابر با مقدار ثابت ۱/۰ اختیار شود، به دست داده است. ولی در اتصالات Taxial (شکل ۸) قابلیت اعتماد کمتری توسط این مدل پیش بینی گردیده است. مدل Madsen مستقل از نوع بارگذاری و هندسه اتصالات است و به دلیل تأثیر هندسه جوش در ترک های بسیار ریز مقدار Y به مراتب بیشتر از واحد در این مدل پیش بینی می شود. در شکل ۷ مقایسه ای بین روابط فاکتور شدت تنش انجام گرفته است. ملاحظه می گردد که در مدل های Rhee و Madsen مقدار این فاکتور بیش از نتایج آزمایش ها به دست آمده است. در اشکال (۸ تا ۱۰ ب) آنالیز حساسیت نسبت به پارامتر S در مدل TPM انجام گرفته است. ملاحظه می گردد که با افزایش این پارامتر اندیس قابلیت اعتماد نیز بیشتر می شود و حساسیت نسبت به تغییرات آن بسیار زیاد است، به طوری که از شکل ۱۰ ب) مشخص است اگر که S از مقدار 1.0 به 4 افزایش یابد، اندیس قابلیت اعتماد از مقدار 3.8 به مقدار 9.0 افزایش خواهد یافت. در اشکال ۸ تا ۱۰ ج، د) حساسیت نسبت به پارامترهای هندسی اتصال (، τ) رسم شده است. در این اشکال فرض بر این بوده است که تنش اسمی شاخه (brace) با تغییرات هندسه اتصال فرقی نمی کند ولی ضرایب تمرکز تنش و لذا تنش hot spot تابعی از پارامترهای هندسی اتصال است و تغییرات این پارامترها باعث تغییرات تنش hot spot می شود. در ضمن میزان حساسیت نسبت به پارامتر β ناچیز بوده است.

در شکل (۱۰-د) اثر زاویه تمایل (θ) شاخه نسبت به chord (پایه) بررسی گردیده است. ملاحظه می گردد که با افزایش این زاویه قابلیت اعتماد کاهش یابد. ولی همواره پس از مدل TPM با مقدار $S=2.25$ ، مدل آقاچوک بیشترین اندیس قابلیت اعتماد را نتیجه داده است و مدل ($Y=1.0$) بسیار محافظه کارانه بوده است. آنالیزهای حساسیت نسبت به پارامترهای ثابت در مدل TPM در شکل ۱۱ الف) نشان داده شده است. (برای Taxial) ملاحظه می شود که ثابت پارامتر (m) و ضریب فاکتور شدت تنش Y بیشترین اثرات کاهش دگی را در اندیس قابلیت اعتماد می گذارند و ضریب تنش متوسط اتصال (S) بیشترین اثرات افزایش دگی را در اندیس قابلیت اعتماد می گذارد. الاستیسیته ضریب S بیش از ۳ برابر قدر مطلق الاستیسیته ضریب P_4 به دست آمده است. ضریب P_4 به منظور بررسی تأثیر

ضریب تمرکز تنش منظور شده است، بنابراین حساسیت اندیس قابلیت اعتماد به پارامتر S ، بیش از سه برابر نسبت به ضریب تمرکز تنش است. همینطور مشاهده می شود که پارامترهای P_1, P_2, P_3 و P_5 تأثیر چندانی در اندیس قابلیت اعتماد ندارند، لذا دقت مدل TPM وابستگی چندانی به این پارامترها ندارد.

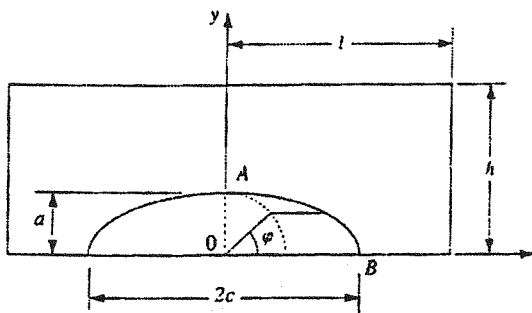
در شکل (۱۱-ب) آنالیز حساسیت نسبت به میانگین متغیرهای تصادفی مدل TPM انجام گرفته است (اتصال T_{axial}) و در شکل (۱۱-ج) این آنالیز نسبت به واریانس متغیرهای تصادفی انجام گرفته است. حساسیت نه چندان زیاد نسبت به واریانس متغیر تصادفی V_D و حساسیت زیاد آن به میانگین متغیر تصادفی مبین آن است که اگر بتوان با دقت خوبی میانگین فاکتور شدت تنش را تعیین کرد، در این صورت، مدل ساده توزیع یکنواخت می تواند کفایت لازم را داشته باشد.

۵- نتیجه گیری

از نتایج آنالیز قابلیت اعتماد می توان در برنامه ریزی بازرسی سکو استفاده کرد. در گذشته اغلب با بازرسی های زودتر از موعد مواجه شده اند. به عبارت دیگر در روش های معمولی آنالیز قابلیت اعتماد (با فاکتور شدت تنش ثابت) زمانی را که برای بازرسی اتصالات پیش بینی می کرده اند دست پایین تخمین زده می شده است. دلایل متعددی برای این موضوع قابل ذکر است که از آن جمله می توان به کند شدن رشد ترک (crack retardation)، وجود تنش های چند محوره و هم فاز نبودن لنگرهای خمشی و نیروی محوری اشاره کرد. یکی دیگر از دلایل فاکتور شدت تنش است. حساسیت اندیس قابلیت اعتماد نسبت به فاکتور شدت تنش زیاد است و نیز روش های مختلف تعیین فاکتور شدت تنش، مقدار اندیس قابلیت اعتماد بسیار متفاوتی را می توانند سبب شوند، بنابراین مدل کردن آن به صورت ثابت گاهی می تواند با بازرسی های زودتر از موعد منجر گردد.

