

ضرائب تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای چند صفحه‌ای TT و XX

محمدرضا بهاری

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

بابک کریم دادیان

کارشناس ارشد سازه دمای دریایی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۷/۱۲/۲۶، تاریخ تصویب ۷۸/۴/۲۶)

چکیده

به منظور تعیین عمر خستگی اتصالات و نتیجتاً عمر خستگی کل سازه نیاز به تعیین ضرائب تمرکز تنش در آن اتصالات می‌باشد. تاکنون تحقیقات بسیاری در مورد برآورد این ضرائب در اتصالات تک صفحه‌ای^۱ انجام گرفته است. بطوریکه در طراحی خستگی اتصالات چند صفحه‌ای^۲ اتصال را به شکل چند اتصال تک صفحه‌ای مجزا واقع در هریک از صفحات تشکیل دهنده در نظر گرفته و پس از تعیین ضریب تمرکز تنش و برآورد عمر خستگی هر کدام به طور جداگانه، کمترین عمر خستگی را به عنوان عمر خستگی کل آن اتصال در نظر می‌گیرند. در نظر نگرفتن اعضاء مهاری^۳ خارج صفحه در یک اتصال چند صفحه‌ای ممکن است جوابهای دست بلایی برای مقدار ضریب تمرکز تنش آن اتصال ارائه دهد. در این مقاله سعی گردیده است تا تفاوت مقدار این ضرائب در دو حالت با یا بدون در نظر گرفتن اعضاء مهاری خارج صفحه در مورد دو اتصال چند صفحه‌ای TT و XX با استفاده از روش اجزاء محدود ارزیابی و مورد بحث قرار گیرد و اعتبار روش متداول طراحی که در بالا توضیح داده شد درباره این دو اتصال چند صفحه‌ای بررسی گردد.

کلید واژه ها: اتصالات لوله‌ای، ضریب تمرکز تنش، خستگی، تنش بحرانی، سکوی فراساحل

مقدمه

۳ - نسبت مقاومت این مقطع به وزن آن بالا می‌باشد. مقاومت پیچشی آن نیز بیشتر است.

۴ - سختی و مقاومت خمشی آن در تمام جهات یکسان می‌باشد.

۵ - به علت توخالی بودن مقاومت بیشتری در برابر حریق دارا می‌باشند (این موضوع در سکوه‌ای دریایی با کاربری استخراج نفت حائز اهمیت است).

طراحی سازه‌ای یک سکوی دریایی متشکل از المانهای لوله‌ای شامل چندین بخش است که یکی از آنها آنالیز خستگی اتصالات آن سازه می‌باشد که به علت بارهای متناوب وارده (همانند بار موج) از اهمیت ویژه‌ای نسبت به طراحی دیگر سازه‌ها برخوردار است.

بخوبی مشخص شده است که بارهای وارده بر اتصالات باعث ایجاد تنش‌هایی در نقاط خاصی از طول جوش می‌شود که مقدار این تنش‌ها بسته به شکل هندسی اتصال چندین برابر بزرگتر از تنش‌های اسمی موجود در عضو اتصال است. به مرور زمان در اثر بارگذاری متناوب ترک‌هایی در قسمتهایی از محل اتصال مستقیم اعضاء (موسوم به نقاط بحرانی یا حاد که دارای تمرکز تنش هستند) ایجاد شده و گسترش می‌یابد که این پدیده را خستگی می‌نامند.

به ناچار هر کدام از اتصالات سازه سکو دارای یک عمر خستگی

سازه‌های فراساحل^۴ عمدتاً جهت مقاصد نفتی (اعم از استخراج و ارسال نفت یا اسکان کادر فنی) در دریا ساخته می‌شوند. هر حوزه نفتی متشکل از چندین سکوی مختلف با عماکردهای متفاوت می‌باشد که توسط پله‌های ارتباطی به یکدیگر متصل می‌شوند.

انواع سکوه‌ای دریایی شامل سکوه‌ای شابلونی^۵، سکوه‌ای وزنی، سکوه‌ای پایه کششی^۶ و سکوه‌ای خودبالابر^۷ و ... می‌باشند که در این مقاله به بحث و بررسی درباره ضرائب تمرکز تنش که برای محاسبات خستگی در سکوه‌ای شابلونی ضروری است پرداخته خواهد شد.

تنها مقاطع مورد استفاده در سازه ژاکت سکوه‌ای دریایی شابلونی مقاطع لوله‌ای می‌باشند. دلایل استفاده از این مقاطع در این نوع سازه‌ها به قرار زیر می‌باشد:

۱ - به علت صاف و بدون گوشه بودن این مقطع اثرات خوردگی محیط که در این سازه‌ها مهمترین مسئله می‌باشد، نسبت به دیگر مقاطع بسیار کمتر خواهد بود. زیرا که همیشه خوردگی در نقاط گوشه و نوک تیز سریعتر ایجاد شده و ادامه می‌یابد [۱۱].

۲ - ضرائب دراگ در این مقطع نسبت به دیگر مقاطع پروفیل‌های موجود کمتر می‌باشد.

1 - Uniplanar

2 - Multiplanar

3 - Brace

4 - Offshore Structure

5 - Template

6 - Tension Leg Platform

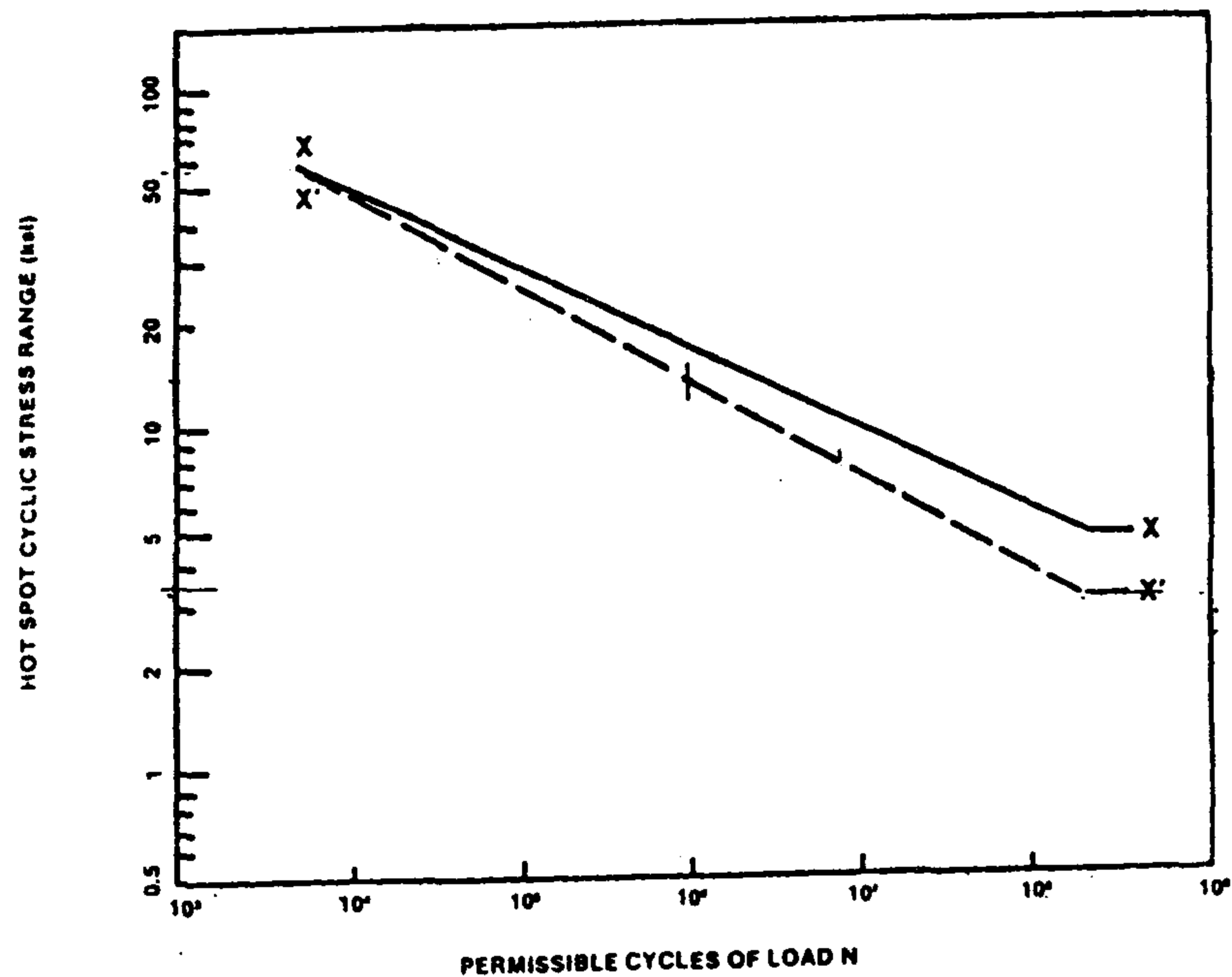
7 - Jack-Up

می‌باشند:

الف) اندازه‌گیری کرنش در خارجی‌ترین صفحه تقاطع اعضاء یک اتصال توسط کرنش سنج

ب) محاسبه تنش یا کرنش به شکل تئوریک به کمک تحلیل المان محدود

ج) روش فوتوالاستیک با مدل‌های پلاستیک



شکل ۱: منحنی S-N آیین نامه API.

ضرائب تمرکز تنش یا کرنش (SNCF, SCF)

ضریب تمرکز تنش یا کرنش^۵ بصورت نسبت دامنه تنش یا کرنش بحرانی اتصال به دامنه تنش یا کرنش اسمی در عضو مهاری تعریف می‌شود:

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

(ضریب تمرکز تنش)

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

(ضریب تمرکز کرنش)

که در آن:

S_{rhs} = تنش بحرانی (Hot Spot Stress) در اثر بارگذاری نوع r (خمشی یا محوری)

S_{nom} = تنش اسمی در عضو مهاری

ϵ_{rhs} = کرنش بحرانی

ϵ_{nom} = کرنش اسمی در عضو مهاری

$$S_{axial,nom} = \frac{F_{axial}}{A_x}$$

$$S_{opb,nom} = \frac{M_{opb}}{Z_z}$$

$$S_{ipb,nom} = \frac{M_{ipb}}{Z_y}$$

(۴)

مشخص و چندین ساله است که باید بزرگتر یا مساوی عمر مفید طراحی باشد.

تعیین عمر خستگی

آنالیز خستگی به دو روش زیر امکان پذیر است

۱- روش جزئی^۱

۲- روش طیفی^۲

معمولاً روش جزئی کاربردی تر از روش طیفی می‌باشد. با این حال آیین نامه API در موارد بسیار خاص روش جزئی را برای طراحی خستگی مجاز نمی‌داند.

در روش جزئی موج با ارتفاع های متفاوت که دارای دفعات وقوع متفاوت می‌باشند به سازه وارد می‌شود و با وارد شدن بار به سازه، برای هر ارتفاع یک تغییرات تنش براساس ماکزیمم و مینیمم تنش بدست می‌آید. سپس تغییرات تنش بدست آمده در ضرایب تمرکز تنش (SCF) ضرب می‌شود.

در مرحله بعد تغییرات تنش حاصله روی منحنی S-N برده شده و تعداد دفعات مجاز خوانده می‌شود که نمونه‌ای از منحنی S-N در شکل (۱) نشان داده شده است. سرانجام نسبت تعداد سیکلهایی که موج با ارتفاع خاص وارد می‌شود به تعداد دفعات مجاز خوانده شده از روی منحنی S-N حساب می‌شود و مجموع این نسبت برای ارتفاعات مختلف بدست می‌آید که به عنوان شاخص آسیب انباشتگی پالم‌گرن - ماینر^۳ طی رابطه زیر می‌باشد:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

و عکس نسبت آسیب، میزان عمر خستگی را می‌دهد. همانطور که مشخص است یکی از مهمترین پارامترهای پدیده خستگی در این روش ضرائب تمرکز تنش می‌باشند که موضوع موردنظر این مقاله است.

