

# ضرایب تمرکز تنش در اتصالات چندصفحه ای TT و XX مقاطع مستطیلی توخالی

سیدحسین حسینی حصارى

فارغ التحصیل کارشناس ارشد سازه - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد رضا بهارى

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۱/۲۳، تاریخ تصویب ۸۱/۴/۱۵)

## چکیده

برای تعیین عمر خستگی اتصالات در سازه هایی که تحت اثر بارهای تکراری قرار دارند، نیاز به تعیین ضرایب تمرکز تنش می باشد. تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه اتصالات چندصفحه ای<sup>۱</sup> مقاطع مستطیلی صورت گرفته است، بطوریکه روش متداول طراحی خستگی این اتصالات براساس بررسی صفحه ای این اتصالات و استفاده از بیشترین ضریب تمرکز تنش بدست آمده اتصال صفحه ای<sup>۲</sup> معادل می باشد. لذا در این مقاله اتصال به روش اجزاء محدود و اثر عضو مهباری<sup>۳</sup> خارج از صفحه ای در ضرایب تمرکز تنش اتصالات چند صفحه ای TT و XX ساخته شده از مقاطع مستطیلی توخالی بررسی می شود. در ادامه تاثیر پارامترهای مختلف در ضرایب تمرکز تنش اتصالات چندصفحه ای TT و XX بحث و بررسی شده است.

**واژه های کلیدی:** خستگی، اتصالات مقاطع توخالی مستطیلی، تنش بحرانی، ضریب تمرکز تنش

## مقدمه

۳ - این مقاطع نسبت به مقاطع باز دارای سطوح نمایان کمتری هستند که این امر باعث کاهش سطوح رنگ کاری و سطوح در معرض خوردگی و آتش سوزی می شود.  
۴ - این مقاطع در مقابل نیروهای هیدرودینامیکی پسا<sup>۵</sup> (نیروهای بازدارنده) کمترین مقاومت را از خود نشان میدهد.

۵ - نسبت مقاومت به وزن این مقاطع بالا می باشد. از آنجایی که این مقاطع بیشتر در سازه هایی کاربرد دارند که تحت بارهای متناوب قرار دارند، این خود اهمیت کنترل خستگی را در این مقاطع نمایان می سازد. خستگی معمولاً در محلهایی از سازه که دارای ناپیوستگی می باشند موجب بروز ترک می شود. بحرانی ترین ناپیوستگی سازه ها، تقاطع ها و اتصالات می باشند. در این اتصالات اغلب از جوش استفاده می شود که خود مستعدترین ناحیه تمرکز تنش و شروع ترک خستگی است. مهمترین عامل در شناخت رفتار خستگی،

سازه های متشکل از اعضاء لوله ای با مقاطع دایره ای و مستطیلی به مقیاس وسیع در سازه های دریایی و ساحلی، خرپاهای فضاکار، دکل های مخابراتی و انتقال نیرو، سازه باربر جرثقیل ها، منابع هوایی فلزی، خرپاها و تیرهای ویراندل بکار برده می شوند. مقاطع توخالی<sup>۴</sup> (HS) بسیار اقتصادی اند و استفاده از آنها در عمل به دلایل متعددی بر مقاطع باز ارجحیت دارد که بعضی از این موارد عبارتند از:

۱ - مقاومت بالای مقاطع توخالی در مقابل پیچش، از کماتش جانبی آنها جلوگیری می کند. این عامل به همراه اتصالات جوش نیمه گیردار در خرپاها موجب می شود که طول کماتش اعضاء خرپا بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ طول عضو باشد که این امر باعث افزایش مقاومت کماتشی عضو می شود.  
۲ - ممان مقطع کمینه این مقاطع نسبت به مقاطع باز بیشتر است که این عامل نیز در طرح اعضاء فشاری بسیار مهم می باشد.

محاسبه می شود که مجموع آن در تنش های بحرانی مختلف وارده به عنوان میزان خسارت اتصال و عکس آن بیان کننده میزان عمر خستگی اتصال می باشد.

روش مشخصه خود به چند روش دیگر تقسیم می گردد:

۱- تحلیل خستگی براساس تنش های اسمی (روش کلاسیک طبقه بندی)

۲- تحلیل خستگی براساس روش نقاط بحرانی<sup>۱</sup> (روش شرح داده شده در فوق)

۳- روش تنش های محلی درز

روش مشخصه و روش طیفی هر دو براساس منحنی های  $S_r-N$  می باشند. روش دیگر که پیچیده است، روش مکانیک شکست است که براساس قاعده Paris استوار است که نرخ رشد ترک خستگی را براساس ثابتهای مصالح و ضریب شدت تنش بیان می کند.

آیین نامه های طراحی نمودارهای  $S_r-N$  گوناگونی را ارائه کرده اند که حد گسیختگی، ضرایب تصحیح ضخامت، اثر بهبود پروفیل جوش و تعداد سیکلهای گسیختگی موجب تفاوت آنها شده است.

جدول زیر نشان دهنده معادلات نمودارهای  $S_r-N$  در آیین نامه API [۱] و AWS [۲] است.

جدول ۱: معادله منحنی های  $S_r-N$  آیین نامه های API و

AWS

معادله	گراف
$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{S_{r.h.s.}}{100} \right)^{-4.38}$	AWS-X <sub>1</sub> و API-X
$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{S_{r.h.s.}}{79} \right)^{-3.74}$	AWS-X <sub>2</sub> و API-X'

شکل (۱) نمودارهای  $S_r-N$  آیین نامه های مختلف برای اتصالات مقاطع توخالی مستطیلی با ضخامت  $t=25$  میلیمتر را نشان می دهد.

### تمرکز تنش در اتصالات مقاطع توخالی

تنش ها و کرنش های بحرانی اغلب در نقاط بحرانی گوشه مقطع اعضا واقع در محل اتصال و عموماً در گوشه جوش بوجود می آیند. تنش و کرنش های بحرانی

ضرایب تمرکز تنش می باشند. بنابراین برای شناخت تحلیل خستگی بایستی به بررسی ضرایب تمرکز تنش پرداخته شود که خود متأثر از نوع و هندسه اتصال و همچنین نوع بارگذاری می باشند. عمر خستگی اتصالات اغلب از روش مشخصه محاسبه می شود که در آیین نامه ها براساس نمودارهای  $S-N$  ارزیابی می شود بطوری که عمر خستگی تمامی اتصالات یک سازه باید از عمر خستگی کل سازه بیشتر باشد.

### آنالیز خستگی

تحلیل خستگی به موارد زیر بستگی دارد:

۱- دامنه تنش های اسمی  $(S_r = \sigma_{max} - \sigma_{min})$  و

$$R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$$

۲- ضرایب تمرکز تنش (SCF) که خود وابسته به مشخصات و پارامترهای هندسی اتصال است.