چندین روش مختلف برای تأثیر فاکتور شدت تنش در آنالیز قابلیت اعتماد اتصالات لوله ای سکوهای دریایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که فاکتور شدت تنش می تواند تأثیر بسیار زیادی در نتایج قابلیت اعتماد داشته باشد. یک مدل ساده از نظر کاربرد در محاسبات قابلیت اعتماد بر مبنای نتایج آزمایشات توسعه داده شده است. پراکندگی های مشاهده شده در

نتایج آزمایشات به صورت یک توزیع مستطیلی طراحی گردیده است. نتایج نشان داده است که حساسیت نسبت به واریانس این متغیر تصادفی (V_D) چندان زیاد نیست، لذا کاربرد مدل ساده فوق در محاسبات قابلیت اعتماد می تواند علاوه بر سهولت کاربرد نسبت به مدل های پیچیده تر نظیر مدل Rhee و اجتناب از مشکلات عددی، دقت کافی نیز داشته باشد. در مدل TPM، ضریب S تأثیر بسیار زیادی در محاسبات قابلیت اعتماد داشته است. دقت کاربرد این مدل منوط به تعیین دقیق این پارامتر است. مدل Rhee گاهی دچار مشکلات عددی گردیده است. در ترک های ریز مقدار فاکتور شدت تنش به دست آمده از مدل Rhee، زیادتر از مدل های Madsen و آفاکوچک است و لذا اندیس قابلیت اعتماد نیز، انتظار می رود که کمتر باشد. مدل Madsen، مدل ساده ای از نظر کاربرد است و نتایج به دست آمده از آن نیز می تواند گاهی دست بالا بودن فاکتورهای شدت تنش ثابت را توجیه کند ولی تأثیر هندسه اتصال و بارگذاری به طور مستقیم در آن وارد نشده است. مهمترین عواملی که در اندیس قابلیت اعتماد تأثیر می گذارند، ثوابت پاریس (C ، m)، فاکتور شدت تنش Y ، و عدم قطعیت های طیف تنش می باشند.



شکل (۱) مشخصات ترک سطحی در یک صفحه با عرض محدود

$$K_I = \sigma \sqrt{F_1 F_2 F_3 F_4} \sqrt{\pi a}$$

Model AKAI : Deepest Crack Front Point (K_{II})

$$F_g = 0.2749\beta - 0.6225 - 1.2685 \ln \beta \quad \gamma = 1.3191 - 0.1661 \ln \gamma \quad \tau = 1.6621 + 0.3704 \ln \beta$$

$$F_i = \beta^{0.3561A - 0.0956C} \gamma^{0.0983A + 0.2298C + 0.0817C^2} \tau^{-0.0762A}$$

$$F_s = (a')^p (c')^r$$

$$p = -0.8669 - 0.2198A - 0.0162A^2 - 0.4750C^2 - 0.1667C^3 - 0.0193C^4$$

$$r = 0.0777 + 1.0531A + 0.5820A^2 + 0.0810A^3 - 0.7001C - 0.0604C^2 + 0.0060C^3$$

$$A = \ln a' \quad \text{and} \quad C = \ln c'$$

Model AKC2 : Surface Crack Front Point (K_{II})

$$F_g = 304.08\beta - 0.5858 - 0.7492 \ln \beta \quad \gamma = 2.6713 - 0.2884 \ln \beta + 0.5646 \ln \gamma$$

$$\tau = 1.1491 - 0.2936 \ln \gamma - 0.5043 \ln \tau$$

$$F_i = \beta^{0.0680A} \gamma^{0.0478A - 0.5344C - 0.1218C^2} \tau^{-0.1299A - 0.0370C}$$

