

مقایسه موردی روش‌های مختلف تعیین تنش‌های اسپات در جزئیات سازه کشتی

روح‌الله هادی پور گودرزی^۱، احمد رهبر رنجی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی کشتی‌سازی، سازه کشتی دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- استادیار دانشکده مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

کنترل خستگی و تعیین عمر مفید در سازه‌هایی نظیر کشتی و سکوها دریایی که تحت اثر بارهای نوسانی قرار دارند، یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی سازه محسوب می‌شود. شکست خستگی بصورت ترک در محل جزئیات شروع شده و در سازه گسترش می‌یابد. در سازه‌های فلزی این ترک‌ها در محل جوش شروع می‌شود. اکثر روش‌های بکار رفته برای بررسی عمر خستگی در اتصالات جوش، بر اساس مقادیر تنش در نقاط بحرانی - که هات اسپات نامیده می‌شوند - می‌باشند. کاربردی‌ترین روش تعیین تنش هات اسپات، استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود به همراه استفاده از تعدادی روابط تجربی می‌باشد. این روابط تجربی، اغلب بر اساس خطی‌سازی تنش در جهت ضخامت یا برون‌یابی تنش در سطح می‌باشند. در این مقاله، تنش هات اسپات در یکی از جزئیات رایج در ساختمان کشتی با روش اجزاء محدود و با استفاده از روابط مختلف محاسبه و نتایج با مقادیر بدست آمده از آزمایش تجربی مقایسه شده است. میزان دقت و حساسیت نتایج نسبت به فرضیات مدل‌سازی بررسی گردیده و بهترین رابطه تعیین تنش هات اسپات - با توجه به دقت مورد نیاز، زمان و هزینه - پیشنهاد شده است. **کلمات کلیدی:** خستگی، تنش هات اسپات، روش اجزاء محدود، جزئیات سازه‌ای کشتی

Case Study of Different Calculation Method for Hot Spot Stresses at Ship Structural Detail

Abstract

Fatigue analysis and estimation of safe life of structures that are subjected to cyclic loadings, such as ships and offshore structures is one of the most important steps of structural design. Fatigue failure in the form of crack will start from details and propagate in structure. In steel structures these cracks will started from welds. Most of the methods for fatigue life assessment in welded connections are based on stress values at critical points, called "hot spot". Determination of hot spot stress is done by finite element analysis with using some empirical relations, which is expected to be the most practical method. These empirical relations are mostly based on linearization of stress through the thickness or extrapolating the stress to the hot spot locations. In this paper, different methods are reviewed for the evaluation of hot spot stress at a typical ship structural detail by finite element analysis and the results are compared with an experimental data. Accuracy and sensitivity of hot spot stress to finite element meshing is investigated, and the best method for calculation of hot-spot stress based on required accuracy, time and money is proposed.

Keywords: Fatigue, Hot spot stress, Finite element method, Ship structural detail

۱- مقدمه

شرایط مرزی و نحوه بارگذاری بر نتایج نهایی تاثیر بسزایی داشته و بر همین اساس، روابط مختلفی توسط محققین، آیین نامه ها و بخش های صنعتی ارائه شده است.

در این مقاله، ابتدا به تشریح این روش ها پرداخته شده و سپس بخش های مختلف مدل سازی (شبکه بندی و نوع المان) و تاثیر آنها بر مقادیر تنش هات اسپات بررسی گردیده است. برای مقایسه، نتایج یک آزمایش تجربی منتشر شده مورد استفاده قرار گرفته است. بدین ترتیب، میزان خطای هر روش تعیین و بهترین روش جهت محاسبه تنش هات اسپات پیشنهاد شده است.

۲- روش های تعیین تنش هات اسپات

روش کلاسیک برای تعیین تنش در محل هات اسپات، بر اساس برون یابی خطی و یا برون یابی درجه دوم تنش سازه ای در دو یا سه نقطه مرجع می باشد [۴]. شکل (۳) نقاط مورد نظر برای محاسبه تنش را نشان می دهد. در صورت استفاده از المان های پوسته ای^۳، هرگاه هندسه کلی جوش در نظر گرفته نشود، معمولاً برون یابی در محل خط تلاقی المان (محل الف در شکل (۴)) و در صورت مدل کردن جوش، در محل پنجه جوش (محل ب در شکل (۴)) انجام می شود.