لازم به ذکر است که هر دو روش فوق مبتنی بر منحنی های S-N هستند ولی روش‌های دیگر برای تحلیل خستگی وجود دارند که بر مکانیک شکست استوارند که خارج از حوصله این مقاله هستند.

تعیین دامنه تنش یا کرنش بحرانی^۴

همانطور که مشخص است در یک اتصال، تنشی که برای طراحی خستگی می‌بایست استفاده گردد، دامنه تنش بحرانی در نوک جوش می‌باشد. تنش‌های بحرانی عمدتاً طبق روش‌های زیر تعیین می‌گردند که دو روش اول بیشتر مورد استفاده محققین

1 - Deterministic Method 2 - Spectral Method 3 - Palmgren-Miner Cumulative Fatigue Damage

4 - Hot Spot Stress or Strain 5 - Stress Concentration Factor

تمرکز تنش در اتصالات چند صفحه‌ای استفاده از مدل‌های المان محدود نمونه اتصال می‌باشد. در غیاب راهنمای استاندارد در روش‌های عددی، به علت استفاده از انواع متفاوت المان، تعداد و شکل شبکه‌بندی، شرایط مرزی و مدلسازی با یا بدون شکل جوش و مرتبه انتگرال‌گیری برای محاسبه انتگرال عددی المان، در محاسبه ضرائب تمرکز تنش (SCF) تفاوت‌هایی نمایان خواهد شد. در این مطالعه از نرم‌افزار اجزاء محدود عمومی ALGOR استفاده گردید که در طی آن برای مدل کردن اتصالات از المانهای پوسته‌ای^۲ ۴ گرهی (المان شماره ۶ در برنامه ALGOR) که در هر گره دارای ۶ درجه آزادی می‌باشند استفاده شده است. از طرفی جنس این المانها از فولاد استاندارد API-5LGr.B بوده و در تحلیلها تنش فون میسز (Von Mises) به کار گرفته شده است. برای یافتن بهترین مدل که نزدیکترین جوابها را به واقعیت ارائه دهد می‌بایست در ابتدا از یک یا چند نمونه آزمایشگاهی به عنوان مقایسه استفاده کرد و با تغییر پارامترهای موثر بر SCF و مقایسه جوابها با نتایج حاصل از آزمایش مناسبترین مدل را انتخاب نمود. بدین منظور از نمونه‌ها و نتایج آزمایشگاهی سازمان انرژی بریتانیا که توسط یک گروه تحقیقاتی بین سالهای ۱۹۸۵ تا ۱۹۸۶ انجام شد [۹]، و همچنین کمیته اروپایی فولاد (ECSC) استفاده گردیده است.

یک نمونه اتصال T شکل با نام نمونه 1.3 که در آن عضو اصلی "۰/۵" x ۲۰" معادل ۱۲/۷ x ۵۰۸ مم و عضو مهاري "۰/۵" x ۱۶" معادل ۱۲/۷ x ۴۰۶ مم با پارامترهای اتصال زیر از میان نمونه‌های آزمایشگاهی ذکر شده در مرجع [۹] انتخاب گردید:

$$\alpha = 8, \quad \beta = 0.8, \quad \gamma = 20, \quad \tau = 1$$

بزرگترین SCF حاصل از آزمایش نیز که در محل نشیمن عضو اصلی اتفاق می‌افتد به قرار زیر است:

$$SCF = 11.4$$

از طرفی در مورد اتصالات چندصفحه‌ای نیز از نتایج آزمایشگاهی کمیته ECSC ارائه شده در مرجع [۱۱] استفاده گردیده است. نمونه آزمایشگاهی انتخابی یک اتصال چندصفحه‌ای TT با مشخصات و پارامترهای هندسی زیر می‌باشد که نتیجه SCF حاصل از آزمایش نیز به دنبال آن ارائه گشته است.

$$D = ۳۶'' \text{ و } d = ۱۸'' \text{ و } T = ۱/۲۵''$$

$$\alpha = \frac{2L}{D} = ۱۰, \quad \beta = \frac{d}{D} = ۰/۵, \quad \gamma = \frac{D}{2T} = ۱۴/۳$$

$$\tau = ۰/۵$$

$$SCF = ۸/۱ \quad (\text{ضریب تمرکز تنش آزمایشگاهی})$$

در اتصالات چند صفحه‌ای این مقادیر برای هر عضو مه‌ری باید جداگانه محاسبه گردند [۳].

معادلات پارامتری محاسبه SCF

به منظور ارائه روشی مناسب برای محاسبه ضرائب تمرکز تنش جهت استفاده عملی در طراحی سازه‌های فراساحل، یکسری معادلات پارامتری ارائه شده‌اند (مانند معادلات کوانگ [۶] و معادلات وردزورث و اسمدلی [۱۶]، معادلات UEG [۱۴] و معادلات افتمیو [۴]). از طرفی باید توجه داشت که این معادلات پارامتری فقط در مورد اتصالات تک صفحه‌ای صادق بوده و برای اتصالات چند صفحه‌ای چنین معادلاتی موجود نمی‌باشد. البته در چند سال اخیر ضرائب تصحیحی توسط محققان برای تعیین SCF در اتصالات چند صفحه‌ای از روی SCF اتصال تک صفحه‌ای معادل آن ارائه گشته است [۵].

تحلیل تمرکز تنش در اتصالات چندصفحه‌ای

اتصالات لوله‌ای مورد استفاده در سازه‌های فراساحل معمولاً به شکل چند صفحه‌ای می‌باشند. این اتصالات از اعضای که در صفحات مختلف قرار گرفته‌اند تشکیل شده است.

روش متداول طراحی خستگی اتصالات چند صفحه‌ای، استفاده از نتایج آزمایشگاهی و معادلات ارائه شده برای اتصالات تک صفحه‌ای می‌باشد. بدین شکل که در هر مرحله اتصال در یک صفحه، بدون توجه به اثر اعضای مهاري خارج آن صفحه، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نرم‌افزارهای پیشرفته طراحی سازه‌های فراساحل همانند SACS [۱۲] نیز از این روش پیروی می‌کنند. مطالعه تاثیرات چند صفحه‌ای بودن اتصالات روی مقاومت استاتیکی آنها از اواسط دهه ۱۹۸۰ زمانی که یکسری اتصالات KK در ژاپن آزمایش گردید، شروع شد [۸]. با افزایش علاقه مندی در این موضوع تحقیقات بیشتری ادامه یافت.

برای اطلاعات بیشتر در مورد ضرائب SCF در اتصالات چند صفحه‌ای و مقایسه آنها با نتایج حاصل از روش متداول طراحی به مرجع [۱۷] مراجعه شود. این مقاله به بررسی دو نوع از اتصالات چندصفحه‌ای یعنی TT و XX تحت بارگذاری محوری عضو مهاري^۱ می‌پردازد.

روش المان محدود

همانطور که ذکر شد یکی از راههای عملی برای تعیین ضرائب

شبکه بندی مناسب^۱

همانطور که گفته شد به منظور تهیه یک شبکه مناسب در نمونه که جوابهای نزدیک به واقعیتی را ارائه دهد لازم است که یک اتصال نمونه را که نتایج SCF حاصل از آزمایش آن نیز موجود است به عنوان الگو در نظر گرفته و با تغییر شبکه بندی در آن به مقدار SCF واقعی نزدیک شویم. نمونه مورد نظر ما در بخش قبل به طور کامل توضیح داده شده است (نمونه 1.3).

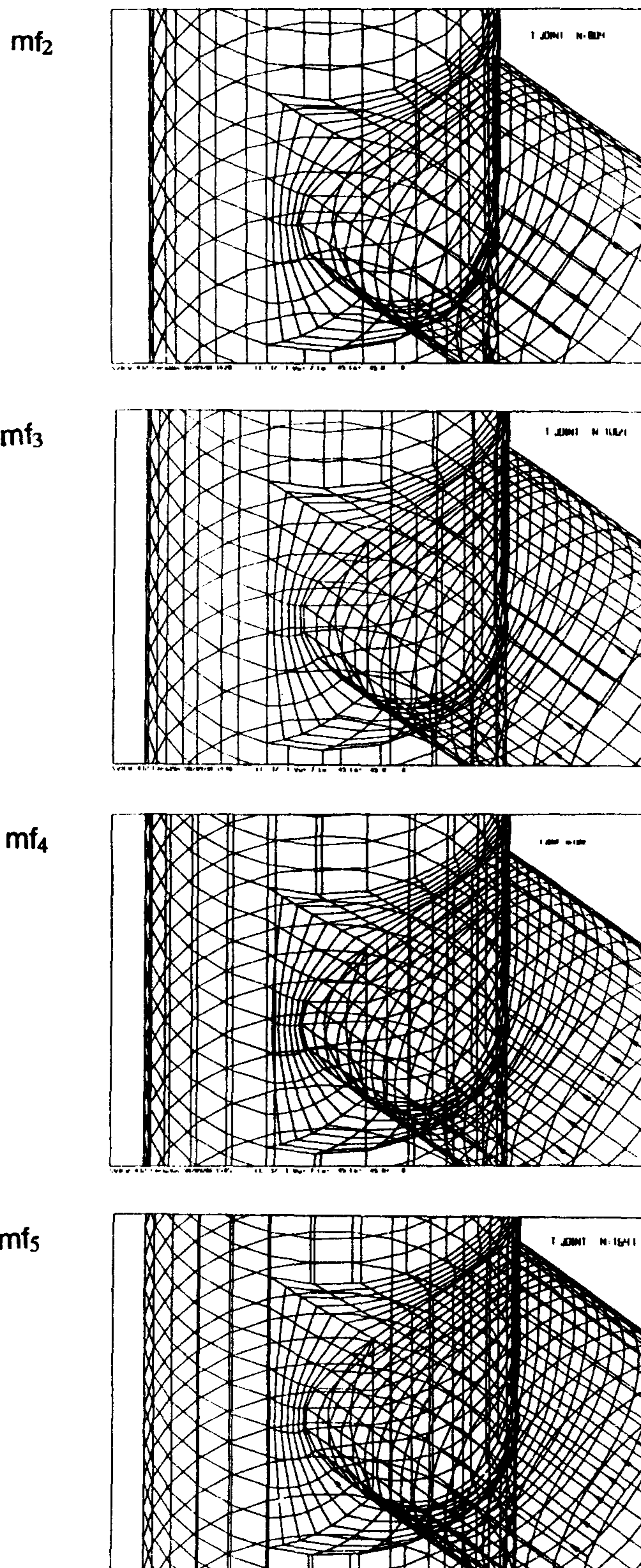
از سوی دیگر می‌بایست نمونه از نظر چگالی تعداد اعضاء (تعداد اعضاء در واحد سطح مدل) نیز بررسی گردد. بدین منظور ۵ نوع شبکه بندی با تعداد اعضاء مختلف از اتصال T در نظر گرفته شد: عضو $mf_1=560$ ، عضو $mf_2=804$ ، عضو $mf_3=1064$ ، عضو $mf_4=1360$ ، عضو $mf_5=1647$

شکل (۲) شبکه بندی‌های mf_2 ، mf_3 ، mf_4 و mf_5 را نشان می‌دهد. با افزایش چگالی تعداد المانها در شبکه بندی یک اتصال، در حالی که کلیه پارامترهای دیگر (اعم از پارامترهای هندسی و پارامترهای موثر بر مقدار SCF) ثابت باقی بمانند، عموماً مقدار SCF آن اتصال به یک مقدار بهینه همگرا می‌شود [۳].