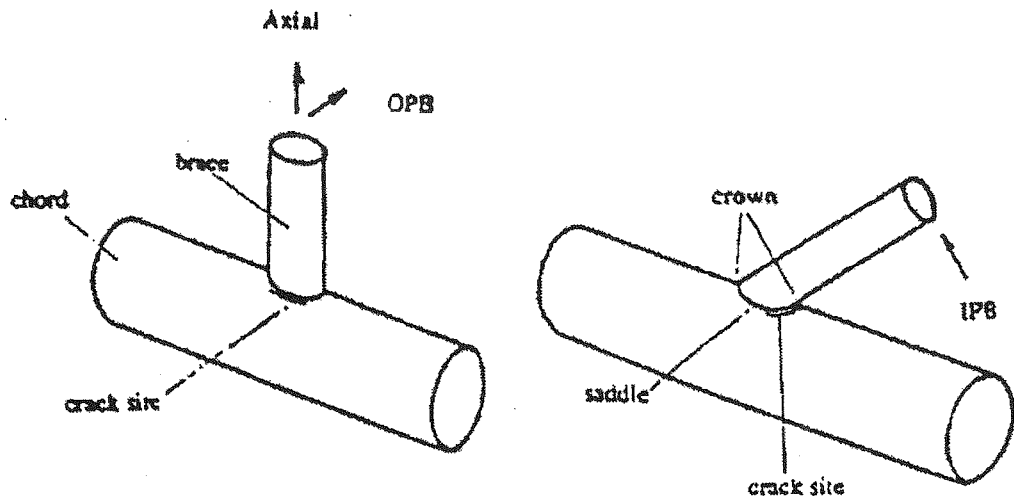
$$F_s = (a')^p (c')^r$$

$$p = 1.0787 + 0.6397A + 0.1569A^2 + 0.0186A^3 - (0.0770 + 0.0478A + 0.0099A^2)C^2$$

$$r = 0.8617 + 0.4888A + 0.1816A^2 + 0.0123A^3 - 0.3252C - 0.2210C^2 - 0.0275C^3$$

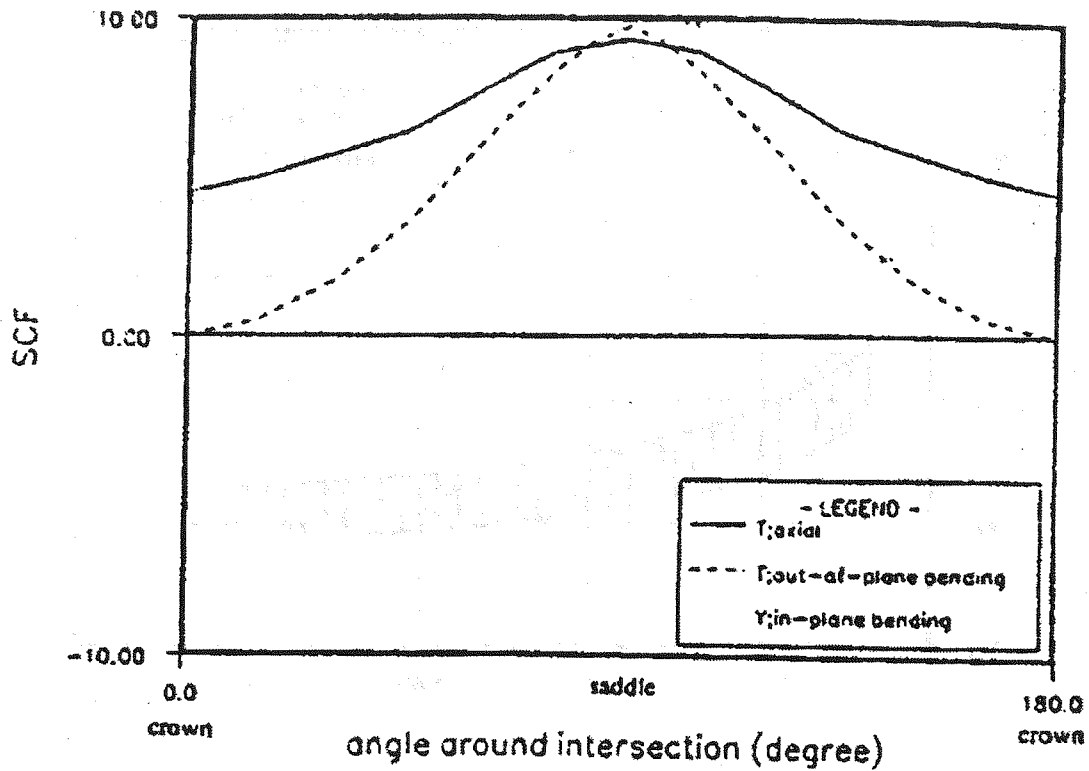
$$A = \ln a' \quad \text{and} \quad C = \ln c'$$

شکل (۲) فرمول های پیشنهادی Rhee، برای محاسبه فاکتور شدت تنش در یک اتصال لوله ای T شکل تحت اثر نیروی محوری



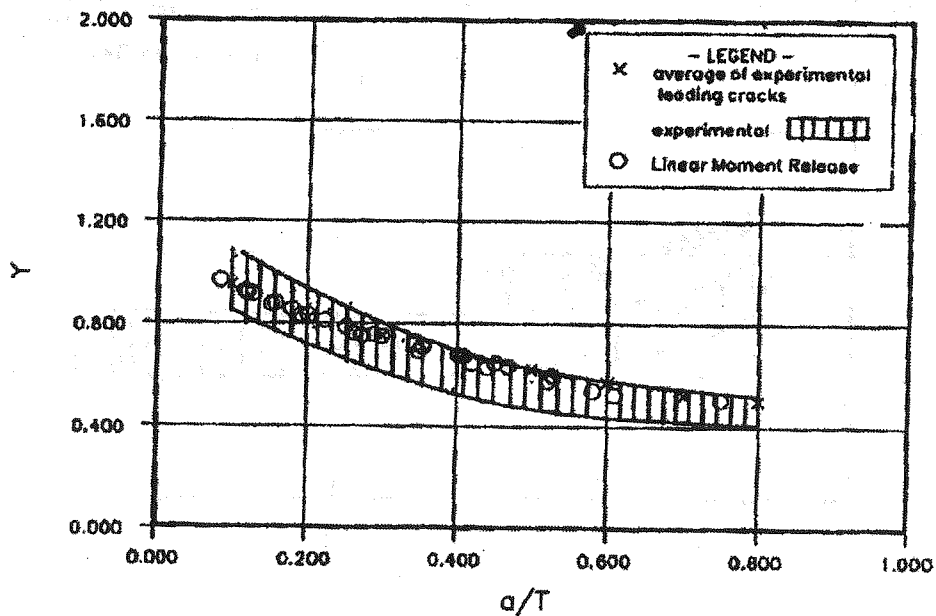
(الف)

(ب)

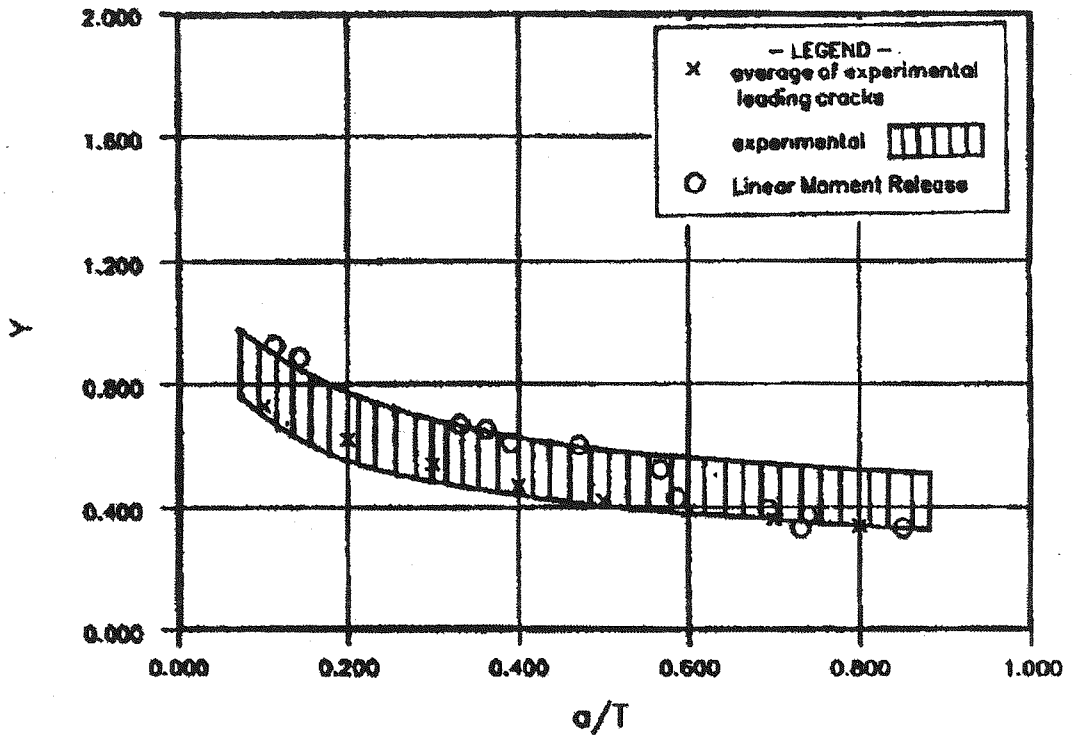


(ج)