۳- تعیین تنش سازه ای (σ_s)

بطور کلی برای محاسبه تنش سازه ای، روش اجزاء محدود در ترکیب با روش های متفاوت مدل سازی پیشنهاد شده است [۴-۱۰]. این روش ها را می توان بر اساس فرضیات و شرایط هندسی به شرح زیر تقسیم بندی نمود:

الف- نوع المان

المان هایی که برای مدل سازی پیشنهاد شده است، عبارتند از:

- المان پوسته ای ۴-گره ای
- المان پوسته ای ۸-گره ای
- المان صلب ۸-گره ای
- المان صلب ۲۰-گره ای

هات اسپات یک نقطه بحرانی در پنجه جوش^۱ می باشد که احتمال وقوع ترک در آن انتظار می رود. روش تنش هات اسپات با این فرض که افزایش تنش موضعی در محل پنجه جوش را می توان مطابق شکل (۱) به دو قسمت تقسیم نمود، در بررسی استحکام خستگی اتصالات جوش مورد استفاده قرار می گیرد. قسمت اول، مربوط به تنش سازه ای ناشی از هندسه موضعی اجزاء اتصال بوده و قسمت دوم، مربوط به تنش موضعی بریدگی^۲ ناشی از حضور جوش، و محدود به ناحیه ای به فاصله ۲ mm تا ۳ mm در اطراف پنجه جوش می باشد. علاوه بر این، فرض می شود که ارزیابی خستگی می تواند بر مبنای قسمت اول یعنی تنش سازه ای در محل هات اسپات انجام گیرد [۱]. در این روش تنش سازه ای (σ_s) بصورت مجموع تنش غشایی (σ_m) و تنش خمشی (σ_b) در سطح یک عضو سازه ای تعریف شده و از تاثیر تنش غیر خطی ناشی از جوش صرف نظر می شود. به عبارت دیگر:

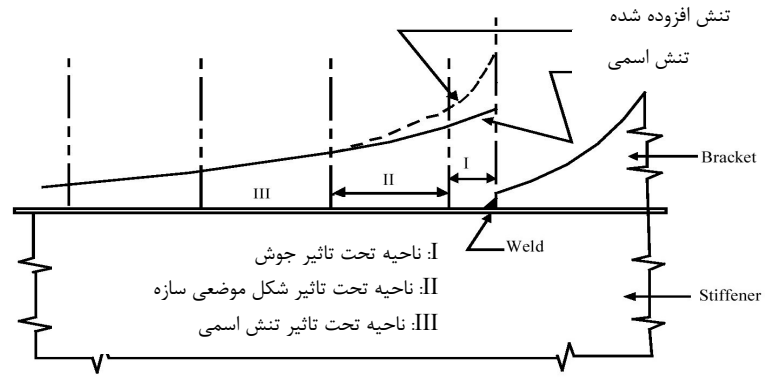
$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \quad (1)$$

تاثیر تنش ناشی از جوش (σ_{nlp}) در منحنی های S-N حاصل از آزمایشات خستگی، به صورت ضمنی در نظر گرفته شده و تنها دو مولفه خطی در تنش سازه ای لحاظ می شوند [۲]. روش های مختلفی برای محاسبه تنش سازه ای هات اسپات در اتصالات جوش وجود دارد. این روش ها یا بر اساس برون یابی تنش ها از نقاط مرجع مشخص روی سطح (یا لبه) ورق در نزدیکی پنجه جوش بوده و یا بر اساس خطی سازی تنش در امتداد ضخامت می باشند. روش تنش هات اسپات همواره مورد انتقاد بوده و به خصوص در زمینه تعیین نقاط مرجع مناسب برای برون یابی، نقطه نظرات متفاوتی وجود دارد. علت این اختلاف، عدم مشخص بودن دقیق مرز دو قسمت یاد شده در بالا و وابسته بودن نقاط مرجع به ضخامت ورق یا پوسته می باشد. از آنجایی که این روش بیشتر با تحلیل اجزاء محدود همراه است، لذا نحوه مدل کردن سازه، نوع المان، تقسیمات شبکه بندی،