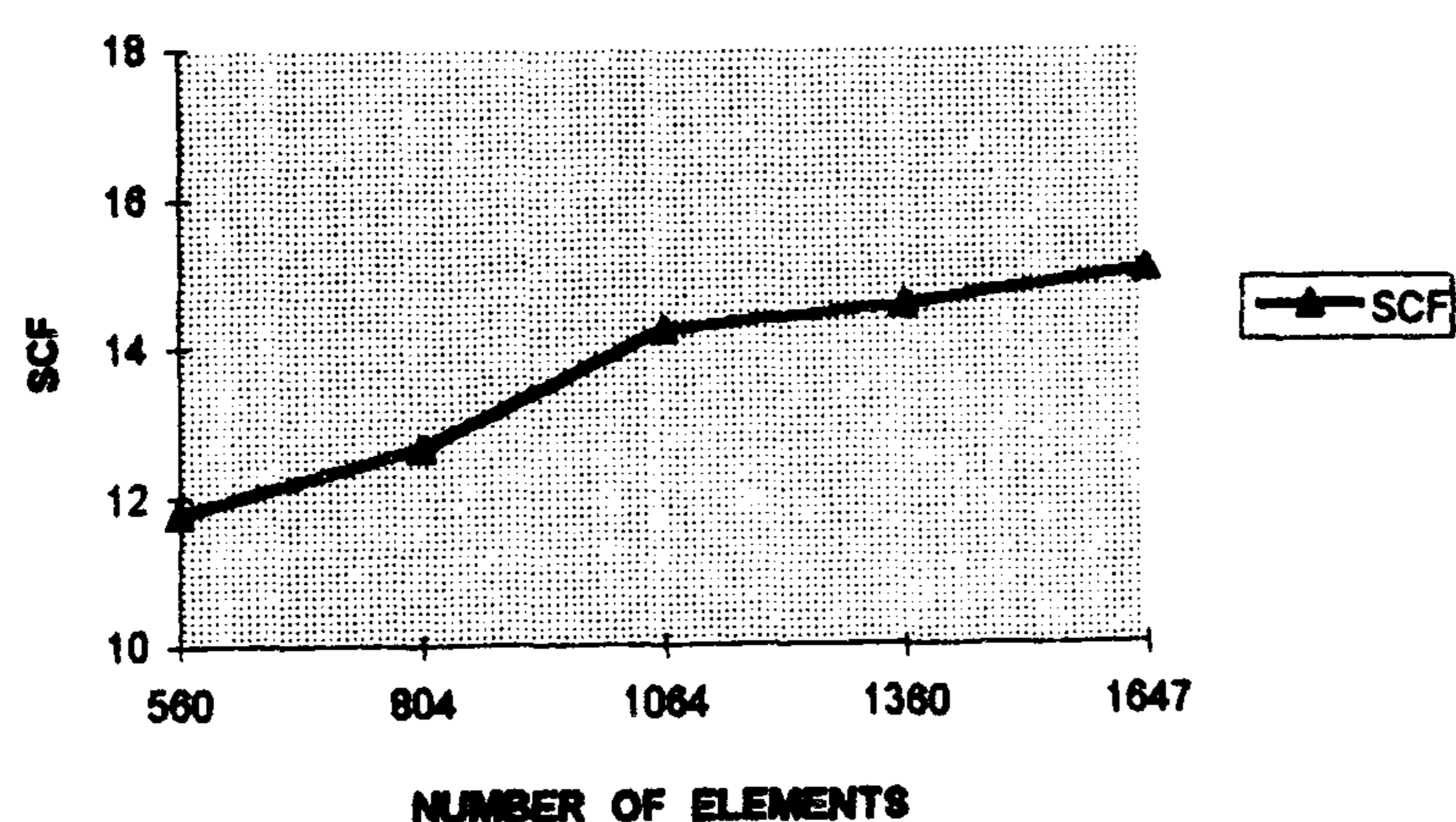
شبکه مناسب می‌بایست طوری باشد که افزایش چگالی تعداد اعضاء، تغییرات اساسی در توزیع تنش در آن اتصال را نتیجه ندهد. در این مطالعه، فرض می‌شود که در شبکه بندی مناسب با افزایش تعداد المانها در آن مقدار SCF بیشتر از ۵٪ تغییر نکند. شکل (۳) نمودار رابطه بین تعداد المانهای مدل و مقدار SCF محاسبه شده می‌باشد. همانطور که مشخص است شیب منحنی در انتها به صفر نزدیک شده و مقدار SCF به یک مقدار بهینه میل می‌کند. از طرفی شکل (۴) نمودار مدت زمان تحلیل توسط رایانه براساس تعداد اعضاء مورد استفاده در مدل را نمایش می‌دهد.

همانطور که مشخص است با افزایش المانها از مدل mf_3 به مدل mf_4 مقدار SCF فقط ۲٪ تغییر کرده است. با توجه به مطالب گفته شده و مقایسه نتایج این ۵ نوع شبکه بندی استفاده از شبکه بندی مدل mf_3 توجیه می‌گردد.



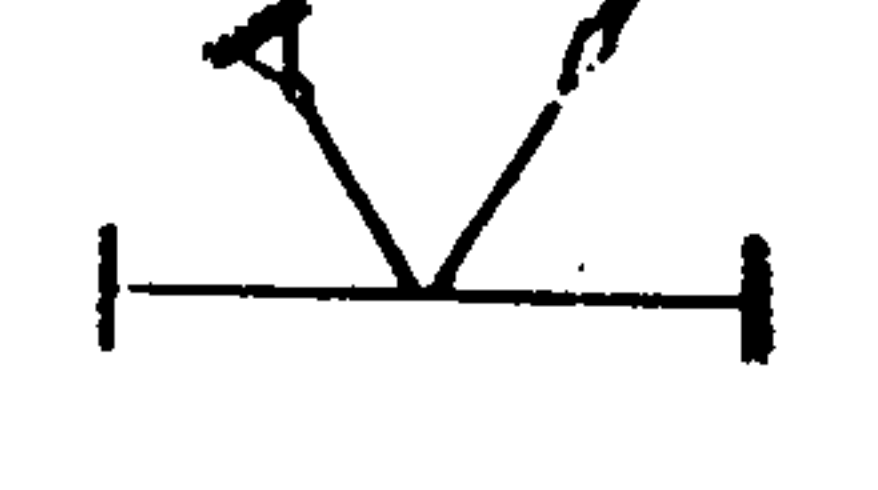
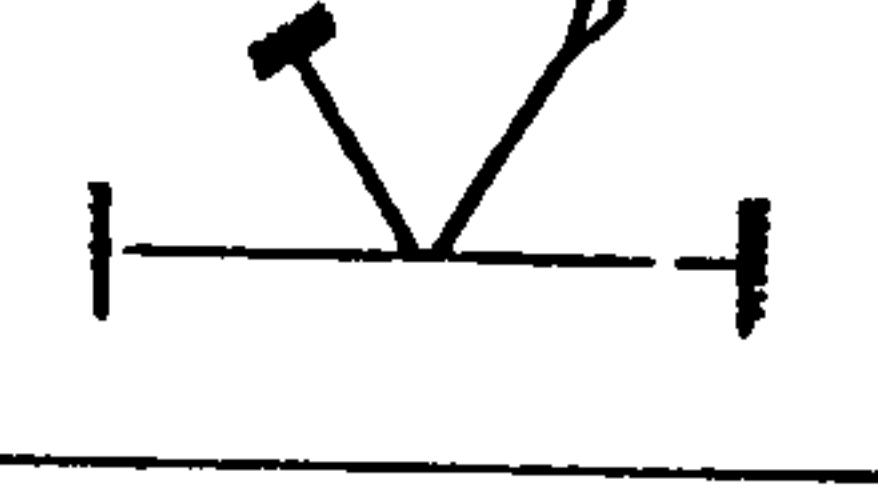
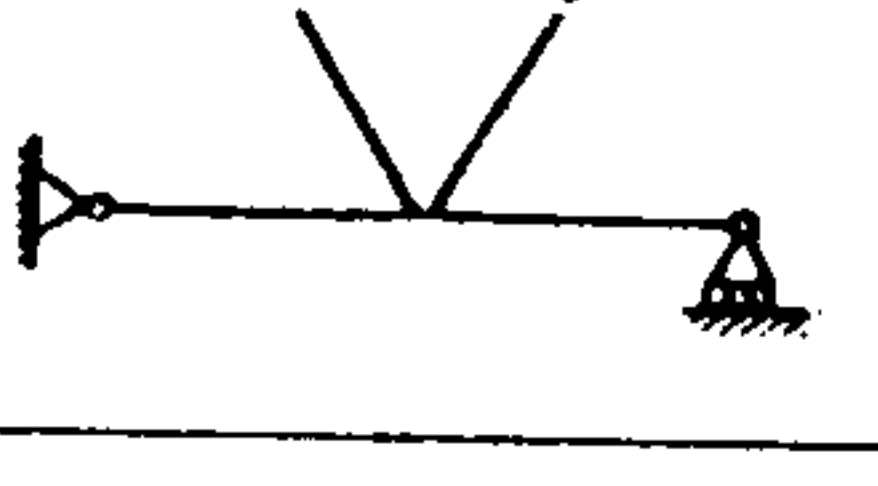
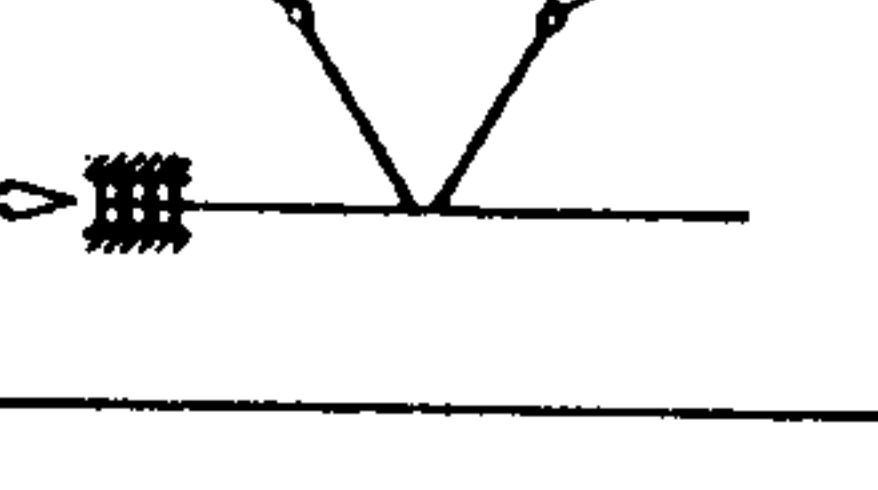
همانطور که دیده می‌شود SCF حاصل از این شبکه بندی مناسب یعنی mf_3 برابر $14/206$ بوده در حالی که SCF همین اتصال T نمونه در آزمایشهایی که قبلاً توضیح داده شد برابر $11/4$ می‌باشد. البته ناگفته نماند که نقاط تنش بحرانی در هر دو روش در محل نشیمن عضو اصلی قرار دارند. دلیل اصلی اختلاف مقدار SCF در این دو روش مدل نکردن جوش در نمونه مورد نظر می‌باشد. ثانیاً مدلسازی گره با استفاده از المان پوسته‌ای (Shell) بدین علت که این نوع المانها فقط صفحه مرکزی لوله را مدل می‌کنند، تنشهای