۳- منحنی های  $S_r-N$

۴- روشهای ساخت و نحوه جوشکاری

برای تعیین عمر خستگی اتصالات مقاطع توخالی

دو روش کلی وجود دارد:

۱- روش مشخصه<sup>۶</sup>

۲- روش<sup>۷</sup>

روش مشخصه، روشی کاربردی و عمومی می باشد که براساس قاعده Palmgren - Miner قرار دارد و در آن میزان خسارت خستگی بصورت تجمعی خطی بیان می شود.

$$D = \sum_{i=1}^k \left( \frac{n}{N} \right)_i \leq 1$$

(۱)

که در آن:

$D$ : میزان خسارت اتصال

$n$ : تعداد سیکلهای تنش وارده

$N$ : تعداد سیکل قابل تحمل اتصال در تنش وارده

در این روش نسبت تعداد سیکلهایی که بار با

دامنه تنش بحرانی<sup>۸</sup> داده تنش اسمی  $\times$  ضرایب تمرکز تنش) وارد می شود. منحنی های  $S_r-N$  آیین نامه ها خوانده شده و نسبت آن به تعداد دفعات مجاز قابل تحمل

اسمی در عضو مهارى تعريف مى گردد [۳].

$$SCF = \frac{S_{rhs}}{S_{rnom}} \quad (2)$$

به همین ترتیب ضرایب تمرکز کرنش به این صورت تعريف مى گردند:

$$SNCF = \frac{\epsilon_{rhs}}{\epsilon_{rnom}} \quad (3)$$

که در این روابط:

$\epsilon_{rhs}$  و  $S_{rhs}$ : دامنه کرنش و تنش بحرانی

$\epsilon_{rnom}$  و  $S_{rnom}$ : دامنه کرنش و تنش اسمی در عضو

مهارى

نسبت  $SCF$  و  $SNCF$  بین ۰/۶ تا ۱/۴ متغیر است ولی طبق مطالعات پنجه شاهی [۴] و Wingerde [۵] و Frater [۶]، این نسبت برای اتصالات مقاطع مستطیلی برابر ۱/۱ می باشد یعنی:

$$SCF = 1.1 SNCF \quad (4)$$

در اتصالات چندصفحه ای برای هر عضو مهارى بایستی مقدار  $SCF$  جداگانه محاسبه گردد.

### روابط پارامتریک برای محاسبه مقادیر $SCF$

برای محاسبه ضرایب تمرکز تنش در مقیاس وسیع که در طراحی قابل استفاده باشد، نیاز به استفاده از روابط پارامتریک می باشد. در این زمینه می توان به نتایج آزمایشگاهی و تحلیلهای اجزاء محدود Wingerde [۵] اشاره کرد. وی فرمول عمومی زیر را برای اتصالات صفحه ای مقاطع مستطیلی ارائه کرده است:

$$SCF = f_1(\tau), f_2(\beta) 2\gamma f_3(\beta) \quad (5)$$

برادران Soh [۷] نیز فرمولهایی را برای اتصالات صفحه ای T شکل مقاطع مربعی ارائه کرده اند که شکل کلی این فرمول به صورت زیر است:

$$SCF = K\alpha^{n1}\beta^{n2}\gamma^{n3}\tau^{n4} \quad (6)$$

بوجود آمده در اتصالات مقاطع توخالی اغلب متأثر از عوامل زیر می باشند:

۱ - هندسه عمومی اتصال که به صورت پارامترهای هندسی  $\alpha = \frac{2l_0}{b_0}$ ،  $\beta = \frac{b_l}{b_0}$ ،  $2\gamma = \frac{b_0}{t_0}$  و  $\tau = \frac{t_l}{t_0}$  در معادلات پارامتری وارد می شود.

۲ - شکل و نوع جوش

۳ - شرایط گرده جوش (شکافهای ناشی از جوشکاری در فلز میناء، زاویه بین جوش و فلز میناء و ...)

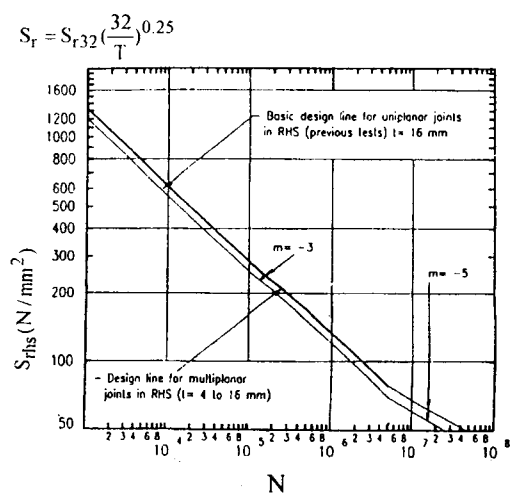
۴ - نوع بارگذاری که می تواند کششی، فشاری، خمشی درون صفحه ای یا برون صفحه ای باشد.

در مطالعات خستگی اتصالات مقاطع توخالی تنش مورد استفاده، دامنه تنش بحرانی اندازه گیری شده در مجاورت گرده جوش می باشد که معمولاً به یکی از روشهای زیر حاصل می شود:

۱ - اندازه گیری کرنش در سطح بیرونی مقاطع اعضاء یک اتصال توسط کرنش سنج.

۲ - محاسبه تنش یا کرنش با استفاده از تحلیلهای اجزاء محدود.

۳ - روش فتوالاستیک با مدل‌های پلاستیک



شکل ۱: منحنی های طراحی  $S_r - N$  آیین نامه DEn برای اتصالات صفحه ای و چند صفحه ای RHS [۲۳].

### ضرایب تمرکز تنش و کرنش

ضرایب تمرکز تنش ( $SCF$ ) بصورت نسبت دامنه تنش های بحرانی در محل اتصال به دامنه تنش های

است و همچنین با عنایت به افزایش کارایی برنامه های تحلیلی و انعطاف پذیری آنها با شرایط عملی و همچنین مشکلات موجود در ساخت نمونه های آزمایشگاهی، علاقه مندی برای انجام تحلیل های عددی افزایش یافته است. ولی باید دقت نمود که به دلایلی از جمله استفاده از انواع مختلف المان، تعداد المان و شکل مش بندی، شرایط مرزی، وجود و یا عدم وجود مدل جوش، نوع المان مورد استفاده برای مدلسازی جوش و مرتبه انتگرال گیری تفاوتی در مقادیر نتایج به چشم می خورد که لازم است با اصلاح این پارامترها به مدل منطبق با شرایط آزمایشگاهی رسید به عبارت بهتر باید مدل تحلیلی را کالیبره نمود.

از میان برنامه های تجاری موجود طبق تحقیقات Dexter برنامه ANSYS [۱۱] نسبت به سایر برنامه ها انعطاف پذیرتر و آسانتر می باشد [۱۲]. با لحاظ کردن قابلیت بسیار بالای این برنامه در ساختن سطوح فضایی و ترکیب و مش بندی آنها که در عین سهولت نسبی انجام می شود، استفاده از این برنامه ترجیح داده شده است.

در این مطالعه با استناد به تحقیقات پارامتری وسیع از جمله مطالعات Lee [۱۳] و Lee & Wilmschurst [۱۴، ۱۵] و Dexter و همکاران [۱۶] از المان پوسته ای<sup>۹</sup> ۴ گرهی با ۶ درجه آزادی در هر گره استفاده شده است.

محققین مختلف در تحقیقات خود برای مدلسازی جوش در اتصالات مقاطع توخالی از روشهای گوناگونی استفاده کرده اند :

۱- تقریباً تمامی محققین عدم مدلسازی جوش را در مقاومت نهایی اتصالات صفحه ای بی تاثیر دانسته اند [۱۱].

۲- برخی از محققین از جمله Davies و همکاران [۹]، Romeign [۱۷] و Wingerde [۵] جوش را با المانهای حجمی<sup>۱۰</sup> مدلسازی کرده اند

۳- محققین دیگری از جمله Lee [۱۲] و VanderVegte [۱۸] نیز از المانهای پوسته ای که نسبت به المانهای حجمی بمراتب ساده ترند برای

همانطور که ذکر شد این معادلات برای اتصالات صفحه ای ارائه شده اند و تحقیقات برای دستیابی به فرمولهایی جهت محاسبه SCF در اتصالات چندصفحه ای این مقاطع ادامه دارد که از تلاشهای صورت گرفته می توان به تحقیقات پنجه شاهی [۴] و Koning و همکاران [۸] اشاره کرد.