¹ Weld Toe

² Notch

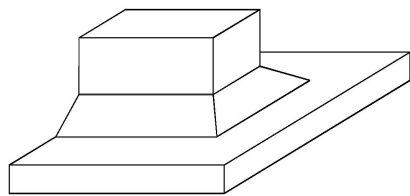
³ Shell Element



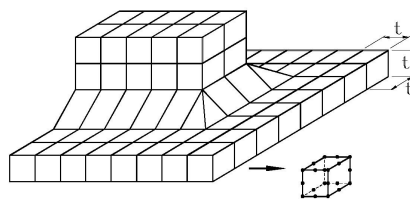
شکل ۱- تقسیم‌بندی فرضی نواحی تحت اثر تنش‌های موضعی در محل اتصال براکت با بال تقویت‌کننده‌های طولی [۳]

$$\sigma_{notch} = \sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nlp}$$

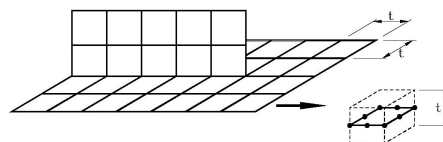
شکل ۲- نمونه‌ای از توزیع غیر خطی تنش در امتداد ضخامت [۲]



نمونه جزء سازه ای

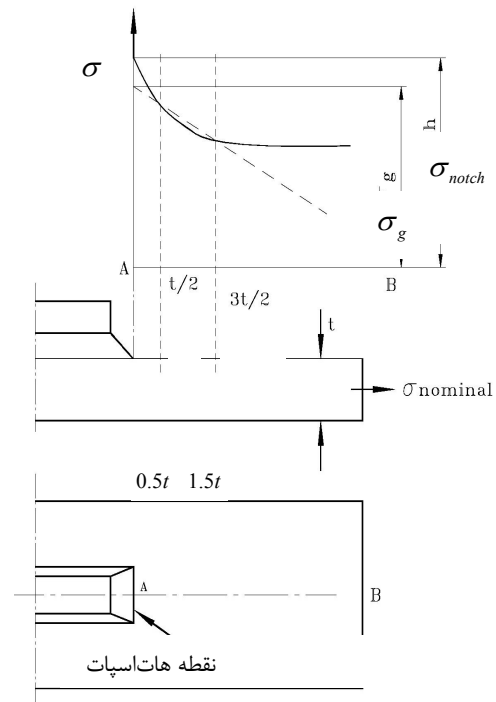


مدل با المان‌های صلب ۲۰ گره ای

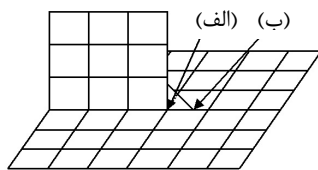


Model with 8-node shell elements (size: t x t)

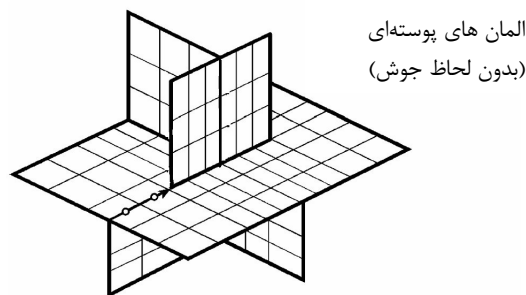
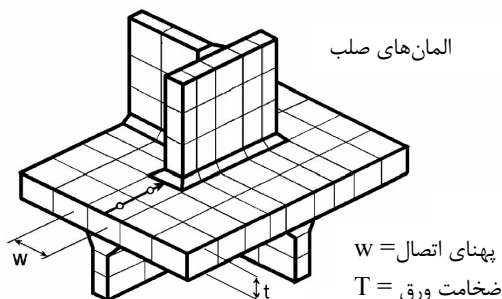
مدل با المان‌های پوسته ای ۸ گره ای



شکل ۳- سمت راست: برون‌یابی تنش‌های اسپات، سمت چپ: اندازه المان‌های پیشنهادی [۶]



شکل ۴- المان پوسته‌ای (الف): خط تلاقی المان (ب): پنجه جوش



شکل ۵- نمونه‌های از مدل‌های المان محدود و مسیر برون‌یابی تنش برای جزئیات سازه‌ای مورد تحلیل [۱]

ت-۳- مقادیر تنش در فاصله $0.5t$ از محل هات‌اسپات [۶]:

$$\sigma_g = \sigma_{0.5t} \quad (۴)$$

ت-۴- روش دانگ

روش پیشنهادی دانگ برای تعیین تنش‌های سازه‌ای، بر اساس خطی‌سازی توزیع تنش در امتداد ضخامت ورق در محل هات‌اسپات استوار بوده و به نحوه مدل‌سازی و نوع المان بکار رفته بستگی دارد [۵]. مزیت این روش آنست که بر خلاف روش‌های مبتنی بر برون‌یابی-که به اندازه المان و شبکه بندی حساس می‌باشند- روش حاضر حساسیتی به نحوه شبکه بندی و اندازه المان در محدوده هات‌اسپات ندارد.