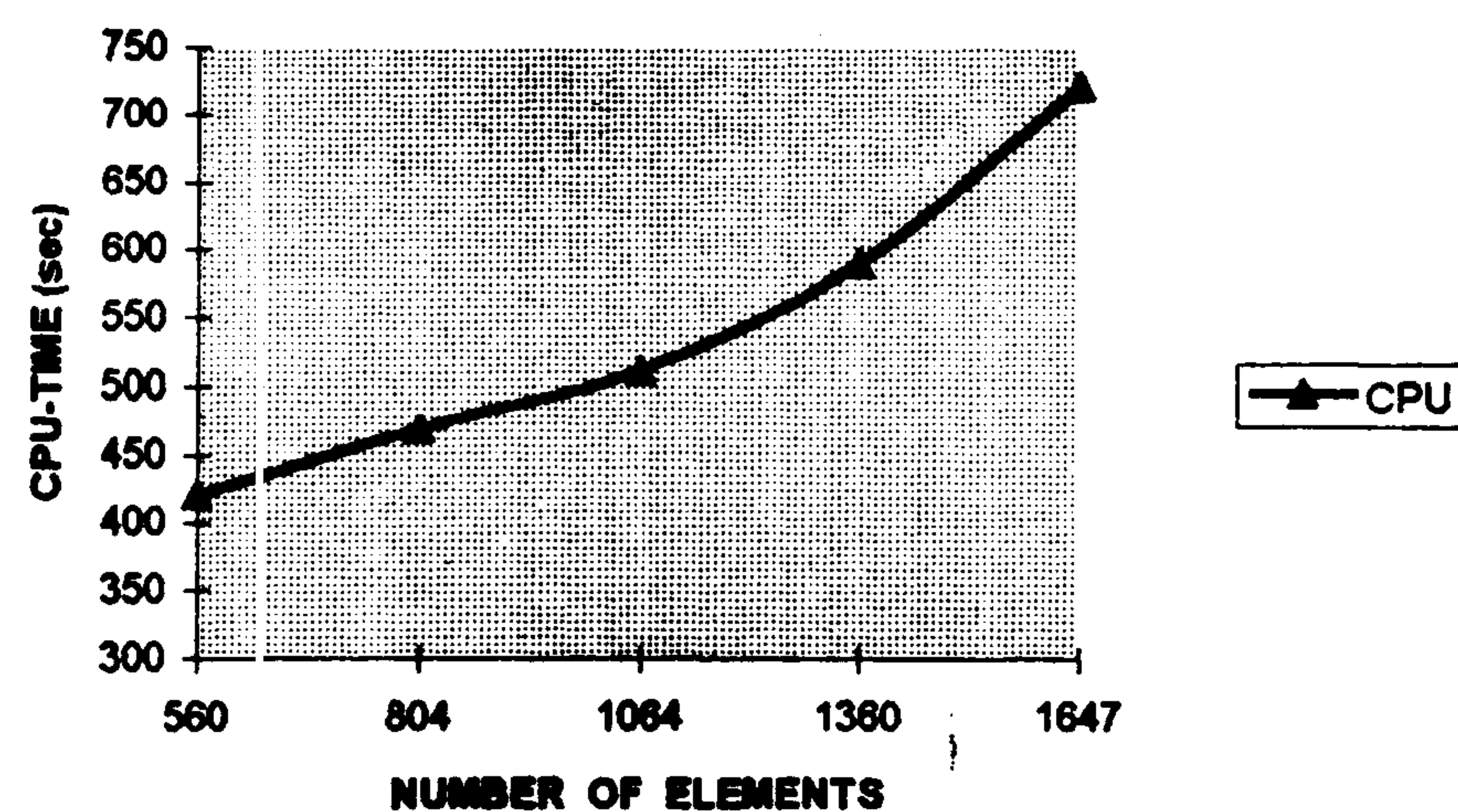


شکل ۲: انواع شبکه بندی اتصال T نمونه از نظر چگالی تعداد اعضاء برای محاسبه مقدار SCF.



شکل ۳: رابطه بین چگالی تعداد المانها در مدل و مقدار SCF محاسبه شده در اتصال T نمونه.

Boundary Condition	Compression Loaded (kN)	Tension Loaded (kN)
A 	85.2	83.3
B 	87.7	82.4
C 	88.6	78.3
D 	92.2	76.2
E 	87.0	
F 	86.0	



شکل ۴: رابطه بین تعداد المانها در مدل و مدت زمان آنالیز توسط رایانه در اتصال T نمونه.

بحرانی را در محل تقاطع این دو صفحه مرکزی ارائه می‌دهند در صورتی که تنشهای بحرانی در محل دورتر از آن، یعنی در نوک جوش اتفاق می‌افتد.

باتوجه به اینکه نرم‌افزار مورد استفاده در این مطالعه المانهای حجمی را با المانهای پوسته‌ای در قالب یک مدل تلفیق نمی‌کند از مدل کردن جوش صرف‌نظر گردید.

تعیین شرایط مرزی^۱

لازم به توضیح است که ما در این بحث فقط بارگذاری محوری روی عضو مهاری را مدنظر قرار خواهیم داد. حالت‌های بارگذاری دیگر مثل بار محوری روی عضو اصلی، خمش در صفحه و خارج صفحه روی عضو مهاری و ... هر کدام نیاز به تحقیقاتی جداگانه دارد. معادلات SCF ارائه شده توسط محققان نیز در مریک از حالت‌های گفته شده کاملاً مجزا می‌باشند.

در شکل (۵) تمامی شرایط مرزی برای یک اتصال K با بار محوری روی عضو مهاری (A تا F) در نظر گرفته شده و نتایج مقاومت نهایی آنها نیز ذکر گردیده است [۳]. شرط مرزی A کمترین مقاومت نهایی را برای اتصال ارائه می‌دهد در حالی که شرط مرزی D که گیردار کامل می‌باشد بیشترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد. البته نکته‌ای که در این جا توجه به آن بسیار مهم می‌باشد این است که تفاوت مقدار مقاومت از حالت A که مفصلی کامل بوده به حالت D که گیردار کامل است فقط حدود ۸٪ می‌باشد، که این مقدار بسیار ناچیزی است.

باتوجه به اینکه مقاومت نمونه‌های آزمایشی فوق کاملاً در ارتباط با ضریب تمرکز تنش مربوطه رقم می‌خورد، متناسباً می‌تون نتیجه

شکل ۵: تاثیر شرایط مرزی و مدهای بارگذاری [۱].

گرفت که شرایط مرزی تاثیر چندانی بر مقدار SCF بدست آمده نخواهند داشت. با این وجود مدل المان محدود اتصال نمونه 1.3 تحت شرایط مرزی گیردار کامل تحلیل شد زیرا که همین نمونه اتصال T شکل در آزمایشگاه، با انتهای گیردار تحت آزمایش قرار گرفته است.

مقایسه SCF اتصالات TT در چند صفحه و تک صفحه

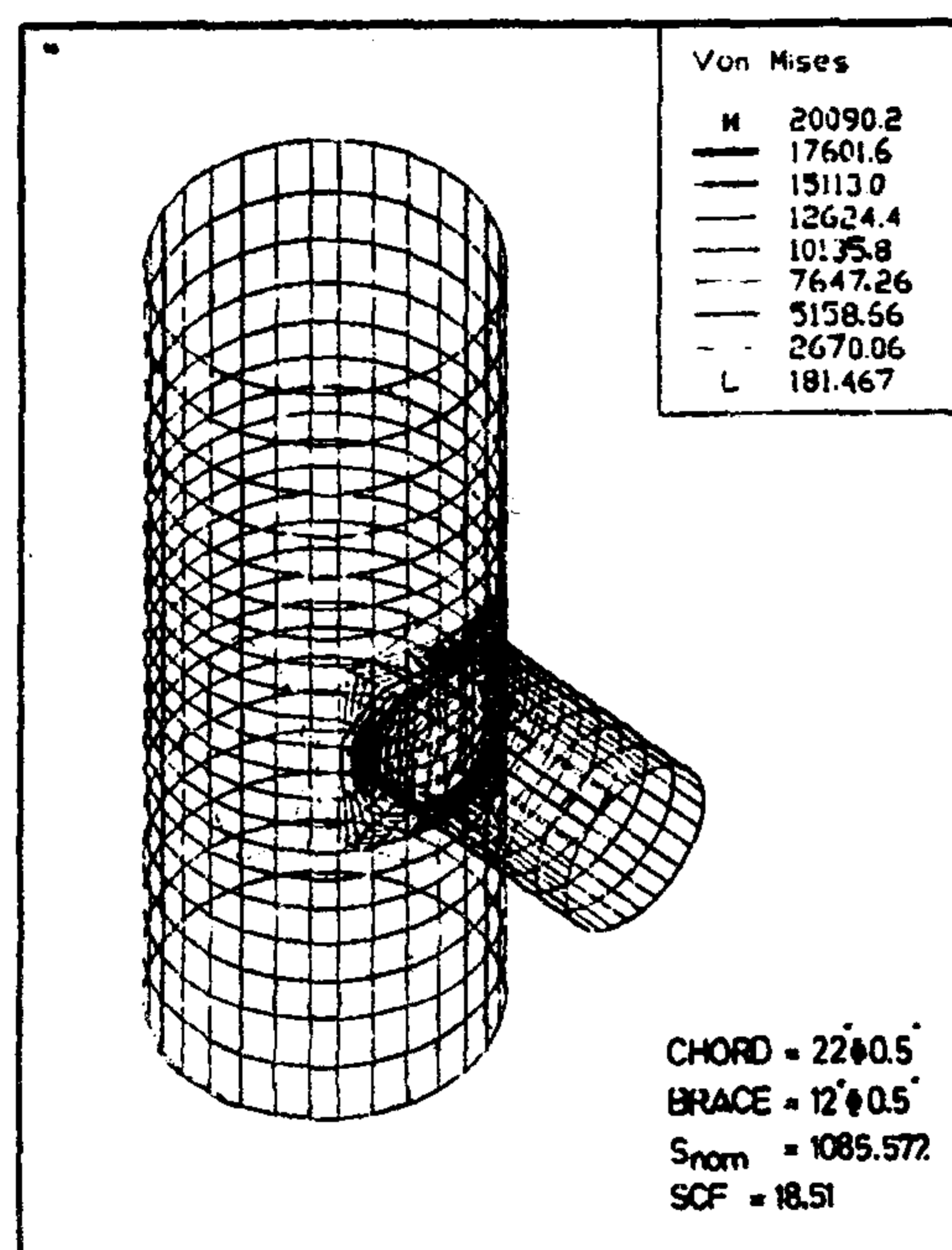
در ابتدا لازم است که با استفاده از یک نمونه اتصال TT آزمایشگاهی، مدل اتصال در حالت چندصفحه‌ای که جوابهای نزدیک به واقعیت داشته باشد بدست آید. بدین منظور از نتایج آزمایشگاهی اتصال TT نمونه که قبلاً ذکر گردید استفاده شده است. در مدل تحلیلی موردنظر که از همان شبکه بندی مناسب mf_3 با شرایط مرزی مفصلی (همانند آزمایش) استفاده گردیده SCF برابر $6/25$ نتیجه می‌گردد. دلایل اختلاف نتیجه تحلیلی با

ب - تعیین SCF بکمک T - معادل

نتیجه تحلیل اتصال T معادل اتصال بالا با همان مشخصات و با همان بارگذاری SCF مربوطه با توجه به شکل (۷) بشرح زیر بدست می‌آید:

$$S'_{h.s} = 20090/2 \text{ lb/in}^2$$

$$S'_{nom} = 1085/75 \text{ lb/in}^2$$



شکل ۷: نمایش خطوط تنش بحرانی در اتصال T معادل.

$$SCF' = \frac{S'_{h.s}}{S'_{nom}} = 18/5$$

با مقایسه دو مقدار SCF بدست آمده روشن است که در نظر نگرفتن اثر عضو مهاری خارج از صفحه در یک اتصال TT چند صفحه‌ای (همان روش متداول طراحی) مقدار SCF حدود ۱۰٪ بیشتر از آنچه که هست برآورد می‌شود که البته این تفاوت قابل توجه نیست. برای اطمینان بیشتر SCF این اتصال (TT) هم به کمک معادلات تجربی متداول و هم توسط نرم‌افزار SACS [۱۲] برآورد می‌گردد.