## تحلیل تمرکز تنش در اتصالات چندصفحه ای مقاطع مستطیلی

از آنجایی که در عمل اتصالات مقاطع مستطیلی به صورت چندصفحه ای می باشند، لازم است ضرایب تمرکز تنش این اتصالات تعیین شوند. روش متداول طراحی خستگی این اتصالات استفاده از نتایج آزمایشگاهی یا روابط ارائه شده برای اتصالات تک صفحه ای می باشد. بدین ترتیب که در هر مرحله اتصال در یک صفحه، بدون توجه به اثر اعضاء مهاری خارج آن صفحه مورد بررسی قرار می گیرد. همانطور که در ادامه نشان داده خواهد شد، در همه جا نمی توان از تاثیر عضو مهاری خارج از صفحه در رفتار اتصال خصوصاً ضرایب تمرکز تنش صرف نظر کرد. نتایج مطالعاتی که توسط Davies و همکاران [۹] و همچنین Yu و همکاران [۱۰] در زمینه تاثیر عضو مهاری خارج از صفحه بر مقاومت نهایی اتصال DTT صورت گرفته است حاکی از افزایش ۲۶ تا ۳۴ درصد مقاومت نهایی بدلیل در نظر گرفتن عضو مهاری خارج از صفحه می باشد.

## روش المان محدود

روشهای مختلفی توسط محققین برای تحلیل تمرکز تنش اتصالات چند صفحه ای ارائه شده است که عبارتند از :

۱- استفاده از روش آزمایشگاهی و تعیین کرنش بحرانی  
۲- اعمال ضرایب تصحیح بر روی نتایج اتصالات صفحه ای

۳- استفاده از روش المان محدود  
باتوجه به اینکه تحلیل های اجزاء محدود با هزینه بسیار کمتری نسبت به روشهای آزمایشگاهی قابل انجام

( $T_4$  و  $X_5$ ) مدلسازی گردید و با تغییر شبکه اعضاء در آن سعی گردید ضمن آنکه مقادیر SCF به مقدار ثابت همگرا می شود کمترین اختلاف را با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد. در ضمن برای بررسی میزان تاثیر بعد جوش در نتایج SCF، اتصال  $T_4$  یکبار با بعد جوش واقعی و سپس با بعد جوش توصیه شده توسط محققین که مورد بحث واقع شد مدلسازی گردید.

#### الف - مدلسازی $T_4$ با ابعاد جوش واقعی و تحت اثر نیروی محوری در عضو مهاري

اتصال  $T_4$  را با مشخصات هندسی مندرج در جدول (۲) مدل کرده و چگالی تعداد المان در پنج حالت بررسی شد که نتایج SCF بدست آمده در جدول (۳) آورده شده است. مطابق شکل (۲) مقادیر SCF با شبکه بندی دارای تعداد المان بیشتر از ۳۸۲۴ به مقدار ثابتی همگرا می شوند. رابطه تعداد المان و مدت زمان تحلیل (شکل (۳)) مبین این امر است که هرچه تعداد المان بیشتر باشد مدت زمان تحلیل نیز به صورت تصاعدی افزایش می یابد. بنابراین باتوجه به این که اختلاف SCF بدست آمده از مدل  $T_4-7$  و  $T_4-6$  کمتر از ۰/۲ درصد می باشد، لذا به نظر می رسد که استفاده از مدل  $T_4-6$  امری منطقی باشد. در شکل (۴) انواع مختلف مش بندی نشان داده شده اند.

#### ب - مدلسازی $T_4$ با ابعاد جوش فرضی تحت اثر نیروی محوری در عضو مهاري

از آنجایی که اتصال چندصفحه ای آزمایش شده بعد جوش ارائه نگردیده بود، در مطالعه عددی آنها طبق توصیه Lee و همکاران [۱۷] ابعاد جوش با المان  $w_0 = w_1 = t_1$  در نظر گرفته شد و جوش با المان پوسته ای به ضخامت معادل محاسباتی مطابق رابطه (۷) مدل گردید.

برای مدل  $T_4-6$  مقدار  $SCF=7.949$  می باشد که نسبت به مقدار بدست آمده از قسمت (الف) طبق جدول (۳) که در آن  $SCF=7.882$  بود، حدود ۳/۲ درصد اختلاف دارد که قابل توجه نمی باشد.

مدلسازی جوش استفاده کرده اند. صحت این روش با دقت بین ۴ تا ۹ درصد تایید شده است [۱۴،۱۵].

در این تحقیق نیز همانطور که ذکر شد از المانهای پوسته ای ۴ گرهی (Shell63 در برنامه ANSYS) استفاده شده است و برای ابعاد جوش نیز ابتدا ابعاد واقعی جوش در نظر گرفته شد. در ادامه با استناد به تحقیقات مبسوط Lee و همکاران [۱۹] که بهترین بعد جوش در مدلسازی با المان پوسته ای را معادل  $t_1$  (ضخامت عضو مهاري) یافتند، ابعاد جوش در دو عضو مهاري و اصلی برابر  $t_1$  در نظر گرفته شد که نتایج حاکی از سه درصد اختلاف نسبت به حالت اول (مدل ابعاد واقعی جوش) می باشد. ضمناً در هر دو حالت برای ضخامت المان پوسته ای جوش از روش معرفی شده توسط Koning و همکاران [۲۰] و Yu و همکاران [۲۱] استفاده شد.

آنها ضخامت المان پوسته ای مورد استفاده برای مدلسازی جوش را بر حسب مساحت جوش  $(a = \frac{w_0 \times w_1}{2})$  و طول گرده جوش  $(L = \sqrt{w_0^2 + w_1^2})$  آن مطابق رابطه (۷) محاسبه کردند که نتایج حاصله همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است:

$$t_w = \frac{a}{L} = \frac{w_0 \times w_1}{2\sqrt{w_0^2 + w_1^2}} \quad (7)$$

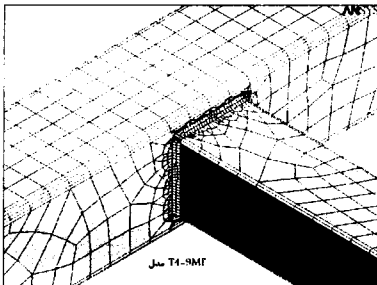
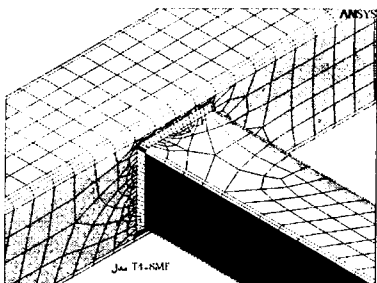
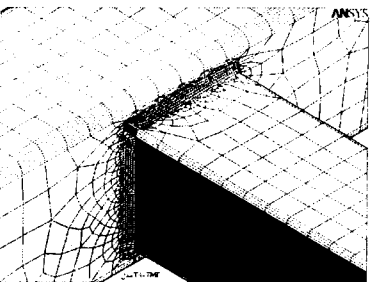
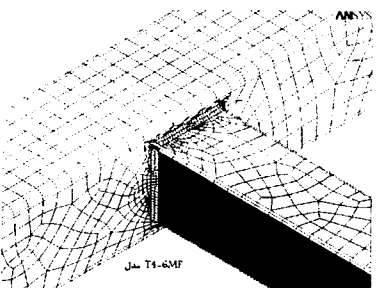
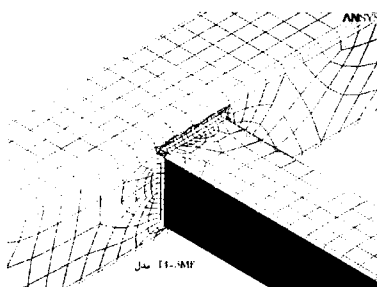
#### کالیبراسیون مدل

برای کالیبراسیون مدل تحلیلی صفحه ای نیز از نتایج آزمایشگاهی پروژه تحقیقاتی ECSC-CIDECT [۲۲] استفاده شده است. در تحلیلها از تنش های فون مسیز<sup>۱۱</sup> استفاده شده است.