مطابق شکل (۶) تنش سازه‌ای که از لحاظ استاتیکی هم‌ارز با توزیع تنش واقعی می‌باشد، بصورت مجموع تنش غشایی (σ_m) و تنش خمشی (σ_b) در نظر گرفته می‌شود. شرط تعادل بین دو مقطع A-A و B-B (شکل (۷)) که بفاصله δ از یکدیگر قرار دارند، ایجاب می‌کند که:

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x(y) \cdot dy \quad (۵)$$

ب- اندازه المان

اندازه المان‌ها در نزدیکی محل هات‌اسپات بصورت $0.5t \times 0.5t$ یا $0.4t \times t$ ، $t \times w$ ، $t \times t$ پیشنهاد شده که t ضخامت ورق و w پهنای جوش می‌باشد (شکل ۵).

ب- مدل‌سازی جوش

در صورت استفاده از المان‌های صلب^۴، جوش مدل شده و این در حالی است که در المان‌های پوسته‌ای جوش مدل نشده و تنها می‌توان سختی معادل برای آن تعریف نمود.

ت- روش‌ها

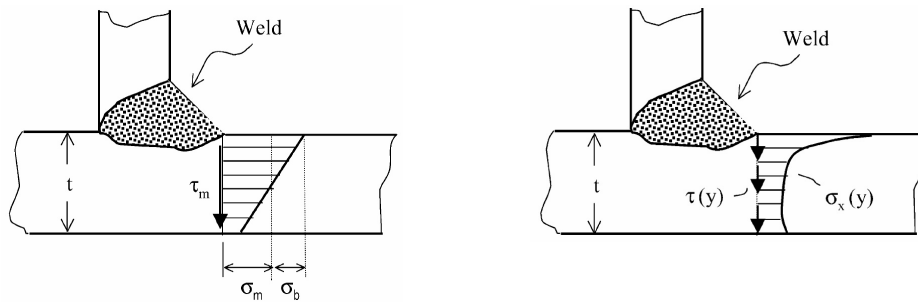
ت-۱- برون‌یابی خطی تنش‌ها از نقاط مرجع در فاصله $0.5t$ و $1.5t$ از محل هات‌اسپات [۱۱-۶] که:

$$\sigma_g = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \quad (۲)$$

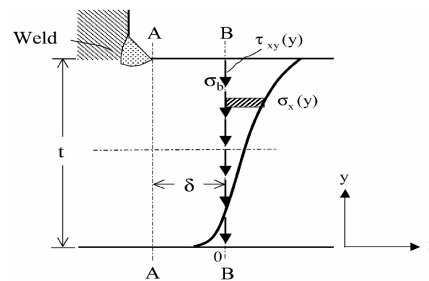
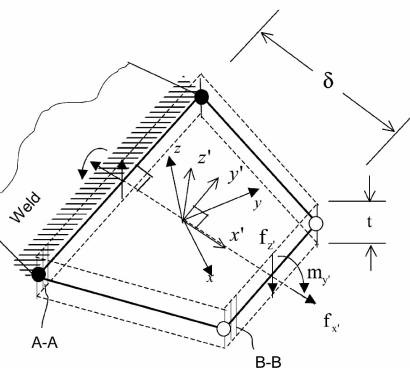
ت-۲- برون‌یابی خطی تنش‌ها از نقاط مرجع در فاصله $0.4t$ و t از محل هات‌اسپات [۲]:

$$\sigma_g = \frac{5}{3}\sigma_{0.4t} - \frac{2}{3}\sigma_{1.0t} \quad (۳)$$

⁴ Solid Element



شکل ۶ - سمت راست: توزیع تنش محوری و برشی در امتداد ضخامت در محل پنجه جوش
سمت چپ: تعریف تنش سازه‌ای در امتداد ضخامت در محل پنجه جوش [۵]