ج - تعیین SCF توسط معادلات ارائه شده

در این جا اتصال TT موردنظر به شکل دو اتصال T تک صفحه‌ای مجزا واقع در صفحات XZ و YZ بررسی می‌گردد. SCF مربوط به این اتصال که توسط ایتیمو [۴] ارائه شده است مطابق معادله زیر می‌باشد:

: نشیمن عضو اصلی

$$SCF = \{\gamma\tau^{1/1} [1.11 - 3(\beta - 0.52)^2] \sin^{1/6} \theta\} \times F_1$$

آزمایش (یعنی ۸/۱) نیز قبلاً ذکر گردید.

در این قسمت چند نمونه اتصال TT مدل شده و با بارگذاری روی آنها و انجام آنالیز استاتیکی مربوطه، تنش‌های بحرانی در محل اتصال و متعاقباً ضریب تمرکز تنش (SCF) مربوط به هر اتصال محاسبه می‌شوند. به همین ترتیب چند نمونه اتصال T معادل همان اتصالات TT (همانند روش متداول طراحی که در یک اتصال TT در دو مرحله و در دو صفحه متفاوت، دو اتصال T را جداگانه بررسی کرده و بیشترین SCF را به عنوان جواب بر می‌گزیند) با همان شرایط گفته شده مدل شده و ضمن محاسبه SCF مربوط به هر یک، ضرائب تمرکز تنش با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

مثال اول TT-۱

اتصال TT با عضو اصلی "۰/۵" x ۲۲" معادل ۱۲/۷ x ۵۵۹ مم و دو عضو مهاری "۰/۵" x ۱۲" معادل ۳۰۴/۸ x ۱۲/۷ مم با پارامترهای هندسی ارائه شده در جدول (۱) می‌باشد که با شبکه بندی mf3 و شرایط مرزی گیردار مدل شده است. (شکل ۶)

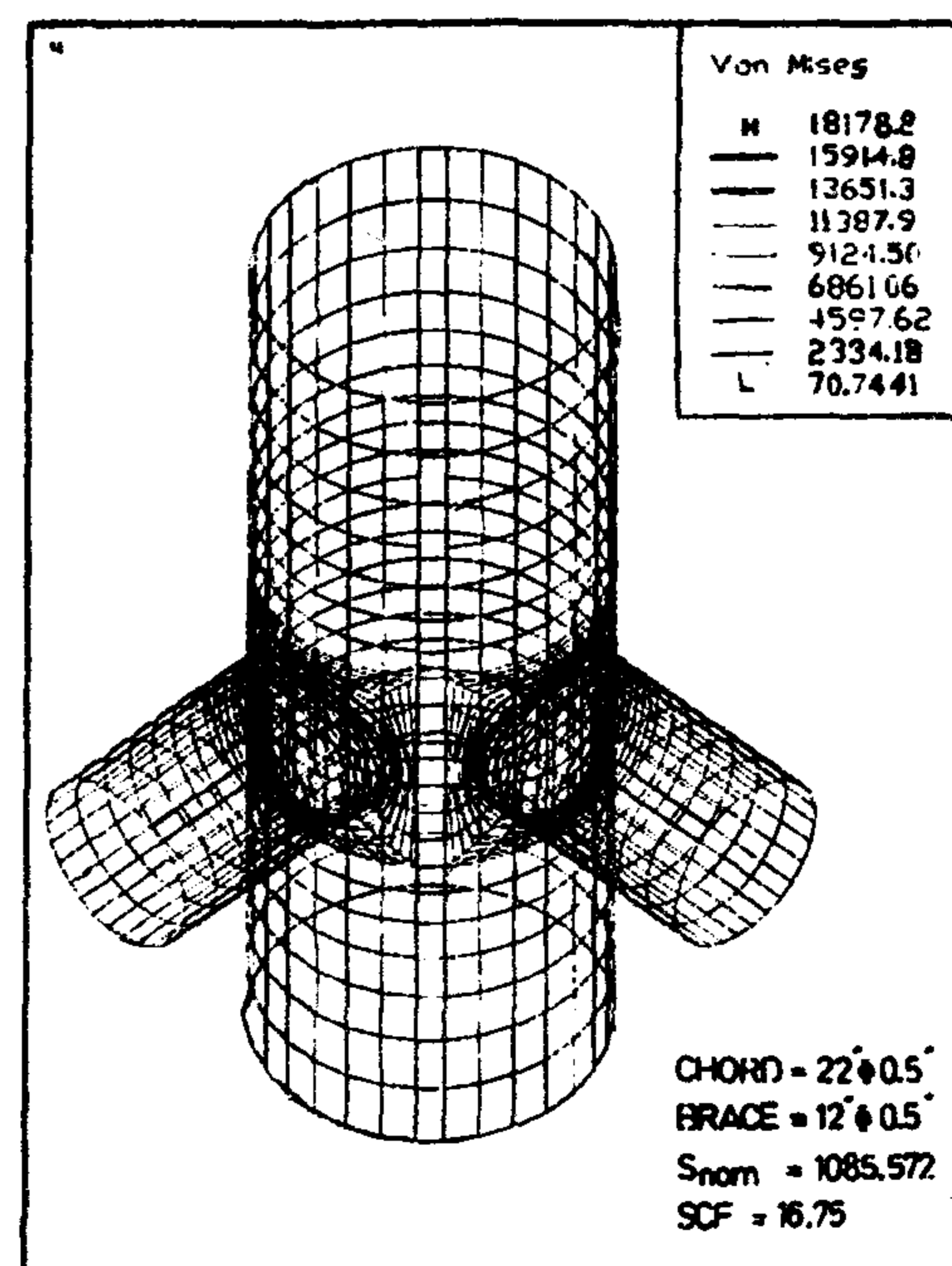
الف - تعیین SCF بکمک مدل اجزاء محدود چند صفحه‌ای

روی انتهای هر دو عضو مهاری دو نیروی فشاری ۱۹۶۰۰ پوندی (۸۷ کیلو نیوتن) قرار داده و تنش بحرانی در محل اتصال طبق شکل (۷) بدست می‌آید. با توجه به شکل فوق داریم:

$$S_{h.s} = 18178/2 \text{ lb/in}^2$$

$$S_{nom} = \frac{P}{A} = \frac{19600}{\pi \times 11/5 \times 0/5} = 1085/57 \text{ lb/in}^2$$

$$SCF = \frac{S_{h.s}}{S_{nom}} = 16/75$$



شکل ۶: نمایش خطوط تنش بحرانی در یک اتصال TT.

TT-۲ تحلیل می شود. اتصال TT-۲ با عضو اصلی "۵/۰" x "۲۰" معادل معادل ۱۲/۷ x ۵۰۸ مم و دو عضو مهاري "۵/۰" x "۱۰" معادل ۱۲/۷ x ۲۵۴ مم با پارامترهای هندسی ارائه شده در جدول (۱) و با شبکه بندی مناسب mf3 و شرط مرزی گیردار مدل المان محدود شده است. (شکل (۸))

روی انتهای اعضای مهاري دو بار فشاري ۲۱۶۰۰ پوندی (۹۶ کیلونیوتن) قرار داده شده و عیناً مطابق رویه (الف) فوق‌الذکر محاسبات انجام و $SCF = ۱۵/۹۲$ بدست می‌آید.

SCF متناظر با اتصال تک صفحه‌ای T معادل با اتصال TT نیز مطابق بند (ب) فوق مجدداً به کمک اجزاء محدود تحلیل گردید و $SCF' = ۱۷/۱۸$ بدست می‌آید (شکل (۹)). این مقدار در مقایسه با SCF محاسبه شده در اتصال TT تنها حدود ۸٪ بیشتر می‌باشد.

جدول (۲) نتایج SCF بدست آمده از نرم‌افزار SACS را به همراه سایر روشهای تحلیلی در مورد این اتصال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود SCF محاسبه شده توسط روش متداول طراحی در مورد اتصال TT تفاوت زیادی با واقعیت نداشته و می‌تواند تا حدودی مورد قبول باشد.

باتوجه به پارامترهای هندسی این اتصال که قبلاً ذکر شد. داریم:

$$SCF = ۲۲ \times 1^{1/1} \times [1/11 - 3(0/55 - 0/52)^2 \times 1] \times F_1$$

$$SCF = ۲۴/۳۶ \times 0/۷$$

$$SCF = ۱۷/۰۵$$

د - تعیین SCF توسط نرم‌افزار SACS [۱۲]

این نرم‌افزار نیز از همان روش متداول گفته شده بهره‌مندی می‌گیرد و SCF محاسبه شده را توسط انواع معادلات مربوطه در یک لیست ارائه می‌دهد.

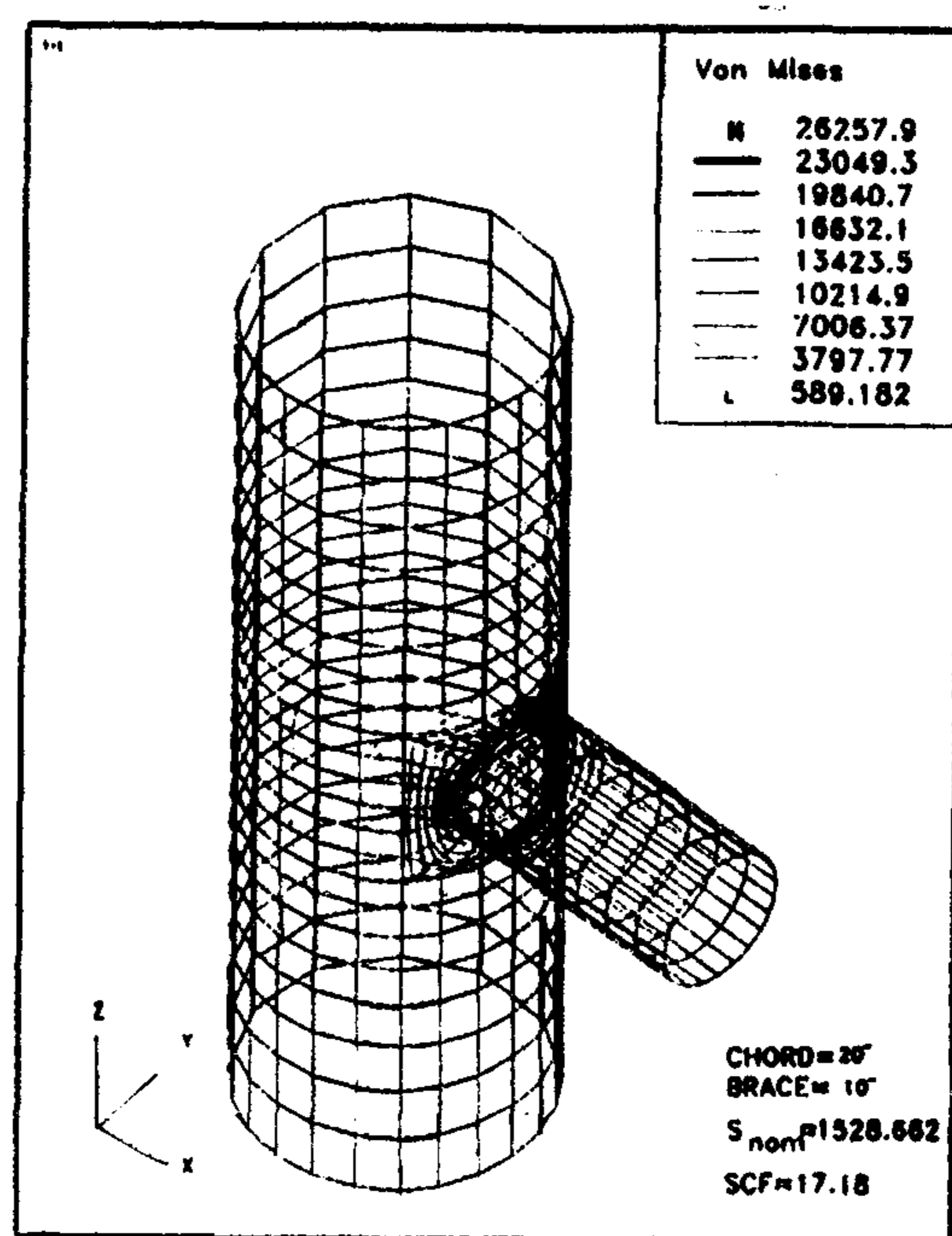
جدول (۲) نتایج حاصل از آنالیز اتصال TT-۱ ذکر شده توسط این نرم‌افزار به همراه نتایج تحلیلهای فوق‌الذکر را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است کلیه این مقادیر SCF (که در محل نشیمن عضو اصلی اتفاق می‌افتد) از مقدار حاصل از تحلیل چندصفحه‌ای و نیز از مقدار بدست آمده توسط مدل المان محدود برای اتصال تک صفحه‌ای معادل بیشتر می‌باشند.