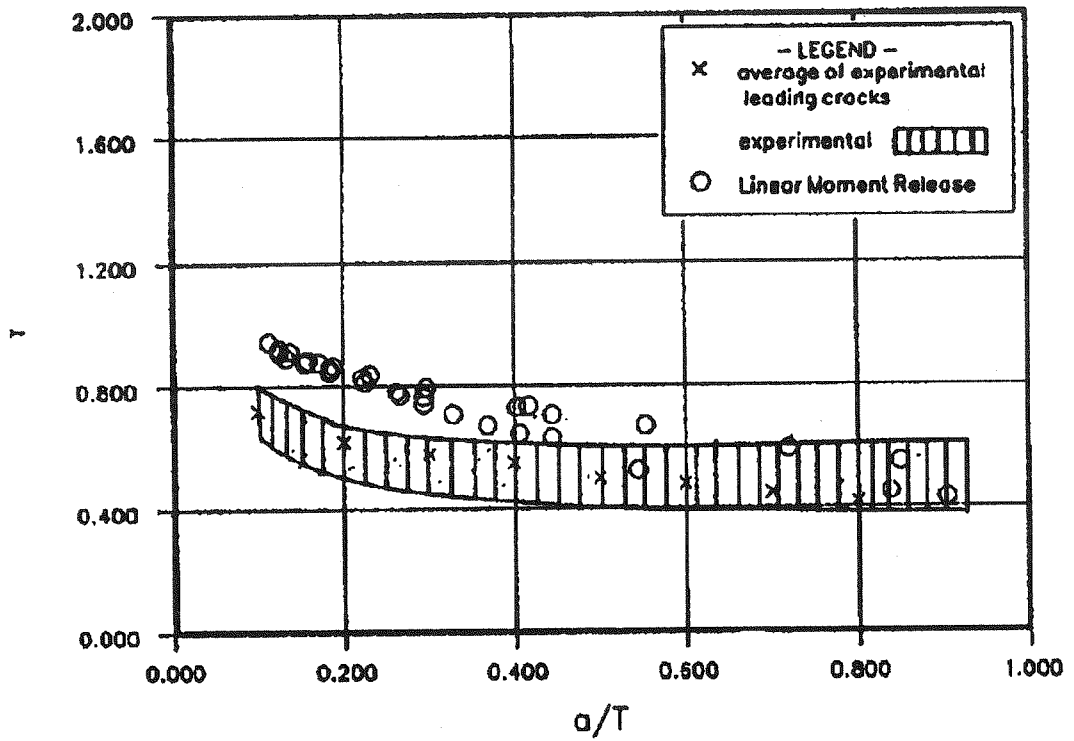
شکل (۳) الف - مدهای بارگذاری اتصال لوله ای T شکل و محل ترك محتمل ، ب - اتصال لوله ای Y شکل تحت اثر خمش درون صفحه ای و محل ترك محتمل ، ج - تغییرات ضریب تمرکز تنش در دور اتصال



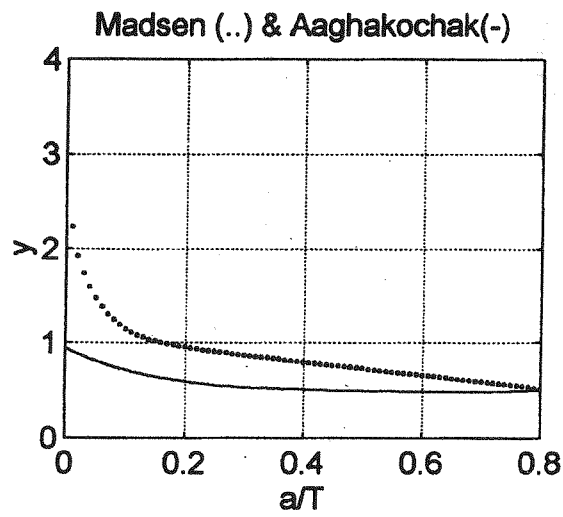
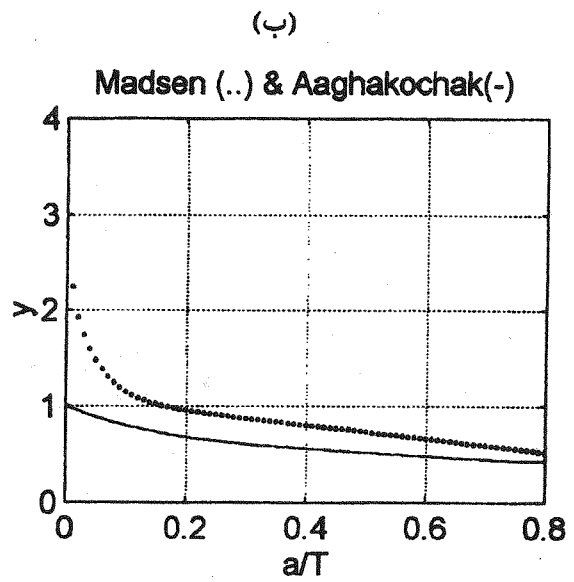
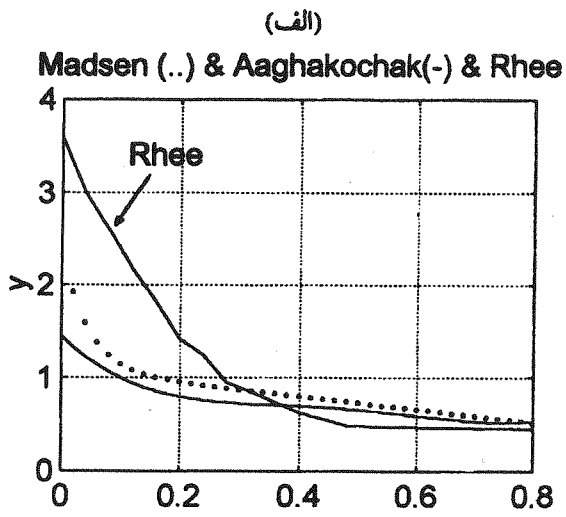
شکل (۴) دامنه ضریب فاکتور شدت تنش براساس نتایج آزمایشات برای يك اتصال لوله ای T شکل تحت اثر نیروی محوری