شکل ۷- ارزیابی تنش سازه‌ای برای مدل با المان صلب [۵] شکل ۸- ارزیابی تنش سازه‌ای در المان‌های پوسته‌ای در محل پنجه جوش [۵]

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_{x'}}{t} + \frac{6(m_{y'} + \delta \cdot f_{z'})}{t^2} \quad (7)$$

$$\sigma_m \cdot \frac{t^2}{2} + \sigma_b \cdot \frac{t^2}{6} = \int_0^t \sigma_x(y) \cdot y \cdot dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}(y) \cdot dy \quad (6)$$

۴- نتایج آزمایش تجربی

در مرجع [۱۲] یک قسمت از ساختمان جداره یک نفتکش یا FPSO^۵ با تناژ متوسط مورد آزمایش قرار گرفته است. مدل شامل سه تقویت کننده طولی و یک قاب عرضی با دو محور تقارن طولی و عرضی می‌باشد. قاب عرضی توسط یک لچکی پیچشی^۶ به تقویت کننده طولی میانی و با یک تسمه^۷ به تقویت کننده‌های طولی کناری وصل شده است. مدل از فولاد سازه‌ای با استحکام بالا^۸ و تنش تسلیم بیش از ۳۱۴ Mpa و با

رابطه اول، تعادل نیروها در امتداد x و رابطه دوم تعادل گشتاور خمشی حول مقطع A-A در $y = 0$ می‌باشد. توزیع تنش‌های $\sigma_x(y)$ و $\tau_{xy}(y)$ در مقطع B-B، مستقیماً از نتایج حل اجزاء محدود بدست می‌آیند. هرگاه در این مدل از المان پوسته‌ای استفاده شود، تنش سازه‌ای مستقیماً در محل هات‌اسپات بدست می‌آید، زیرا المان پوسته‌ای از توزیع خطی تنش در امتداد ضخامت استفاده می‌کند. با معلوم بودن مولفه نیروهای المانی $f_{x'}$ ، $f_{z'}$ ، $m_{y'}$ در دستگاه مختصات المانی x' ، y' ، z' در مقطع B-B (شکل ۸)، مقادیر تنش در مقطع A-A بکمک روابط تعادل استاتیکی بدست خواهد آمد:

⁵ Floating Product Storage and Offloading Structures

⁶ Tripping Bracket

⁷ Flat Bar

⁸ High Strength Steel

روش جوشکاری متداول در سازه های کشتی ساخته شده است. بارگذاری از طریق یک بازوی هیدرولیکی توسط یک ورق مثلثی شکل به ضخامت 40 mm که به ورق بال^۹ قاب عرضی متصل می باشد، بصورت افقی به مدل وارد می گردد. بار بصورت تدریجی از صفر تا مقدار نهایی 392 kN افزایش یافته و تغییر شکل ها و کرنش ها در چند نقطه اندازه گیری شده اند (به شکل های (۱) و (۲) ضمیمه رجوع شود).

۵- تعیین تنش به روش تئوری خمش ساده

برای تعیین تنش، ابتدا از تئوری ساده تیرها استفاده شده است. مدل تحلیلی شامل تقویت کننده طولی بهمراه ورق متصل به آن می باشد (شکل (۹)). پهنای این ورق^{۱۰} برابر با فاصله تقویت کننده های طولی اختیار می شود [۱۳]. مقدار بار، شرایط مرزی و نتایج تحلیل در شکل (۹) نشان داده شده است. چنانچه مشخص است مقدار تنش هات اسپات با این روش برابر با مقدار 113,7 Mpa بدست می آید.

۶- تعیین تنش به کمک مدل های المان محدود

بمنظور بررسی تاثیر شرایط مختلف مدل سازی روش اجزاء محدود، سازه مورد نظر در نرم افزار ANSYS [۱۴] مدل شده است. نرم افزار ANSYS یک نرم افزار شناخته شده در تحلیل سازه های کشتی می باشد [۱۵].

در جدول (۱) ضمیمه، فرضیات متفاوت مدل سازی و در جدول (۲) ضمیمه، نمونه ای از شبکه بندی در محل هات اسپات نشان داده شده است.