مثال دوم TT-۲

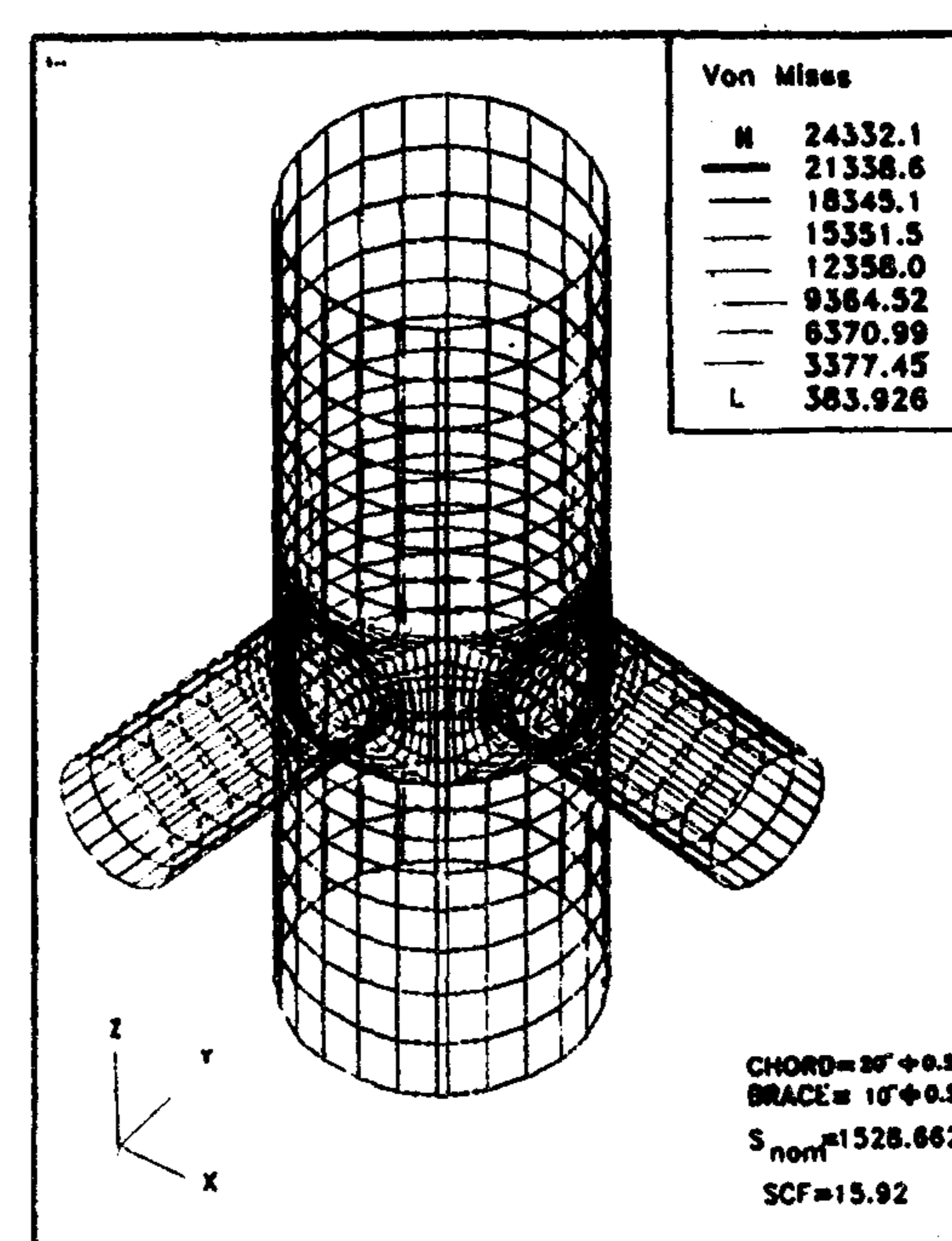
برای اطمینان از درستی نتیجه گیری یک مورد دیگر یعنی

جدول ۱: مشخصات هندسی اتصالات TT و XX مدل شده.

شماره مدل	D	d	T	L	θ	ϕ	$\alpha = \frac{2L}{D}$	$\beta = \frac{d}{D}$	$\gamma = \frac{D}{2T}$	$\tau = \frac{t}{T}$	$\xi = \frac{g}{d}$
اتصال TT و XX	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°)	(°)					
TT-۱	۵۵۹	۳۰۴/۸	۱۲/۷	۱۵۷۵	۹۰	۹۰	۵/۶۴	۰/۵۵	۲۲	۱	-
TT-۲	۵۰۸	۲۵۴	۱۲/۷	۱۵۷۵	۹۰	۹۰	۶/۲	۰/۵	۲۰	۱	-
XX-۱	۵۵۹	۳۰۴/۸	۱۲/۷	۱۵۷۵	۹۰	۹۰	۵/۶۴	۰/۵۵	۲۲	۱	-
XX-۲	۶۰۹/۶	۳۵۵/۶	۱۲/۷	۱۵۷۵	۹۰	۹۰	۵/۱۷	۰/۵۸	۲۴	۱	-



شکل ۹: نمایش خطوط تنش بحرانی در اتصال T معادل.



شکل ۸: نمایش خطوط تنش بحرانی در اتصال TT-۲

مقایسه SCF اتصالات XX چند صفحه‌ای و تک صفحه‌ای

اتصال XX یک اتصال چند صفحه‌ای است که بیشتر در ژاکتهای شش پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مثال اول XX-۱

ابتدا یک اتصال با عضو اصلی 22×0.5 معادل 12.7×55.9 م م و چهار عضو مهاری 12×0.5 معادل 12.7×30.48 م م با پارامترهای هندسی ارائه شده در جدول (۱) و با شبکه بندی مناسب mf3 و دو انتهای عضو اصلی گیردار مدل شده است. روی انتهای هر چهار عضو مهاری چهار بار فشاری 19600 پوندی (۸۷ کیلونیوتن) قرار داده شده و با تحلیل مدل المان محدود تنش های بحرانی در محل اتصال طبق شکل (۱۰) بدست می‌آید. همانطور که شکل نشان می‌دهد ضریب تمرکز تنش

جدول ۲: نتایج SCF بدست آمده در اتصالات TT و XX چند صفحه‌ای.

شماره مدل اتصال TT و XX	تحلیل به شکل چند صفحه‌ای			تحلیل به شکل تک صفحه‌ای (روش متداول طراحی)			SCF حاصل از نرم افزار SACS	SCF حاصل از معادلات پارامتری
	Sh.s (kg/cm ²)	Snom (kg/cm ²)	SCF	Sh.s (kg/cm ²)	Snom (kg/cm ²)	SCF		
TT-۱	۱۲۷۲/۵	۷۶	۱۶/۷۵	۱۴۰۶/۳	۷۶	۱۸/۵	۲۴/۴۶	۱۷/۰۵
TT-۲	۱۷۰۳/۲۵	۱۰۷	۱۵/۹۲	۱۸۳۸/۰۵	۱۰۷	۱۷/۱۸	۲۲/۴۰۴	۱۵/۵۳
XX-۱	۷۱۶/۶۹	۷۶	۹/۴۳	۱۴۶۸	۷۶	۱۹/۳۲	۱۸/۳۲	۱۸/۳۴
XX-۲	۷۳۸/۹	۸۳/۲۳	۸/۸۸	۱۳۷۴/۵۷	۸۳/۲۳	۱۶/۵۲	۱۷/۶۱	۱۷/۱

$$SCF = 9/43$$

تعیین SCF اتصال XX مورد نظر با معادلات ارائه شده

با توجه به معادلات ارائه شده توسط افتمیو [۴] مربوط به این نوع اتصال داریم:

نشیمن عضو اصلی

$$SCF = 3.87 \gamma \tau \beta (1.10 - \beta^{1/8}) (\sin \theta)^{1/7}$$

$$SCF = 3/87 \times 22 \times 1 \times 0.55 \times (1/1 - 0.55^{1/8}) \times 1$$

$$\Rightarrow SCF = 35/55$$

از طرفی با توجه به اینکه $\alpha < 12$ است، می‌بایست از ضریب کاهش SCF استفاده نمود.

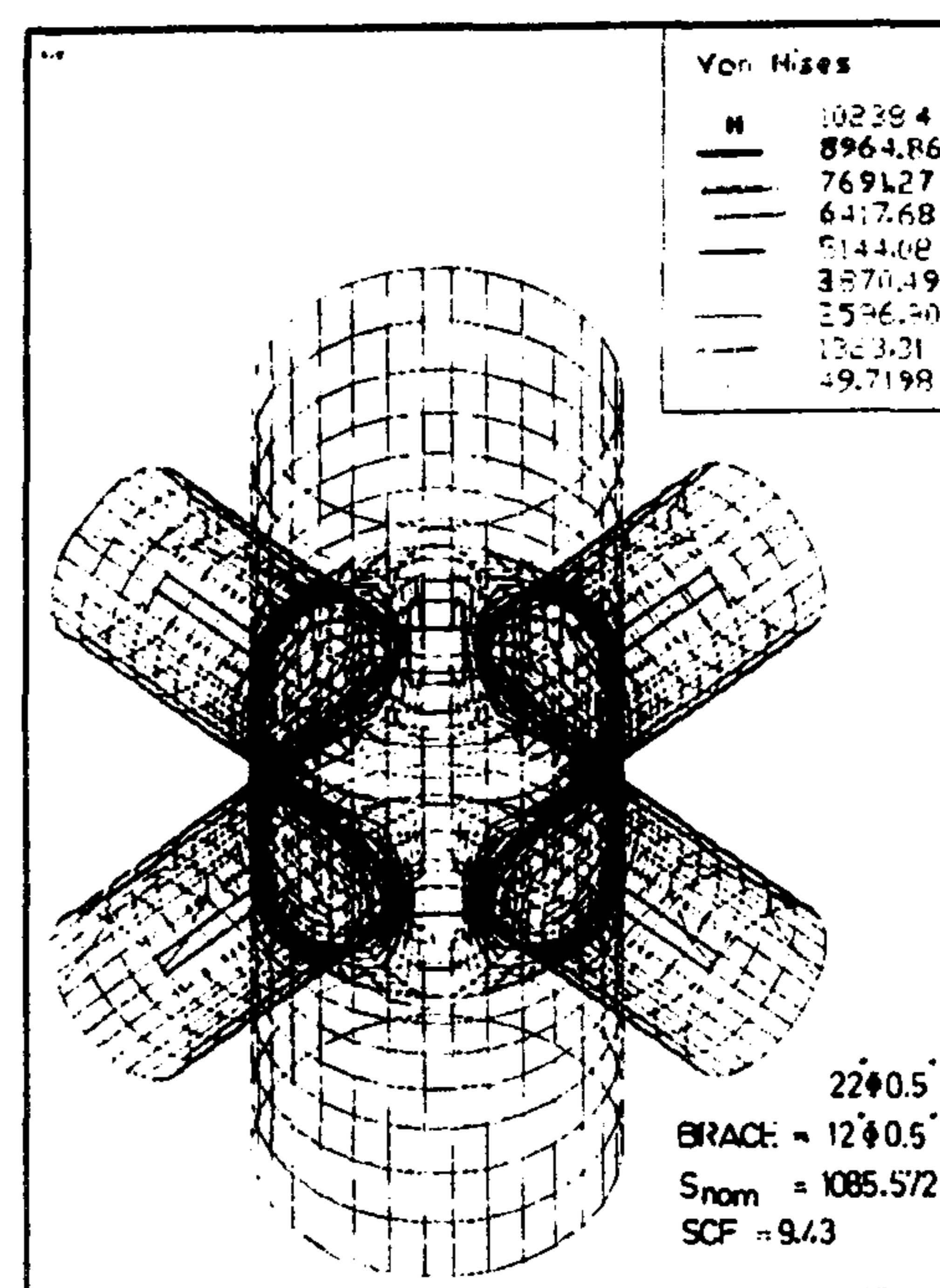
$$SCF = F_1 \times \text{ضریب کاهش}$$

$$1 - (0.83 \beta - 0.56 \beta^2 - 0.02) \gamma^{0.23} \exp(-0.21 \gamma^{-1/16} \alpha^{0.25})$$