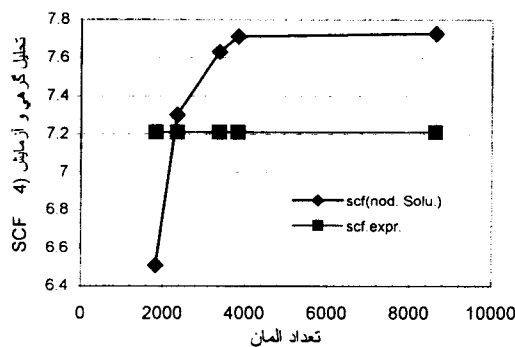
هندسه دو نمونه اتصال  $T_4$  و  $X_5$  که برای کالیبراسیون مدل تحلیلی انتخاب شده اند در جدول (۲) آورده شده است. بزرگترین SCF حاصل از آزمایش برای این دو اتصال به ترتیب ۷/۲۱ و ۹/۸۸ می باشد که هر دو در محل اتصال عضو مهاري و اصلی و در گوشه عضو مهاري اتفاق می افتد.

برای دستیابی به یک شبکه مناسب، دو اتصال مذکور

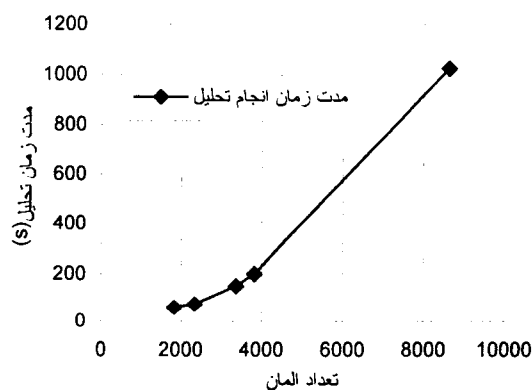
و  $X_{5-7}$  حدود ۰/۳ درصد می باشد که ناچیز بوده و می توان از ابعاد مش مدل  $X_{5-5}$  استفاده کرد.



شکل ۴: مش بندی در اتصال  $T_4$ .



شکل ۲: مقایسه نتایج SCF ناشی از تحلیل گرهمی و آزمایش برای اتصال  $T_4$ .



شکل ۳: مدت زمان CPU در مقابل تعداد المانهای مدل  $T_4$ .

ج - مدلسازی  $T_4$  با ابعاد جوش واقعی تحت اثر لنگر خمشی درون صفحه ای در عضو مهارتی

در این حالت نیز مدل  $T_{4-6}$  برای لنگر خمشی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج به قرار زیرند:

$$SCF = 5.06 \text{ حاصل از آزمایش}$$

$$SCF = 5.195 \text{ حاصل از تحلیل المان محدود}$$

ملاحظه می شود که مدل به خوبی در مقابل لنگر خمشی کالیبره شده است (۲٪ = درصد اختلاف).

د - مدلسازی  $X_5$  با ابعاد جوش واقعی تحت اثر نیروی محوری در اعضا مهارتی

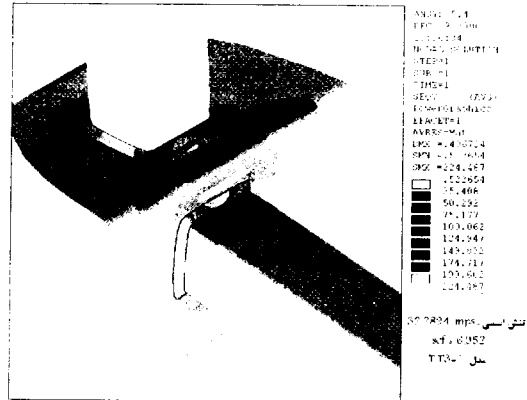
در این حالت اتصال  $X_5$  با چگالی های المان مختلف مدلسازی شد که نتایج این بررسی در جدول (۴) آورده شده است. ملاحظه می شود که اختلاف مدل  $X_{5-5}$  (که همان ابعاد مدل  $T_{4-6}$  در اتصال  $T_4$  را داراست)

جدول ۲: هندسه اعضا و ابعاد جوش نمونه های انتخاب شده جهت کالیبراسیون مدل اجزاء محدود.

نمونه ها	عضو اصلی						عضومهارى					
	b <sub>0</sub>	t <sub>0</sub>	L <sub>0</sub>	r <sub>0</sub>	W <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>
T <sub>4</sub>	۷/۲۰۰	۱۲/۸	۱۲/۰۰	۱۵/۴۴	۶/۰۵	۹۰۵۹	۱۴۰	۵	۷۰۰	۵/۹۸	۹/۸۶	۲۷۴۸
X <sub>5</sub>	۲۰۰/۶	۱۲/۶	۱۲۰۰	۱۵/۰۴	۴/۹۸	۹۳۲۰	۱۳۹/۸	۷/۸	۷۰۰	۱۰/۱۵	۹/۷۵	۴۲۳۲

### بررسی اتصالات چند صفحه ای TT مقاطع مستطیلی

ابتدا به بررسی میزان تاثیر عضو مهارى خارج از صفحه ای در مقادیر SCF می پردازیم وصحت و سقم روش متداول طراحی که از این عضو در مطالعات تمرکز تنش صرفنظر می کند، را مورد مطالعه قرار می دهیم. برای این منظور ۲ نمونه اتصال TT به همراه اتصالات معادل صفحه ای آنها را مدل می کنیم.



شکل ۵: کنتورهای تنش فون مسیز براساس تحلیل گرهی

تصال TT<sub>3-1</sub>

#### ۱- اتصال TT<sub>3-1</sub>

در این اتصال عضو اصلی به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰×۱۲/۸ میلیمتر و عضو مهارى دارای ابعاد ۸۰×۸۰×۵ میلیمتر بوده و L<sub>brace</sub> = ۴۰۰ و L<sub>chord</sub> = ۱۲۰۰ میلیمتر می باشند. شرایط مرزی دو انتهای عضو اصلی گیردار بوده و اعضا مهارى تحت اثر نیروی فشاری ۵۰ KN قرار می گیرد.

#### تنش اسمی عضو مهارى :

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{A} = \frac{50E3}{1548.496} = 32.29 \text{ MPa}$$

مطابق شکل (۵) تنش بحرانی براساس تحلیل گرهی و المانی مساوی است با:

$$\sigma_{h.s} = 224.487 \text{ MPa}$$

$$SCF = \frac{\sigma_{h.s}}{\sigma_{nom}} = 6.95$$

مطابق شکل (۶) تنش بحرانی برای اتصال T صفحه ای معادل TT<sub>3-1</sub> تحت عنوان T-13 مشخصات بارگذاری و شرایط مرزی مشابه برابر است با :

$$\sigma_{h.s} = 249.719 \text{ MPa}$$

$$SCF = \frac{249.719}{32.2894} = 7.734$$

### بررسی شرایط مرزی

برای بررسی تاثیر شرایط مرزی بر نتایج SCF اتصال T<sub>4</sub> را مورد بررسی قرار می دهیم. جدول (۵) نتایج این بررسی را نشان می دهد. با بررسی جدول (۵) چنین به نظر می رسد که شرایط مرزی گیردار کامل برای عضو اصلی (مدل T<sub>4-6</sub>) کمترین مقدار SCF و کمترین شرایط لازم جهت پایداری (مدل T<sub>4-6-2</sub>) بیشترین مقدار SCF را نتیجه می دهد. از طرفی اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار SCF در این جدول ۱/۲ درصد می باشد که ناچیز است و مبین تاثیر بسیار ناچیز شرایط مرزی بر مقادیر SCF است. از آنجایی که شرایط مرزی گیردار کامل موجب کاهش حجم محاسبات می شوند لذا در تحلیل اتصالات چند صفحه ای شرایط مرزی گیردار کامل برای انتهای عضو اصلی در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: نتایج آنالیز مدل‌های مختلف اتصال  $T_4$ .