در شکل (۱۰)، تاثیر محل استخراج داده ها در مدل هایی که از المان پوسته ای استفاده شده و از مدل سازی جوش صرف نظر گردیده، بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در شکل (۱۱)، تاثیر نوع المان و اندازه شبکه بندی و روش های استخراج تنش هات اسپات مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج تحلیل با مدل ساده جوش، در شکل (۱۲)، نشان داده شده است. این مدل از المان پوسته ای تشکیل شده و برای نشان دادن جوش در محل واقعی، ضخامت یک نوار المانی در امتداد پایه تسمه^{۱۱} به اندازه یک طول پنجه جوش اضافه شده است (مدل (۶) در جدول (۲) ضمیمه). این ضخامت در واقع متوسط ضخامت جوش در امتداد عمود بر سطح بال می باشد. نوار المانی تا محل واقعی پنجه جوش امتداد دارد.

در شکل (۱۳)، نتایج حاصل از یک مدل ساده با استفاده از ترکیب المان های پوسته ای و خریایی ارائه شده است که در مقایسه با نتایج تجربی قابل توجه می باشد. روش مذکور بدلیل سادگی و سهولت مدل سازی، می تواند تقریب اولیه ای از نتایج تنش ارائه دهد.

۷- بحث و نتیجه گیری

(۱) در مدل های پوسته ای که جوش در نظر گرفته نمی شود، مقادیر استخراج شده تنش ها نسبت به محل پنجه جوش بسیار کمتر از مقادیر تجربی می باشد. این مقادیر در مسئله حاضر در حد تنش های حاصل از تئوری ساده تیرها بوده و غیر مطلوب می باشد. اما استخراج تنش ها نسبت به نقطه تلاقی المانی، جواب مناسب تری در مقایسه با نتایج تجربی می دهد. این بدلیل آنست که سختی موضعی در نقاط تلاقی المان باعث افزایش تنش شده و این سختی در نقاط دورتر کمتر می باشد.

(۲) استفاده از المان های پوسته ای ۴-گره ای^{۱۲} و ۸-گره ای^{۱۳} تفاوتی ندارد اما با توجه به نتایج شکل (۱۱)، می توان مشاهده نمود که استفاده از المان های پوسته ای ۸-گره ای این امکان را فراهم می سازد که تغییرات شدید تنش در نزدیک هات اسپات دقیق تر مشاهده شود. این امر بدلیل وجود گره های میانی می باشد. در مدل های بزرگ