شکل (۵) دامنه ضریب فاکتور شدت تنش براساس نتایج آزمایشات برای یک اتصال لوله ای T شکل تحت اثر خمشی بیرون صفحه ای (OPB)



شکل (۶) دامنه ضریب فاکتور شدت تنش براساس نتایج



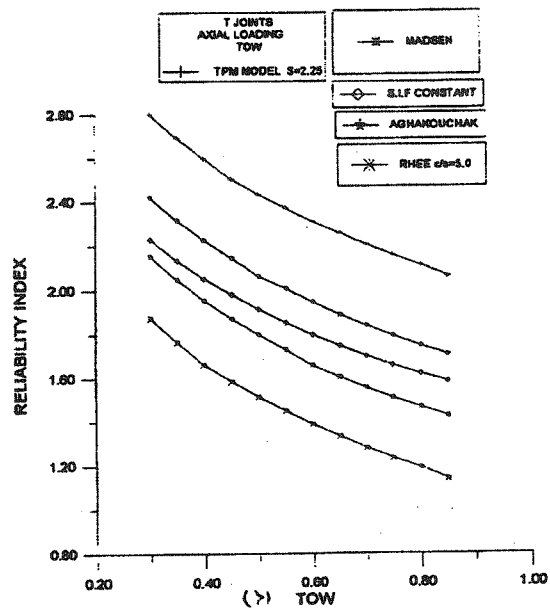
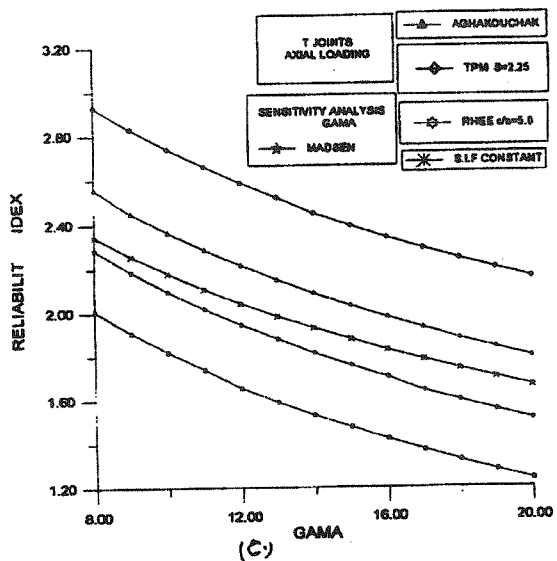
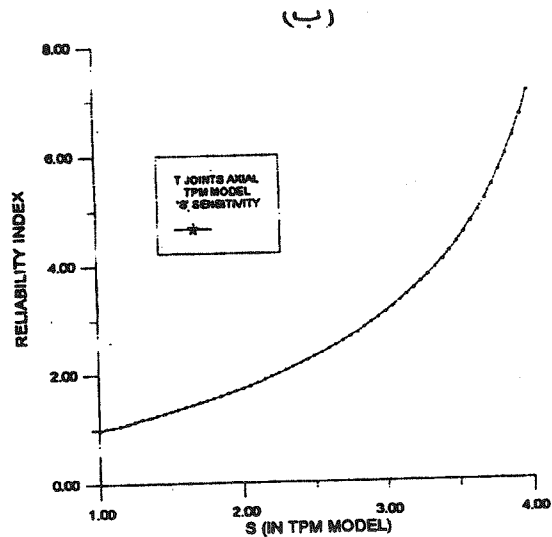
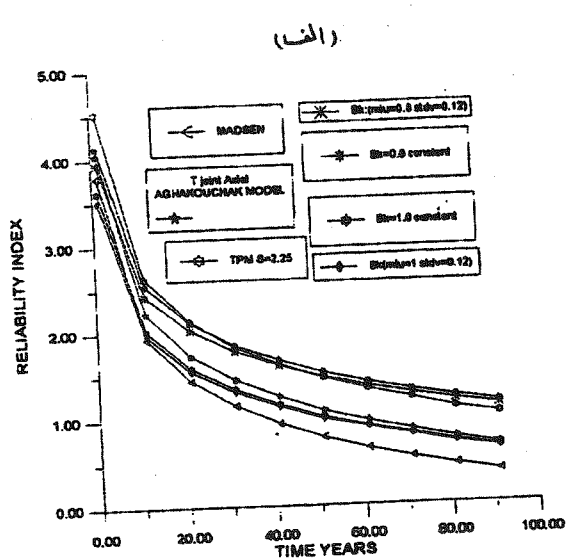
(ج)

شکل (۷) مقایسه روابط مختلف ضریب S.I.F در حالت متعین

الف - اتصال T تحت اثر نیروی کشش شاخه

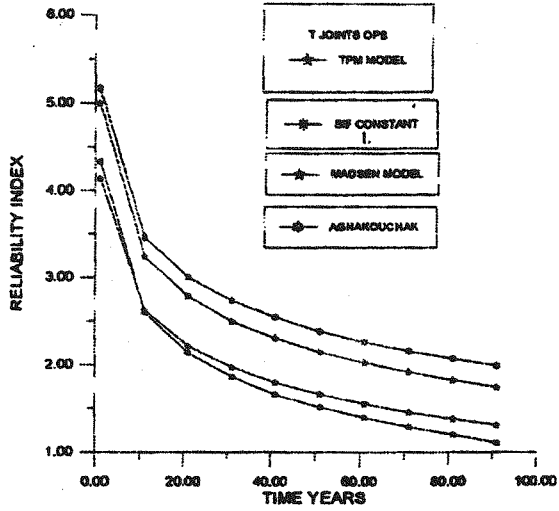
ب - اتصال T تحت اثر خمش برون صفحه ای OPB