مدل	ابعاد المانهای جوش	ابعاد کلی المانها (mm)	تعداد المانها	مدت زمان تحلیل (ثانیه)	SCF <sup>۱</sup> تحلیل گرهی	SCF <sup>۲</sup> تحلیل المانی	درصد اختلاف تحلیل المانی و گرهی	SCF آزمایشگاهی	درصد اختلاف تحلیل گرهی به آزمایش
T <sub>4-5</sub>	۲t <sub>۱</sub>	۴۰	۱۸۳۲	۶۱	۶/۵۰۹	۷/۹۱۸	۲۱/۶	۷/۲۱	-۹/۷
T <sub>4-8</sub>	۱/۵t <sub>۱</sub>	۴۰	۲۳۴۱	۷۵	۷/۳۰۱	۷/۸۹۳	۸/۱		۱/۳
T <sub>4-9</sub>	t <sub>۱</sub>	۴۰	۳۳۶۸	۱۵۱	۷/۶۳۱	۷/۹۳۱	۳/۹		۵/۸
T <sub>4-6</sub>	t <sub>۱</sub>	۳۰	۳۸۲۴	۲۰۰	۷/۷۱۴	۷/۸۸۲	۲/۲		۷/۰
T <sub>4-7</sub>	$\frac{t_1}{2}$	۳۰	۸۶۲۵	۱۰۲۵	۷/۷۲۹	۷/۸۳۱	۱/۳		۷/۲

۱ - SCF بدست آمده از مولفه Nodal Solution

۲ - SCF بدست آمده از مولفه Element Solution

جدول ۴: نتایج آنالیز مدل‌های مختلف اتصال  $X_5$ .

مدل	ابعاد المانهای جوش (mm)	ابعاد کلی المانها (mm)	تعداد المانها	SCF تحلیل گرهی	SCF آزمایش	درصد اختلاف نتایج گرهی و آزمایش
X <sub>5-4</sub>	۲t <sub>۱</sub>	۴۰	۲۵۶۳	۱۰/۷۶۵	۹/۸۸	۹/۰
X <sub>5-6</sub>	۱/۵t <sub>۱</sub>	۴۰	۲۹۵۶	۱۰/۸۶۱		۹/۹
X <sub>5-5</sub>	t <sub>۱</sub>	۴۰	۳۶۵۲	۱۱/۰۵۶		۱۱/۹
X <sub>5-7</sub>	۰/۷۵t <sub>۱</sub>	۴۰	۴۸۹۱	۱۱/۰۸۳		۱۲/۲
X <sub>5-9</sub>	$\frac{t_1}{2}$	۴۰	۷۱۵۲	۱۱/۰۹۱		۱۲/۳

جدول ۵: نتایج SCF حاصل از شرایط مرزی مختلف بر روی مدل T<sub>4-6</sub>.

مدل	تنش اسمی اعمالی (MPa)	تنش بحرانی (MPa)	ضریب تمرکز تنش SCF	SCF/SCF <sub>T4-6</sub>	شرایط مرزی دو طرف عضو اصلی
T <sub>4-6</sub>	۱۸/۱۹۵	۱۴۰/۳۴۹	۷/۷۱۳۶	۱	دو طرف گیردار کامل
T <sub>4-6-1</sub>		۱۴۰/۳۵۷	۷/۷۱۴۰۴	۱/۰۰۰۰۶	دو طرف مفصل
T <sub>4-6-2</sub>		۱۴۲/۰۳۶	۷/۸۰۶۳۲	۱/۰۱۲۰۲	یک طرف مفصل، یک طرف غلطک
T <sub>4-6-3</sub>		۱۴۰/۳۵۳	۷/۷۱۳۸۲	۱/۰۰۰۰۳	یک طرف گیردار، یک طرف مفصل
T <sub>4-6-4</sub>		۱۴۱/۷۷۸	۷/۷۹۲۱۴	۱/۰۱۰۱۸	یک طرف گیردار، یک طرف غلطک



جدول ۶: نتایج SCF بدست آمده در اتصالات TT.

مدل	SCF بدست آمده از تحلیل چندصفحه ای	SCF بدست آمده از تحلیل صفحه ای معادل	$\frac{SCF_{Uniplanar}}{SCF_{Multiplanar}}$	SCF حاصل از فرمول های مرجع ۳	$\frac{SCF_{Formula}}{SCF_{Multiplanar}}$
TT <sub>3-1</sub>	۶/۹۵۲	۷/۷۳۴	۱/۱۱۲	۵/۹۳۵	۰/۸۵۴
TT <sub>4-5</sub>	۷/۰۰۵	۷/۸۵۷	۱/۱۲۲	۷/۰۰۵۴	۱/۰۰

جدول ۷: نتایج SCF بدست آمده در اتصالات XX.

مدل	SCF بدست آمده از تحلیل چندصفحه ای	SCF بدست آمده از تحلیل صفحه ای معادل	$\frac{SCF_{Uniplanar}}{SCF_{Multiplanar}}$	SCF <sub>Formula</sub>	$\frac{SCF_{Formula}}{SCF_{Multiplanar}}$
XX <sub>3-4</sub>	۵/۷۷۱	۸/۳۴۶	۱/۴۴۶	۵/۹۳۶	۱/۰۲۹
XX <sub>4-4</sub>	۵/۴۱۳۲	۸/۴۷۲	۱/۵۶۵	۷/۰۰۵۴	۱/۲۹۴

اگر  $N_1$  عمر سازه با فرض SCF معادل باشد و یادآوری می شود که در نظر نگرفتن عضو مهاری خارج از صفحه ای مقدار SCF را ۱۱/۲۵ درصد بیشتر برآورد می کند.

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{6.952}{7.734}\right)^{-4.38} = 1.6 \rightarrow N_1 = 1.6N_2 \quad (9)$$

یعنی در نظر نگرفتن عضو مهاری خارج از صفحه در اتصالات چندصفحه ای موجب می شود عمر خستگی حدود ۴۰ درصد کمتر برآورد گردد که این موضوع از لحاظ اقتصادی حائز اهمیت می باشد.

مطابق رابطه ارائه شده توسط Wingerde [۵] داریم:

$$SCF = (0.013 + 0.693\beta - 0.278\beta^2) 2\gamma^{(0.79 + 1.898\beta - 2.109\beta^2)} \quad (10)$$

که با توجه به پارامترهای این اتصال خواهیم داشت:

$$SCF = 5.936$$

### ۲- اتصال TT<sub>4-5</sub>

اتصال دوم دارای عضو اصلی به ابعاد ۱۲/۸×۲۰۰×۲۰۰ میلیمتر و عضو مهاری به ابعاد ۵×۱۰۰×۱۰۰ میلیمتر می باشد و شرایط بارگذاری و مرزی آن مشابه اتصال TT<sub>3-1</sub> می باشد. بنابراین تنش اسمی در عضو مهاری برابر است با:

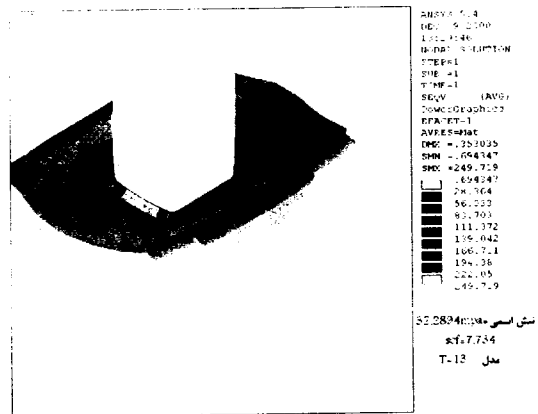
$$\sigma_{nom} = \frac{P}{A} = \frac{50E3}{1939.9115} = 25.7744 \text{ MPa}$$

تنش بحرانی نیز برابر است با:

$$\sigma_{rhs} = 185.6 \text{ MPa}$$

در نتیجه:

از مقایسه دو مقدار SCF بدست آمده فوق ملاحظه می شود که در نظر نگرفتن عضو مهاری خارج از صفحه ای مقدار SCF را ۱۱/۲۵ درصد بیشتر برآورد می کند.