¹¹ Flat Bar

¹² Shell 63

¹³ Shell 93

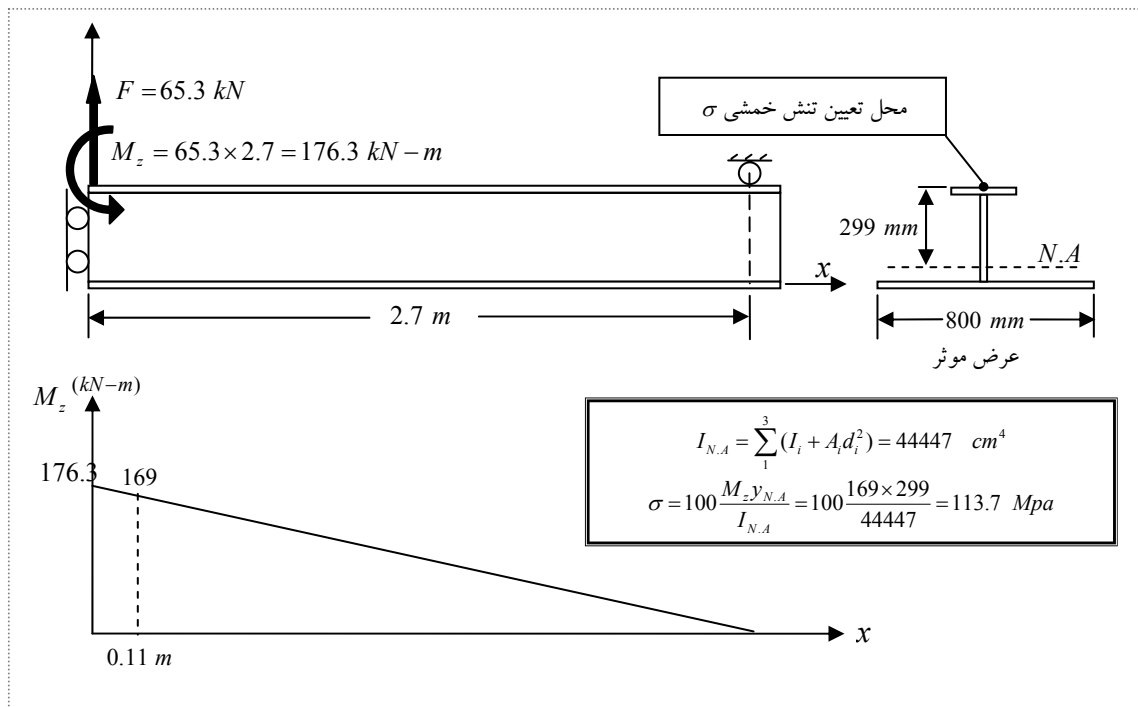
⁹ Flange

¹⁰ Effective Breadth

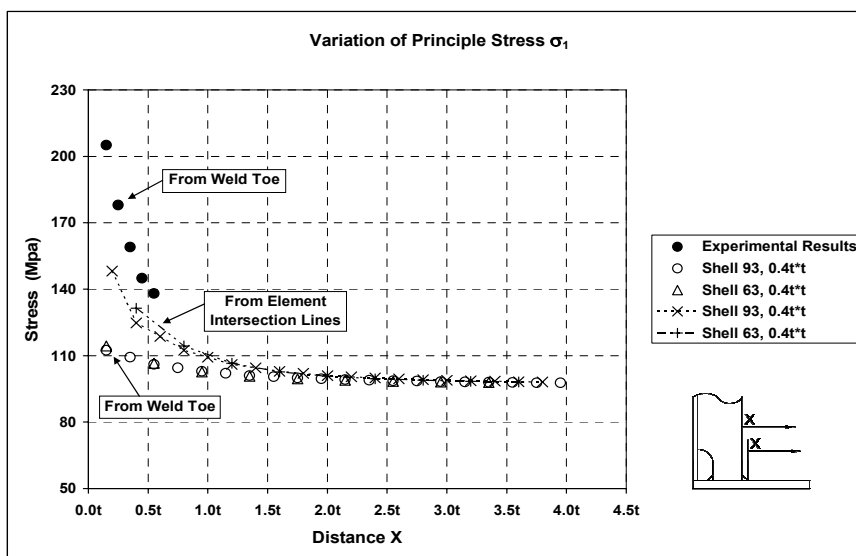
گرفتن جوش، حدود ۳۵٪ و با لحاظ کردن جوش حدود ۱۰٪ خطا ایجاد می‌کند.

استفاده از این المان منجر به افزایش زمان تحلیل خواهد شد.

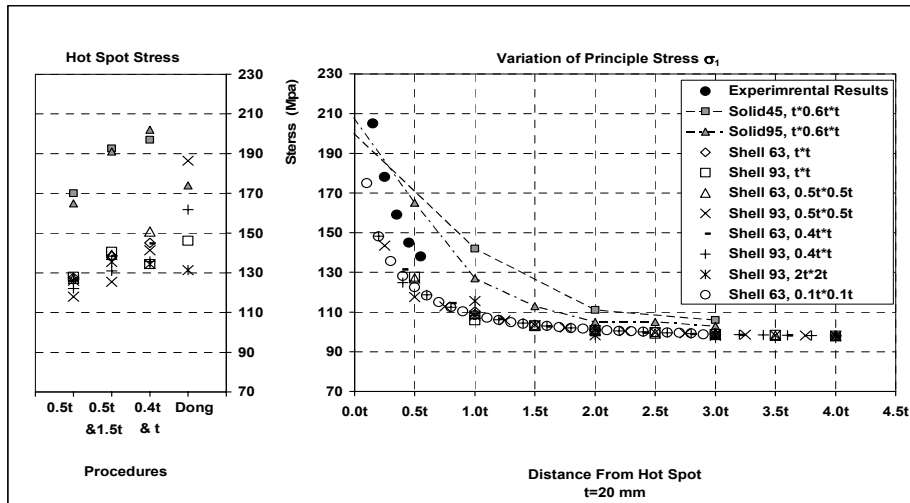
۳) استفاده از المان‌های صلب و مدل کردن جوش، دقیق‌تر بوده و المان‌های پوسته‌ای بدون در نظر