ج - اتصال Y تحت اثر خمش درون صفحه ای IPB

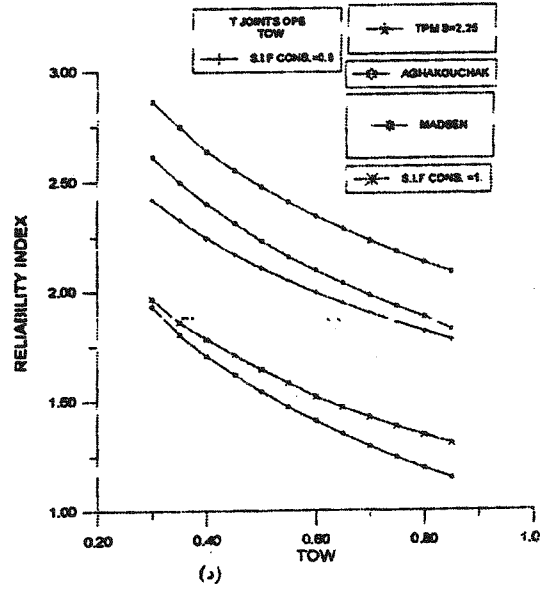
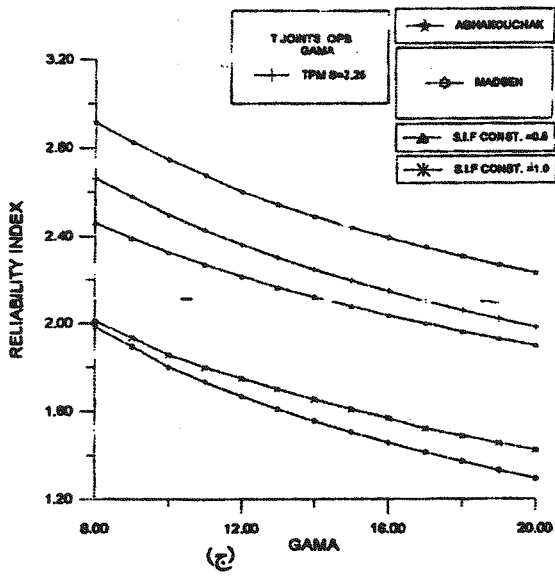
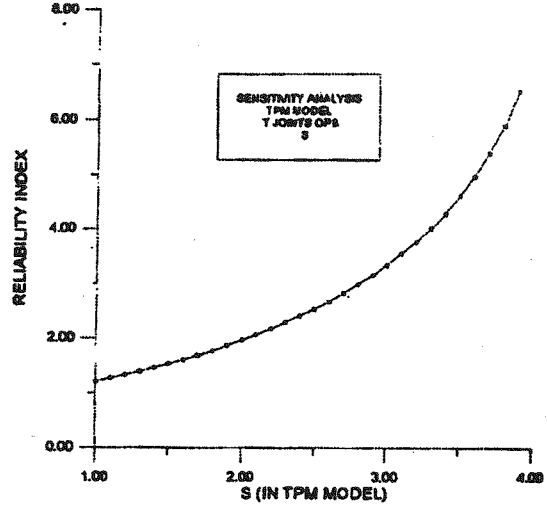


شکل (A) اتصال T شکل تحت اثر نیروی محوری شاخه و مقایسه روابط مختلف فاکتور شدت تنش

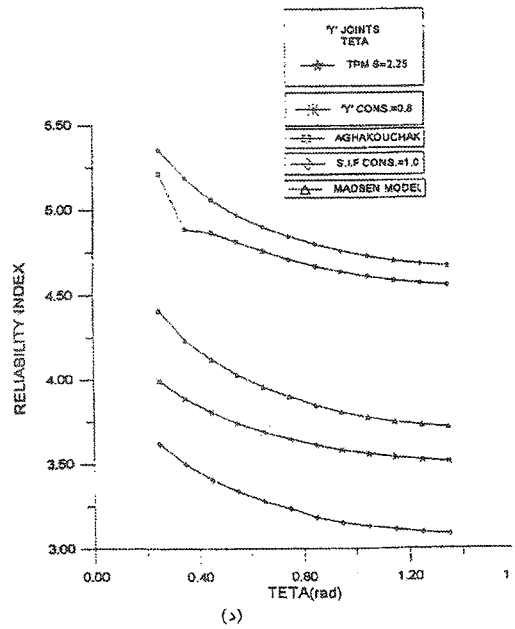
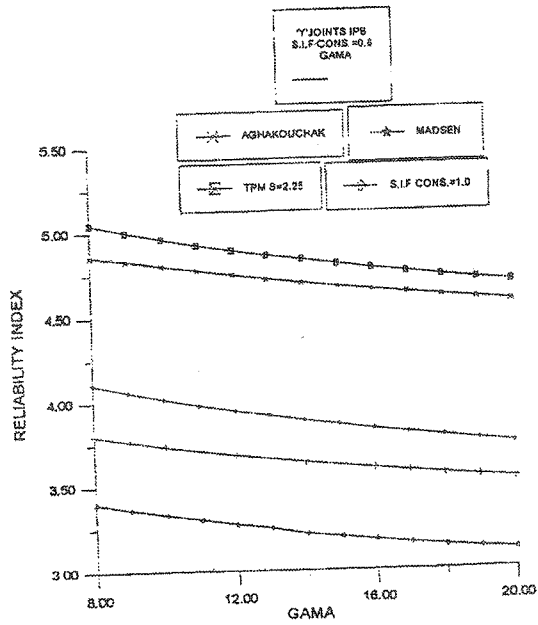
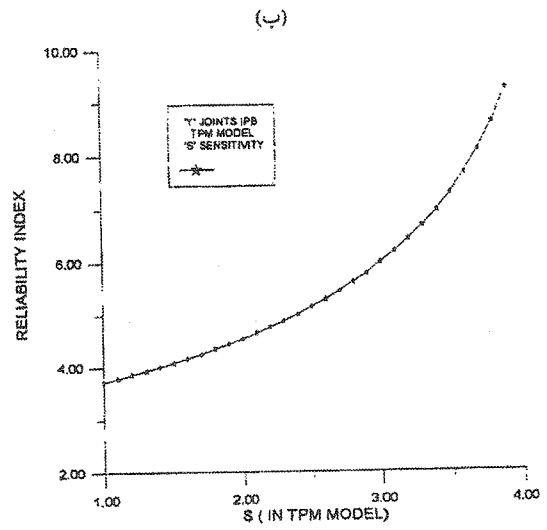
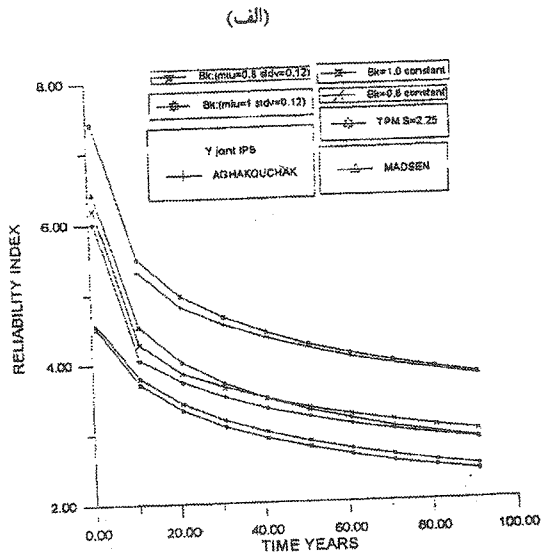
(الف)