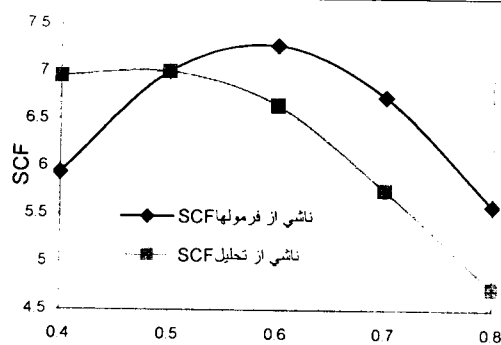


شکل ۶: کنتورهای تنش فون مسیز براساس تحلیل گرهی اتصال T<sub>13</sub>.

باتوجه به رابطه ارائه شده در جدول (۱) که توسط API [۱] برای تخمین عمر خستگی اتصال پیشنهاد شده است، تاثیر برآوردهای محافظه کارانه SCF در عمر خستگی بررسی می شود. برای این منظور مطابق رابطه ارائه شده برای نمودار API-X خواهیم داشت:

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{S_{rhs}}{100}\right)^{-4.38}$$

(۸)

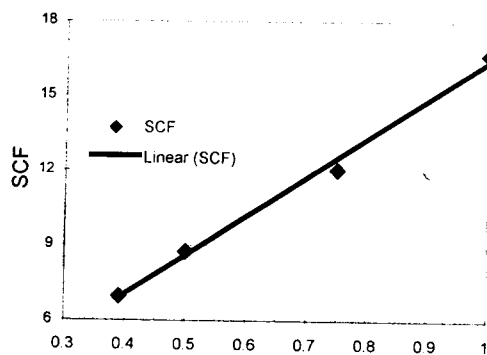


شکل ۷: تاثیر پارامتر  $\beta$  در مقادیر SCF اتصالات چند صفحه ای TT.

۴- بررسی تاثیر پارامتر  $\tau$  بر مقدار SCF اتصالات TT پارامتر  $\tau$  در مقایسه با پارامتر  $\beta$  در اتصالات صفحه ای از اهمیت کمتری برخوردار است بطوری که روابط پیشنهادی Wingerde [۵] برای خطوط A و E شامل پارامتر  $\tau$  نمی باشند. ولی در این مطالعه بررسیهایی که بر روی اتصال TT<sub>3-1</sub> با تغییر  $\tau$  از ۰/۳۹۱ تا ۱ صورت گرفته است شکل (۸) نشان می دهد که مقادیر SCF با افزایش  $\tau$  به صورت خطی افزایش می یابد. این موضوع با روابط پیشنهادی Soh [۷] برای محاسبه SCF همخوانی دارد.

$$[SCF = 0.2134\beta^{0.701} 2\gamma^{1.304} \tau^{1.003} \alpha^{-0.283}] \quad (11)$$

که در آن  $\tau$  مساوی ۱/۰۰۳ می باشد.



شکل ۸: تاثیر پارامتر  $\tau$  در مقادیر SCF اتصالات چند صفحه ای TT.

۵- تاثیر زاویه بین دو عضو مهاري ( $\theta$ ) بر مقدار SCF اتصالات TT

برای بررسی تاثیر زاویه بین دو عضو مهاري در

$$SCF = \frac{185.6}{25.77} = 7.00$$

مطابق تحلیل اتصال TT<sub>4-5</sub> که معادل صفحه ای اتصال TT<sub>4-5</sub> با شرایط مرزی و بارگذاری مشابه آن است داریم:

$$\sigma_{h.s} = 202521 \text{ MPa}$$

$$SCF = \frac{202.521}{25.7744} = 7.857$$

به روش دستی نیز از روابط Wingerde [۵] برای محاسبه SCF خواهیم داشت:

$$SCF = 7.00543$$

جدول (۶) نتایج تحلیل دو اتصال چند صفحه ای TT و مقایسه آن با نتایج تحلیل معادل صفحه ای و روابط پیشنهادی مرجع [۳] برای اتصال معادل صفحه ای را نشان می دهد.

مطابق این جدول به نظر می رسد که اختلاف قابل توجهی میان تحلیل چند صفحه ای و تک صفحه ای معادل اتصالات TT وجود ندارد، و می توان روش متداول را به صورت محافظه کارانه در مورد این اتصالات بکار برد.

۳- بررسی تاثیر پارامتر  $\beta$  در نتایج SCF اتصالات TT

برای بررسی تاثیر پارامتر  $\beta$  در مقادیر SCF با ثابت نگهداشتن ابعاد عضو اصلی (۲۰۰×۲۰۰×۱۲/۸) میلیمتر) عرض عضو مهاري را از ۸۰ میلیمتر تا ۱۶۰ میلیمتر تغییر داده و نتایج SCF مربوطه محاسبه می گردد.

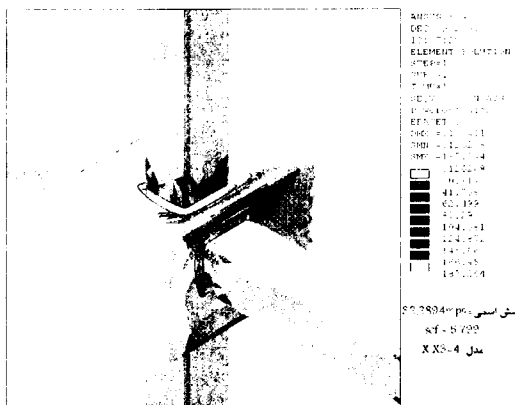
در شکل (۷) نحوه تغییرات SCF با مقدار پارامتر  $\beta$  برای اتصالات چند صفحه ای بدست آمده از تحلیل بهمراه مقادیر بدست آمده از روابط پیشنهادی Wingerde [۵] که برای اتصالات صفحه ای ارائه شده اند، رسم شده است. هر چند که به ازای  $\beta = 0.4$  اختلاف تحلیل با رابطه مرجع [۵] محسوس بوده و SCF مربوط به این تحلیل بزرگتر است، لیکن برای  $\beta > 0.5$  روند مشابه است و طبعاً برای محافظه کاری در طراحی مقادیر بیشتری توسط مرجع فوق داده شده است.

میزان SCF آنها نیز محاسبه می شود. اتصال اول موسوم به XX<sub>3.4</sub> با عضو اصلی ۱۲/۸×۲۰۰×۲۰۰ میلیمتر و عضو مهارى به ابعاد ۵×۸۰×۸۰ میلیمتر می باشد. روی انتهای هر ۴ عضو مهارى بار فشارى KN ۵۰ قرار داده می شود که معادل تنش اسمى فشارى MPa ۳۲/۲۸۹۴ می باشد. مطابق شکل (۱۰) تنش بحرانی بدست آمده برابر است با:

$$\sigma_{rth} = 186.35 \text{ MPa}$$

در نتیجه:

$$SCF = \frac{186.35}{32.2894} = 5.771$$



شکل ۱۰: کنتورهای تنش فون مسیز بدست آمده از تحلیل گرهی مدل XX<sub>3.4</sub>.

حال اتصال X<sub>15</sub> (اتصال صفحه ای معادل XX<sub>3.4</sub>) را مدلسازی و تحلیل می کنیم. مطابق شکل (۱۱) داریم:

$$\sigma_{rth} = 269.473 \text{ MPa}$$

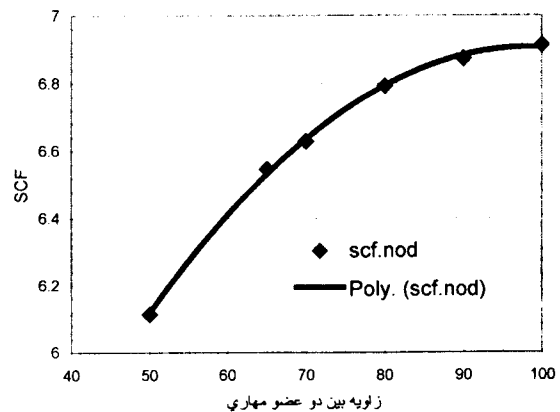
$$SCF = \frac{269.473}{32.2894} = 8.346$$

مقدار اخیر نسبت به مقدار واقعی آن که از تحلیل اتصال XX بدست آمده حدود ۴۵ درصد بیشتر می باشد که موجب می شود عمر سازه معادل  $\frac{1}{5}$  مقدار واقعی برآورد گردد.