$$F_1 = 0.516$$

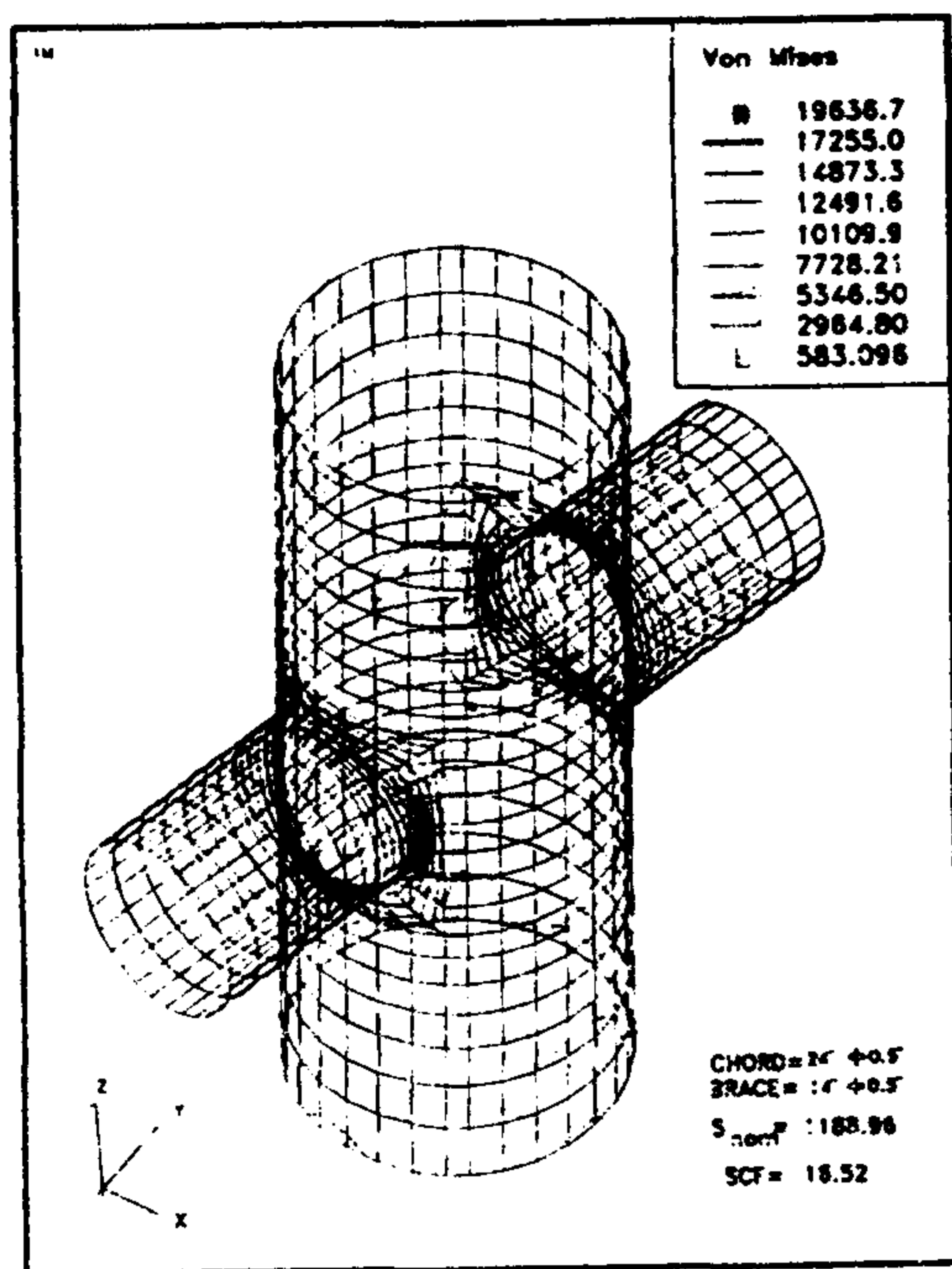
$$SCF_{\text{نهایی}} = F_1 \times SCF$$

$$SCF_{\text{نهایی}} = 18/34$$



شکل ۱۰: نمایش خطوط تنش بحرانی در یک اتصال XX تحت بار محوری.

جدول (۲) نتایج بدست آمده با استفاده از روش مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: نمایش خطوط تنش بحرانی در یک اتصال X تک صفحه‌ای معادل.

رابطه SCF با زاویه بین دو عضو مهارى در اتصالات TT

به منظور مطالعه تاثیر احتمالی زاویه بین دو عضو مهارى بر ضریب تمرکز تنش یک اتصال TT با عضو اصلی $1'' \times 20''$ معادل $25/4 \times 508$ مم و دو عضو مهارى به قطر $10''$ (254mm)، با پارامترهای هندسی زیر و دو انتهای عضو اصلی گیردار را مدل کرده و زاویه بین دو عضو مهارى از 65° تا 100° تغییر داده می‌شود. $L = 1575\text{mm}$, $l = 660\text{mm}$, $\alpha = \frac{2L}{D} = 6/2$, $\beta = \frac{d}{D} = 0/5$, $\gamma = \frac{D}{2T} = 10$, $\tau = \frac{t}{T} = 1$, $\phi = 90^\circ$

شش مدل المان محدود با زوایای θ متفاوت ساخته و پس از آنالیز هر یک از مدلها نتایج SCF حاصله را باهم مقایسه می‌کنیم. برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر SCF بدست آمده را روی یک منحنی برحسب زاویه بین دو عضو مهارى می‌آوریم.

شکل (۱۳) نمودار تغییرات مقدار SCF در یک اتصال TT چند صفحه‌ای برحسب تغییرات زاویه بین دو عضو مهارى را نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص است این نمودار یک منحنی درجه دوم با مقدار حداقل مشخص می‌باشد که مقدار حداقل آن در حدود زوایای بین 80° تا 90° درجه می‌باشد. این بدان معناست که مقدار SCF در اتصالات TT در محدوده زاویه بین دو عضو مهارى 80° تا 90° درجه به حداقل ممکن می‌رسد. پس لازم است که اتصالات از

جدول (۲) نتایج SCF محاسبه شده برای اتصال XX-۱ توسط نرم‌افزار SACS را به همراه سایر روش های فوق الذکر ارائه می‌دهد. همانطور که مشخص است مقادیر SCF ارائه شده توسط این دو روش نیز حدود 70% بیشتر از مقدار SCF حاصل از مدل چندصفحه‌ای می‌باشد.

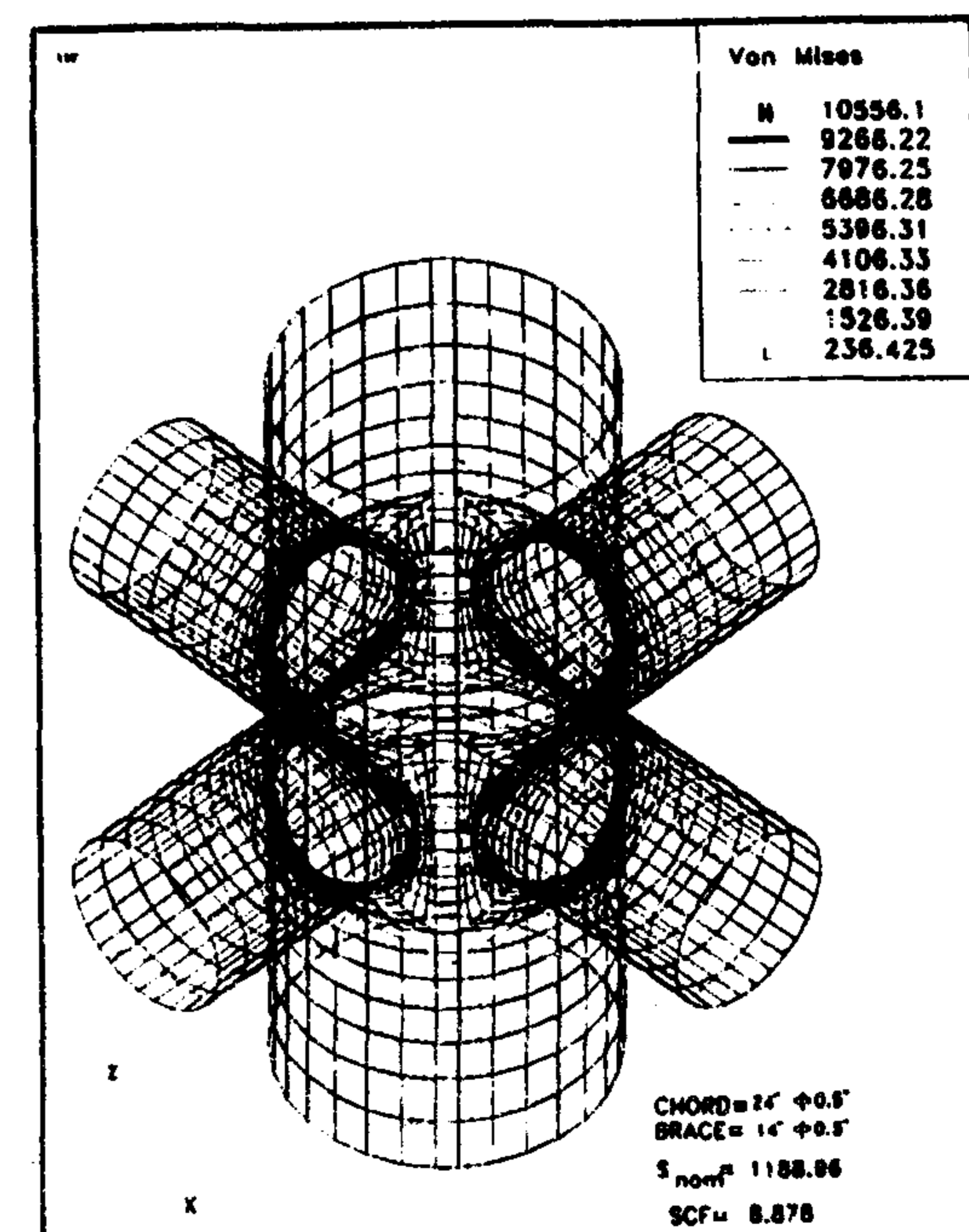
مثال دوم XX-۲

مجدداً یک اتصال XX چند صفحه‌ای با عضو اصلی $24'' \times 0/5''$ معادل $12/7 \times 609/6$ مم و چهار عضو مهارى $12'' \times 0/5''$ معادل $12/7 \times 355/6$ مم با پارامترهای هندسی ارائه شده در جدول (۳) مدل گردید.

روی انتهای ۴ عضو مهارى ۴ بار فشاری 25200 پوندی (۱۱۲ کیلونیوتن) قرار داده شده و پس از تحلیل و محاسبه تنش بحرانی در محل اتصال، مقدار $SCF = 8/88$ بدست می‌آید (شکل (۱۱)). همانطور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود نقاط بحرانی اتصال به محلی بین نشیمن و تاج اتصال تغییر مکان داده‌اند. تغییرات پارامترهای β و τ می‌تواند در این مورد موثر باشد.