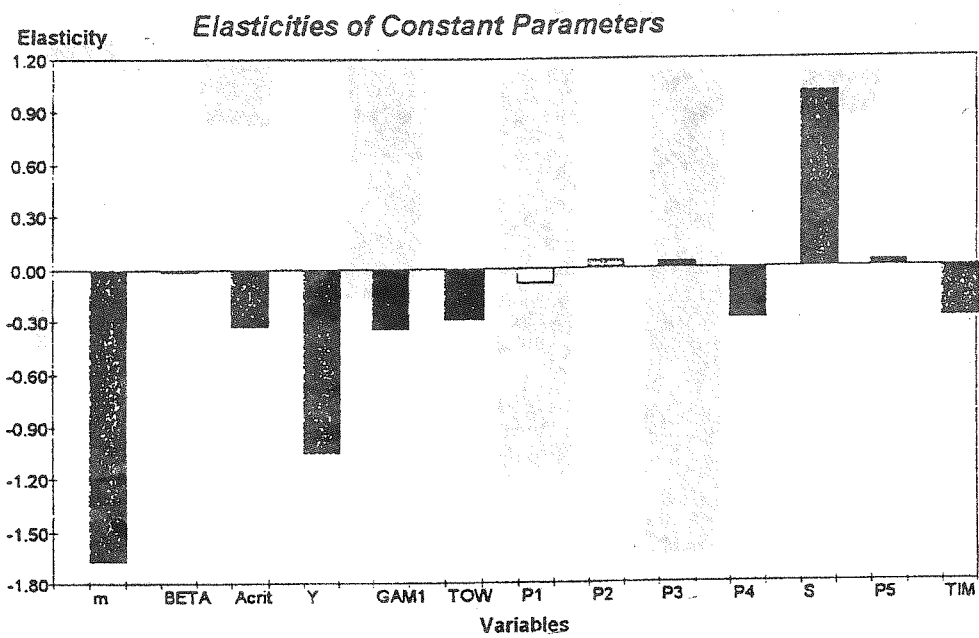
(ب)



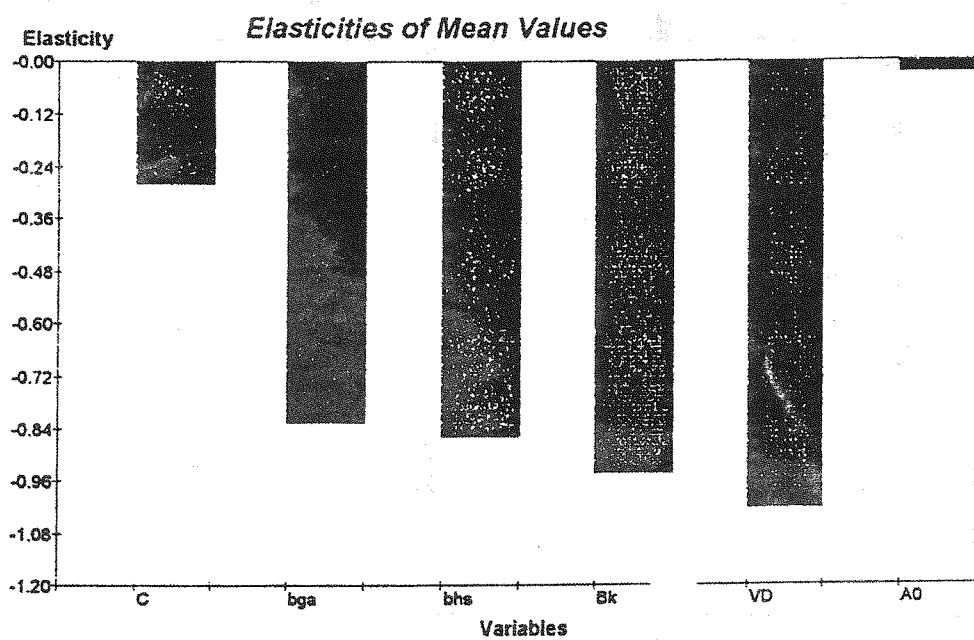
شکل (۹) اتصال T شکل تحت اثر خمش OPB - مقایسه روابط مختلف لاکتور شدت تنش