اتصال دوم XX<sub>4.4</sub> را برای اطمینان از نتیجه گیری حاصله با عضو اصلی به ابعاد ۱۲/۸×۲۰۰×۲۰۰ میلیمتر و عضو مهارى ۵×۱۰۰×۱۰۰ میلیمتر مدلسازی می کنیم.

مقادیر SCF اتصال TT را با عضو اصلی ۱۲/۸×۲۰۰×۲۰۰ میلیمتر و عضو مهارى را با ابعاد ۵×۸۰×۸۰ میلیمتر مدل کرده و زاویه  $\theta$  از ۵۰ تا ۱۰۰ درجه تغییر داده شد. نتایج تحلیل در شکل (۹) نمایش داده شده است. ملاحظه می شود که در زوایای کم، SCF کمترین مقدار را داشته و با افزایش زاویه به صورت سهموی افزایش می یابد. دکل ها و خرپاهای فضایی سه محوره دارای SCF کمتری می باشند. مطابق شکل در زوایای بیش از ۹۰ درجه بین اعضای مهارى مقدار SCF تقریباً ثابت می ماند یعنی خرپاهای فضایی چهار پایه یا بیشتر دارای SCF یکسانی اند.

طبق این شکل و فرمولهای جدول (۱) چنین نتیجه گیری می شود که عمر خستگی اتصال سازه سه پایه ۲۷ درصد بیشتر از عمر خستگی اتصال سازه چهار پایه می باشد.



شکل ۹: تاثیر زاویه  $\theta$  بر مقادیر SCF اتصالات TT.

## بررسی اتصالات چندصفحه ی XX

همانند اتصالات TT ابتدا به بررسی میزان تاثیر اعضاء مهارى خارج از صفحه در مقادیر SCF پرداخته و متعاقباً تاثیر پارامترهای  $\beta$  و  $\tau$  در مقادیر SCF بررسی می شود.

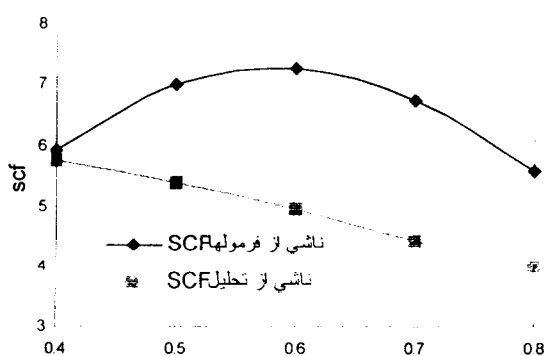
### ۱- بررسی تاثیر اعضاء مهارى خارج از صفحه ای در مقادیر SCF

در این قسمت نیز دو اتصال XX را مدنظر قرار داده و پس از تحلیل و بدست آوردن میزان SCF، اتصالات X صفحه ای معادل آنها را مدلسازی کرده و

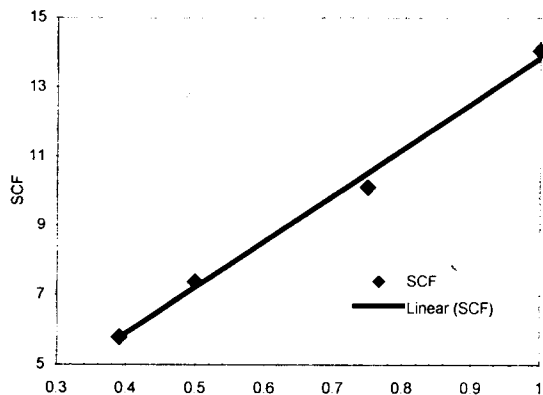
عرض مهار نسبت به عضو اصلی از مقدار تمرکز تنش کاسته می شود.

### ۳- بررسی تاثیر پارامتر $\tau$ در مقادیر SCF اتصالات XX

در این قسمت اتصال XX3.4 را مدنظر قرار داده و ضمن ثابت نگهداشتن بقیه پارامترها و ابعاد مقدار  $t$  از ۵ تا ۱۲/۸ میلیمتر ( $\tau = 0.391 \rightarrow 1.0$ ) تغییر داده و برای هر کدام مقدار SCF محاسبه گردید. نتایج نشان دهنده رابطه خطی SCF با  $\tau$  می باشد که در شکل (۱۳) نشان داده شده است و همخوانی خوبی با روابط پیشنهادی [۷] Soh دارد.



### شکل ۱۲: تاثیر پارامتر $\beta$ در مقادیر SCF اتصالات XX



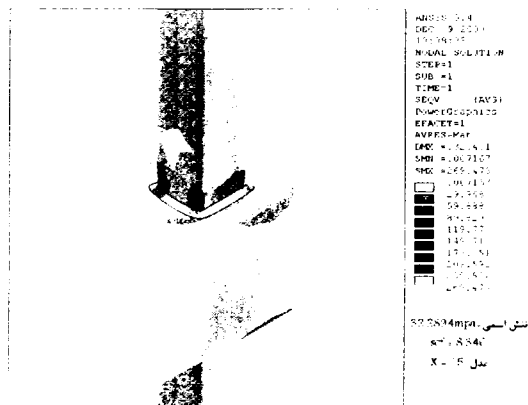
### شکل ۱۳: تاثیر پارامتر $\tau$ در مقادیر SCF اتصالات XX

## نتیجه گیری و پیشنهادات

در حال حاضر مهندسين به منظور بررسی پدیده خستگی و تعیین عمر اتصالات چندصفحه ای آنها را به چند اتصال صفحه ای معادل تقسیم کرده و ضمن بررسی جداگانه آنها بیشترین مقدار ضریب تمرکز تنش در میان

نتایج در جدول (۷) خلاصه شده اند.

جدول (۷) مؤید آن است که در نظر نگرفتن اعضاء مهاری خارج از صفحه ای در اتصالات XX اثر قابل ملاحظه ای بر مقدار SCF خواهد داشت تا جایی که عمر خستگی اتصال حدود  $\frac{1}{5}$  تا  $\frac{1}{7}$  مقدار واقعی برآورد می شود که این امر موجب غیر اقتصادی شدن طرح می شود.



شکل ۱۱: کنتورهای تنش فون مسیز بدست آمده از تحلیل

گرهی مدل X.15.

### ۲- بررسی تاثیر پارامتر $\beta$ در مقادیر SCF اتصالات XX

برای بررسی تاثیر پارامتر  $\beta$  در مقادیر SCF اتصالات XX را با ثابت نگهداشتن ابعاد عضو اصلی مهاری ( $t = 5$  میلیمتر) و تغییر عرض مقطع عضو تحلیل گردیدند. نتایج حاصله در شکل (۱۲) نمایش داده شده اند.

به منظور مقایسه نتایج تحلیلی بدست آمده با مقادیر بدست آمده برای اتصال صفحه ای معادل، SCF بدست آمده از فرمولهای Wingerde [۵] برای اتصالات صفحه ای برحسب پارامتر  $\beta$  در همین شکل رسم شده است.

به نظر می رسد رابطه پیشنهادی مراجع [۵،۲۳] که در آن تاثیر  $\beta$  نمایی بوده و در  $\beta = 0.6$  بیشترین تمرکز تنش را ارائه می دهد با نتایج تحلیلی این مقاله همخوانی ندارد. بطوریکه رابطه SCF با  $\beta$  تقریباً خطی است و با افزایش

ثابت باقی می ماند. پایه های ۳ محوره دارای SCF کمتری در اتصالات خود نسبت به سازه های نظیر چهار پایه یا بیشتر می باشند.