حال فقط صفحه ZY را در نظر گرفته و اتصال X موجود در این صفحه را که دارای همان پارامترهای هندسی اتصال XX می‌باشد در نظر می‌گیریم (شکل (۱۲)). ضریب تمرکز تنش برابر می‌شود با: $SCF' = 16/52$

با مقایسه این دو مقدار SCF مجدداً مشاهده می‌شود که در نظر نگرفتن اعضاء خارج از صفحه در یک اتصال XX چند صفحه‌ای مقدار SCF را حدود دو برابر مقدار SCF حاصل از در نظر گرفتن تاثیر تمامی اعضاء خارج صفحه آن اتصال، ارائه می‌دهد که بسیار با واقعیت تفاوت دارد.



شکل ۱۱: نمایش خطوط تنش بحرانی در یک اتصال XX دیگر تحت بار محوری.

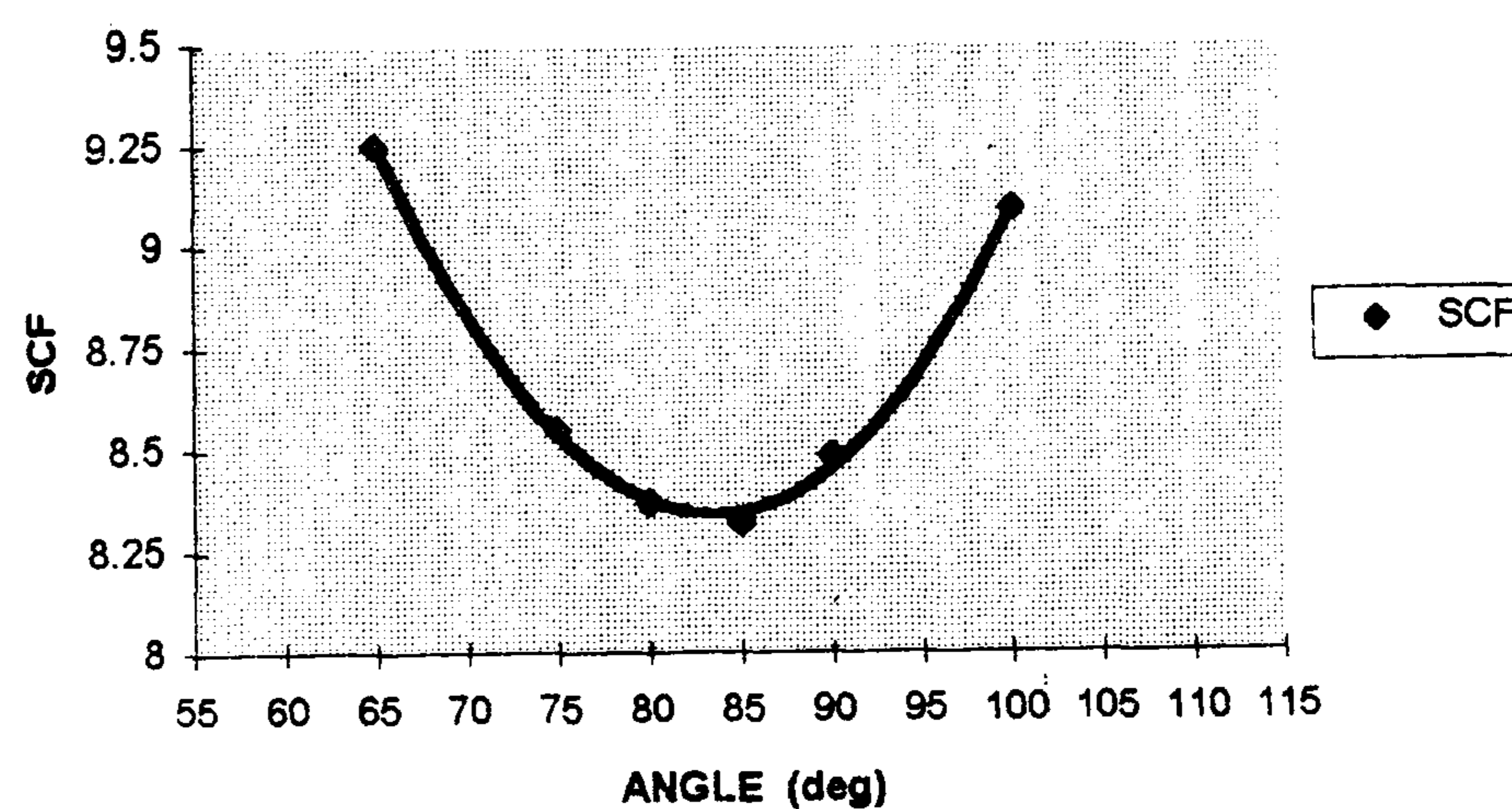
نوع TT در ژاکتهای سکوهای دریایی در حدود این زوایا باشد.

۸۰° تا ۹۰° به حداقل مقدار خود می‌رسد. در نتیجه در این محدوده این اتصال حداکثر عمر خستگی خود را دارا می‌باشد. در یک سکوی دریایی حاوی اتصالات TT تا آنجا که ممکن می‌باشد بهتر است از ژاکتهای چهارپایه (4-Leg) به جای سه پایه (3-Leg) استفاده کرد [در شرایط مساوی عمر خستگی بیشتری دارند].

تحقیق در این موضوع برای اتصالات چند صفحه‌ای دیگر نظیر KK و DTK می‌تواند حائز اهمیت باشد.

معرفی نمادها

- d: قطر عضو مهاری
- D: قطر عضو اصلی؛ شاخص آسیب انباشتگی
- g: فاصله گپ بین دو عضو مهاری
- K: تعداد کل فواصل محدوده تنش
- L: طول عضو اصلی
- l: طول عضو مهاری
- n_i : دفعات تکرار در فواصل محدوده تنش i از توزیع تنش درازمدت
- N_i : دفعات تکرار در همان محدوده تنش که باعث ایجاد شکست شوند، از منحنی S-N بدست می‌آید
- T: ضخامت جداره عضو اصلی
- t: ضخامت جداره عضو مهاری
- $2L/D : \alpha$
- $d/D : \beta$
- $D/2T : \gamma$
- $t/T : \tau$
- $g/D : \xi$
- θ : زاویه بین محور عضو اصلی و مهاری
- ϕ : زاویه بین دو عضو مهاری
- $S_{h.s}$: تنش بحرانی (Hot Spot Stress)
- $S_{rh.s}$: دامنه تنش بحرانی
- S_{nom} : تنش اسمی
- $S_{r.ax.nom}$: دامنه تنش اسمی ناشی از بار محوری
- SCF: ضریب تمرکز تنش
- SNCF: ضریب تمرکز کرنش



شکل ۱۳: نمودار تغییرات مقدار SCF برحسب تغییرات زاویه ϕ در یک اتصال TT چند صفحه‌ای.

نتیجه گیری و پیشنهادات

مهندسين در طراحی و محاسبات متداول اتصالات در برابر خستگی، آنها را به شکل چند صفحه‌ای در نظر نمی‌گیرند و در بهترین حالت بطور تجربی ضرائب تصحیحی را برای SCF در نظر می‌گیرند. مطابق تحلیل های اجزاء محدود ارائه شده در این مقاله (پیرامون دو اتصال چندصفحه‌ای TT و XX) به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

- مقادیر SCF حاصل از تحلیل اتصال TT به شکل چند صفحه‌ای و به روش متداول اختلاف کمی دارند و می‌توان اتصالات چند صفحه‌ای TT را با همان روش سریع متداول، در برابر خستگی طراحی نمود.

- مقادیر SCF حاصل از تحلیل چندصفحه‌ای اتصال XX حدود نصف مقادیر SCF حاصل از روش متداول طراحی بدست آمده است. بنابراین اتصالات چند صفحه‌ای XX باید با در نظر گرفتن چند صفحه‌ای بودن آن طراحی و تحلیل شود و روش متداول طراحی در این نوع اتصال جوابهای بسیار غیراقتصادی و دست بالا ارائه می‌دهد.

- مقدار SCF در اتصالات TT در محدوده زاویه بین دو عضو مهاری

مراجع

- 2 - API Recommended Practice 2A-WSD (PR 2A-WSD) 20th Edition, July 1, 1993.
- 3 - Dover, W. D. and A. G. Madhava Rao (1996). *Fatigue in offshore structures*. A. A. Balkema / Rotterdam / Brookfield Publication.
- 4 - Efthymiou, M. (1988). "Development of SCF formulae and generalised influence functions for use in fatigue analysis." *OTJ Conference*, Surrey, The U.K.
- 5 - Karamanos, S. A., A. Romeijn and J. Wardenier (1997). *Stress concentration factors for the fatigue design of multiplanar welded tubular connections*. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands.
- 6 - Kuang, J. G., A. B. Potvin and R. D. Leick (1975). "Stress concentrations in tubular joints." *OTC Paper # 2205*, Houston, USA.
- 7 - M. M. K. Lee and S. R. Wilmshurst. *Finite element analysis of multiplanar joints*. Department Of Civil Engineering, University Of Wales, Swansea, UK.
- 8 - Makino, Y., Y. Kurobane and K. Ochi (1984). "Ultimate capacity of tubular double k-joints." *2nd International Institute Of Welding Conference On Welding Of Tubular Structures*, Boston, Pergamon Press, PP. 451-458.
- 9 - Ma, S. Y. and I. E. Tebbett, Wimpey Offshore (1988). "Estimations of stress concentration factor for fatigue design of welded tubular connections." *OTC Paper # 5666*, Houston, USA.
- 10- Paul, J. C., Y. Makino and Y. Kurobane (1993). "Ultimate resistance of tubular double T-joints under axial brace loading." *J. Constructional Steel Research*, Vol.24, PP. 205-228.
- 11 - Romeijn, A. (1994). *Stress and strain concentration factors of welded multiplanar tubular joints*. ISBN 90-407-1057-0, Delft University Press, The Netherlands.
- 12 - SACS User Manual (1995).
- 13 - Tebbett, I. E. and M. Lalani. (1984). "A new approach to stress concentration factors for tubular Joint design." *OTC Paper # 4825*, Houston, USA.
- 14- Under Water Engineering Group (1985). "Design guidance on tubular joints in steel offshore structure".
- 15 - Vegte Van der, G. J., C. H. M. de Koning, R. S. Puthli and J. Wardenier (1991). "Numerical simulation of experiments on multiplanar tubular steel x-joints." *Int. Journal of Offshore and Polar Engineering*. Vol. 1, PP. 200-207.
- 16- Wordsworth (1981). "Aspect of stress concentration factor at K and KTTubular joints." *Fatigue on Offshore Structural Steels Conference*.
- ۱۷- کریم دادیان، ب. "بررسی پدیده خستگی در اتصالات لوله‌ای سکوه‌های ثابت دریایی." پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های دریایی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، بهمن (۱۳۷۷).

واژه نامه :

- 1 - Uniplanar
- 2 - Multiplanar

اتصالات تک صفحه ای
اتصالات چند صفحه ای

3 - Template	سکوه‌های شابلونی
4 - Tension Leg Platform	سکوه‌های پایه کششی
5 - Jack-Up	سکوه‌های خودبالابر
6 - Deterministic Method	روش جزمی
7 - Spectral Method	روش طیفی
8 - Palmgren-Miner Cumulative Fatigue Damage	شاخص آسیب انباشتگی پالم-گرن-ماینر
9 - Hot Spot Stress or Strain (HSS)	دامنه تنش یا کرنش بحرانی
10 - Stress Concentration Factor (SCF)	ضریب تمرکز تنش
11 - Refine Mesh	شبکه بندی مناسب