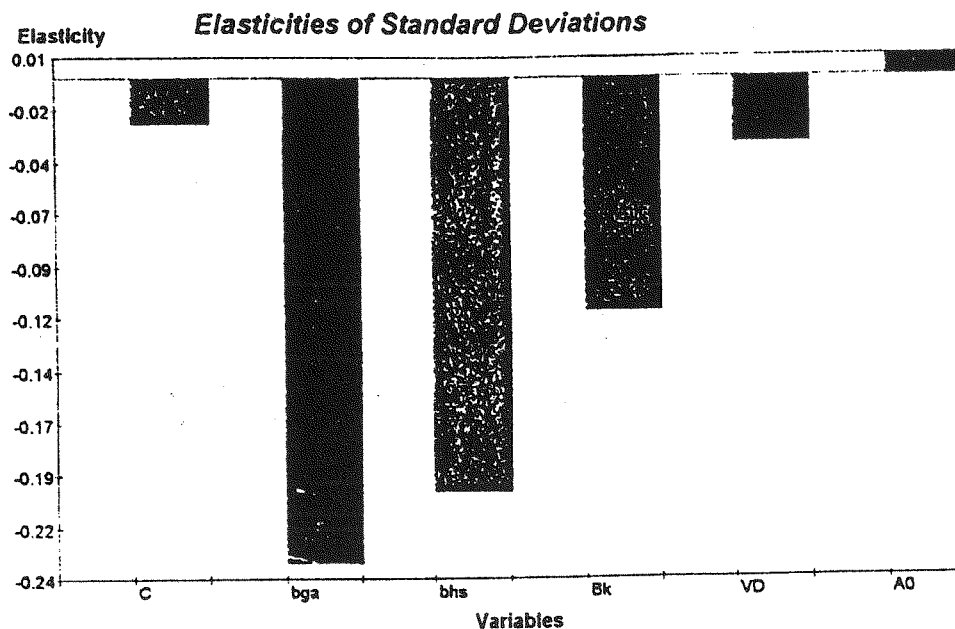
شکل (۱۰) اتصال Y شکل تحت اثر خمش IPB مقایسه روابط مختلف فاکتور شدت تنش



شکل (الف - ۱۱) الاستیسیته مقادیر ثابت در مدل TPM



شکل (ب - ۱۱) الاستیسیته میانگین متغیرهای تصادفی در مدل TPM



شکل (ج - ۱۱) الاستیسیته انحراف معیار متغیرهای تصادفی در مدل TPM

جدول (۱) مشخصات متغیرهای تصادفی پایه

نام متغیر	منبع عدم قطعیت	تابع توزیع احتمال	میانگین	انحراف معیار
B_{ga}	نیروی عضو	نرمال	0.85	0.212
B_{hs}	تنش hot spot	لوگ نرمال	0.85	0.17
B_k	عدم قطعیت فیزیکی SIF	لوگ نرمال	0.8	0.12
V_D	عدم قطعیت مدل SIF	مستطیلی	1.0	0.05774
a_0	نقایص اولیه	لوگ نرمال	0.73 (mm)	0.78 (mm)
C	ثابت پاریس	لوگ نرمال	4.5×10^{-12}	1.6×10^{-12}
G	تنش آستانه	لوگ نرمال	7.6	0.76

جدول (۲) مشخصات اتصالات مورد مطالعه

اتصال	$D_{(mm)}$	$d_{(mm)}$	$t_{(mm)}$	$T_{(mm)}$	β	τ	γ
T	914	417	16	32	0.5	0.5	14.281
Y	457	324	12.5	16	0.709	0.7825	14.281

جدول (۳) مشخصات حالات دریا و طیف تنش حاصل از آن

Sea state	Sea state parameters			Stress reponse parameters			
	Significant wave Height (m)	Mean zero crossing period	Fraction of time	R. M. S (σ) (<Pa)	Irregul arity factor (I)	Band width ϵ	Peak rate v_m (H _r)
1	16.01	17.3	0.0000368	47.65	0.512	0.859	0.2440
2	14.48	16.5	0.0000932	41.31	0.539	0.842	0.247
3	12.96	15.8	0.00037	35.17	0.565	0.825	0.2500
4	11.43	14.7	0.0022	29.79	0.610	0.793	0.2536
5	9.9	13.6	0.0073	20.81	0.657	0.754	0.2573
6	8.38	12.7	0.0135	15.89	0.699	0.715	0.2602
7	6.86	11.6	0.0265	10.51	0.752	0.659	0.2639
8	5.33	10.3	0.060	7.68	0.815	0.580	0.2676
9	3.81	9.1	0.21	3.86	0.869	0.496	0.2710
10	2.28	7.67	0.49	2.33	0.922	0.388	0.2748
11	0.76	4.4	0.19	1.69	0.988	0.152	0.2830

مراجع

- [1] Paris P. and Erdogan F. "A critical analysis of crack propagation law, Journal of Basic Engineering Trans. ASME, Vol 85, (1963).
- [2] Aaghakouckak A., Glinka G., and Dharmavasan S. "A load shedding model for fracture mechanics analysis of fatigue cracks in tubular joints" Proceedings of the 8th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 1989, pp. 159-165.
- [3] Kirkemo F. "Application of Probabilistic fracture mechanics to offshore structures", APPI Mech. Rev. 4, No. 2, Feb 1988.
- [4] Newman J.C., and Raju I.S. "An empirical stress intensity factor equation for the surface cracks" Engineering Fracture Mechanics, Vol 115, No.2, 1981, pp. 185-192.
- [5] Rhee H.C, Han S., and Gipson G. S., "Reliability of solution method and empirical formulas of stress intensity factors for weld toe cracks of tubular Joints" OMAE 1991, pp. 441-452.
- [6] P. Smedley, and P. Fisher, "Stress concentration factors for simple tubular joints" Lloyd's Register of shipping. London, U.K. OD/TN/95001/1996.
- [7] MTD (The Marine Technology Directorate Limited) publication, Doc. No. 92/100, (1992).
- [8] Madsen H. O, Krenk S. and Lind N. C., "Methods of Structural Safety" Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [9] Wirsching P.H. "Fatigue under wide band random stress, Journal of the Structural Division, American society of Civil Engineering, 1980, 98, July. pp. 1593-1606.