- برای نیل به نتیجه گیریهای مطمئن تر و ارائه روابط چند متغیره که در برگیرنده تاثیرات پارامترهای مختلف اتصالات باشد باید مطالعه ارائه شده در این مقاله گسترش یابد و دامنه پارامترها کوچکتر گردد. لذا نتیجه گیریهای فوق را می توان کیفی تلقی نمود.

### فهرست علائم

- $b_1$ : عرض عضو مهاري
- $b_0$ : عرض عضو اصلي
- $t_1$ : ضخامت جداره عضو مهاري
- $t_0$ : ضخامت جداره عضو اصلي
- $L_1$ : طول عضو مهاري
- $L_0$ : طول عضو اصلي
- $W_1$ : بعد جوش در عضو مهاري
- $W_0$ : بعد جوش در عضو اصلي
- $\theta$ : زاويه بين محور دو عضو مهاري در اتصالات TT
- $S_{h,s}$ : تنش بحراني
- $\sigma_{rhs}$ : دامنه تنش بحراني
- $\sigma_{nom}$ : تنش اسمي
- $S_r$ : دامنه تنش اسمي
- $R$ : نسبت تنش ها
- SCF: ضريب تمرکز تنش
- SNCF: ضريب تمرکز تنش

آنها را مبنای محاسبات عمر خستگی قرار می دهند. در این تحقیق دو اتصال TT و XX با مقاطع مستطیلی مطالعه و با اتصالات معادل صفحه ای خود مقایسه گردیدند که خلاصه نتایج به شرح زیر می باشند:

- در محدوده پارامترهای مطالعه شده به نظر می رسد مقادیر SCF اتصالات TT ناشی از تحلیل چند صفحه ای و روش متداول (بررسی صفحه ای آن) اختلاف چندانی ندارد (حدود ۱۲ درصد) و باتوجه به سادگی روش متداول می توان آن را به صورت محافظه کارانه قابل قبول دانست.

- به نظر می رسد مقادیر SCF حاصل از تحلیل چندصفحه ای اتصالات XX حدود ۵۰ درصد کمتر از مقدار بدست آمده برای آنها از روش متداول طراحی می باشد که این امر موجب می گردد تا عمر خستگی اتصالات براساس روش متداول حدود ۱/۶ مقدار واقعی برآورد گردد که در ملاحظات اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

- در بررسی اثر  $\beta$  بر مقدار SCF متناظر با اتصالات XX ملاحظه می شود که بیشترین SCF در  $\beta = 0.5$  و کمترین آن در  $\beta = 1.0$  است. یعنی با افزایش  $\beta$  مقدار تمرکز تنش رو به کاهش می گذرد لذا حتی الامکان بهتر است عرض مقاطع اصلی و مهاري نزدیک به هم باشند.

- در بررسی اثر  $\tau$  بر مقدار SCF اتصالات XX ملاحظه می شود که با افزایش  $\tau$  مقدار SCF نیز به صورت خطی افزایش پیدا می کند. بنابراین بهتر است حتی الامکان این پارامتر پایین نگهداشته شود.

- مقدار SCF در اتصالات T با زاویه بین دو عضو مهاري مساوی یا بیشتر از ۹۰ درجه بیشترین مقدار را داشته و

### مراجع

- 1 - API, (1991). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*. API Recommended Practice 2A (RP 2A), 19<sup>th</sup> Edition U.S.A.
- 2 - IIW, (1989). *Design recommendations for hollow sections Joints-predominantly statically loaded*. 2<sup>nd</sup> Edition, IIW Doc: XV-701-89.
- 3 - Dover, W. D. and Madhava Rao, A. G. (1996). *Fatigue in offshore structures*. Published by A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.

- 4 – Panjeh Shahi, E. (1994). *Stress and strain concentration factors of welded multiplanar joints between square hollow sections*. Delft University Press, The Netherlands.
  - 5 – Van Wingerde, A. M., (1992). “The fatigue behavior of T and X -joint made of square hollow section.” *HERON*, Vol. 37, No. 2.
  - 6 – Frater, G. (1991). *Performance of welded rectangular hollow structural section trusses*. University of Toronto, Canada.
  - 7 – Soh, A. K. and Soh, C. K. (1990). “A parametric stress analysis of T/Y and K square-to-square tubular joints.” *J. of Construct. Steel Res.*, No. 15, PP. 173-190.
  - 8 – Koning, C. H. M.de., Puthli, R. S., Wardenier, J. and Dutta, D. (1992). “Fatigue behavior of multiplanar welded hollow section joints and reinforcement measures for repair.” *Final Report, Research Program 7210 SA/114 of Commission of European Communities*.
  - 9 – Davies, G. and Crockett, P. (1996). “The Strength of welded T-DT joints in rectangular and circular hollow section under variable axial loads.” *J. Construct. Steel Res.*, Vol. 37, No. 1, PP. 1-31.
  - 10 – Yu, U., Liu, D. K., Puthli, R. S. and Wardenier, J. (1993). *Numerical investigation into the static behavior of multiplanar welded T-joints in RHS*. ISBN 0419187707.
  - 11 – ANSYS. Users Manual Swansea Analysis Systems Inc., 1995.
  - 12 – Lee, M. M. K. (1999). “Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements.” *J. of Construct. Steel Res.*, Vol. 51, PP. 265-286.
  - 13 – Lee, M. M. K., Dexter, E. M. and Kirkwood, M. G. (1995). “Strength of moment loaded tubular T/Y-joints in offshore platforms.” *The Structural Engineer*, Vol. 73, No. 15, PP. 239-246.
  - 14 – Lee, M. M. K. and Wilmshurst, S. R. (1996). “A parametric study of strength of tubular multiplanar KK-joints.” *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 8, PP. 893-904.
  - 15 - Lee, M. M. K. and Wilmshurst, S. R. (1997). “Strength of multiplanar KK-joint under anti-symmetrical loading.” *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 6, PP. 755-764,
  - 16 – Dexter, E. M., Lee, M. M. K. and Kirkwood, M. G. (1996). “Overlapped K-joints in circular hollow sections under axial loading.” *J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Transactions of ASME*, Vol. 118, No. 1, PP. 53-61.
  - 17 – Romeijn, A. (1994). “Stress and strain concentration factors of welded multiplanar tubular joints.” Delft University Press, The Netherlands.
  - 18 – Van der Vegte, G. J. (1994). “The static strength of axially loaded uniplanar and multiplanar tubular X-joints.” *HERON*, Vol. 39, No. 4, PP. 55-67.
  - 19 – Lee, M. M. K. and Wilmshurst, S. R. (1995). “Numerical modeling of CHS joints with multiplanar double-K configuration.” *J. of Construct. Steel Res.*, Vol. 32, PP. 281-301.
  - 20 – Koning, C. H. M. de., Liu, D. K., Puthli, R. S. and Wardenier, J. (1992). “The development of design methods for the cost-effective applications of multiplanar joints, experimental and numerical investigation on the static strength of multiplanar welded DX-and X-joints in R.H.S.” TNO-Bouw Report Netherlands.
-

- 21 – Yu, Y., Liu, D. K., Puthli, R. S. and Wardenier, J. (1993). “The development of design methods for the cost-effective applications of multiplanar joints, numerical investigation into the static strength of multiplanar welded T-joints in R.H.S.” TNO-Bouw Report Netherlands,
- 22 – Von Wingerde, A. M., Puthli, R. S., Koning, C. H. M. de., Verheul, A., Waradenier, J. and Dutta, D. (1989). “Fatigue strength of welded unstiffened R.H.S. joints in latticed structures and vierendeel girders.” Final Report, Part 1 “X-and T-joints.”

۲۳ – حسینی حصارى، س. ح. مطالعه تحلیلی ضرایب تمرکز تنش اتصالات چند صفحه ای مقاطع مستطیلی (RHS). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 – Multiplanar
- 2 – Uniplanar
- 3 – Brace
- 4 – Hollow Section
- 5 – Drag
- 6 – Deterministic Method
- 7 – Spectral Method
- 8 – Hot Spot
- 9 – Shell
- 10 - Solid
- 11 – Von Mises