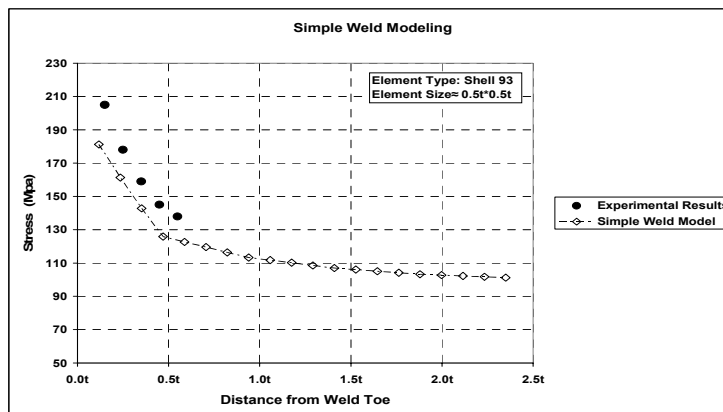
شکل ۹ - مدل تحلیلی ساده و نمودار تغییرات لنگر خمشی



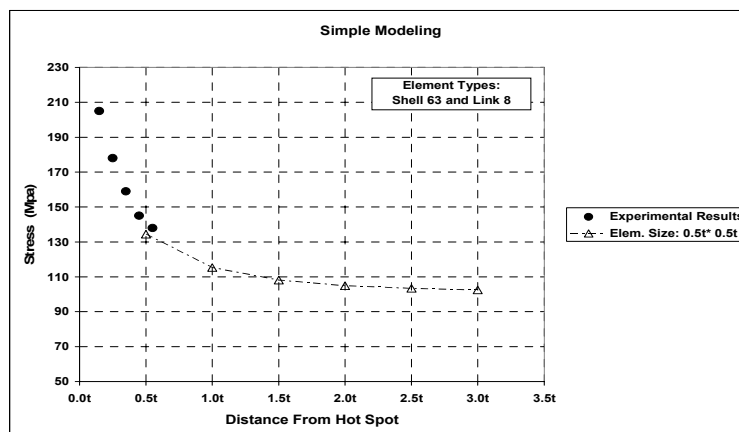
شکل ۱۰ - مقایسه نتایج تنش با توجه به محل استخراج



شکل ۱۱- سمت چپ: مقایسه تاثیر نوع و ابعاد المان بر تنش
سمت راست: تنش هات اسپات به روش های مختلف



شکل ۱۲- تاثیر مدل سازی جوش به روش ساده (مدل (۶) در جدول ۲ ضمیمه)



شکل ۱۳- نتایج حاصل از فرضیات ساده سازی مدل (مدل (C) در جدول ۱ ضمیمه)

جدول ۲- نتایج تنش‌های اسپات (بر حسب Mpa)

نوع المان				روش
صلب ۲۰ گره ای	صلب ۸ گره ای	پوسته ای ۸ گره ای	پوسته ای ۴ گره ای	
۱۶۵	۱۷۰	۱۲۲±۵	۱۲۷	0.5t
۱۹۱	۱۹۲,۵	۱۳۳±۸	۱۳۸,۵	0.5t و 1.5t
۲۰۲	۱۹۷	۱۳۸±۴	۱۴۸±۳	0.4t و t
۱۷۴	-	۱۵۸±۲۷	-	دانگ

(۷) روش‌های فوق هر کدام بر مبنای فرضیاتی استوار هستند که با توجه به کاربرد آسان می‌توانند بعنوان ابزار قابل قبول و عملی در محاسبات تنش سازه‌ای بکار روند. انتخاب روش مناسب به میزان دقت مورد نظر بستگی دارد.

۸- مراجع

1-Fricke, W., "Recommended Hot Spot Analysis Procedure for Structural Details of FPSO's and Ships Based on Round-Robin FE Analysis", Technical University of Hamburg-Harburg, Germany.

2-Niemi, E., and Marquis, G., "Introduction to the Structural Stress Approach to Fatigue Analysis of Plate Structures", Lappeenranta University of Technology.

3-American Bureau of Shipping, "Rules for Building and Classing Steel Vessels-Part 5", draft 2000.

4-Doerk, O., Fricke, W., and Weissenborn, C., "Comparison of Different Calculation Methods for Structural Stresses at Welded Joints", International Journal of Fatigue, Vol. 25, 2003, pp. 359-369.

5-Dong, P., "A Structural Stress Definition and Numerical Implementaion for Fatigue Analysis of Welded Joints", International Journal of Fatigue, Vol. 23, 2001, pp. 865-876.

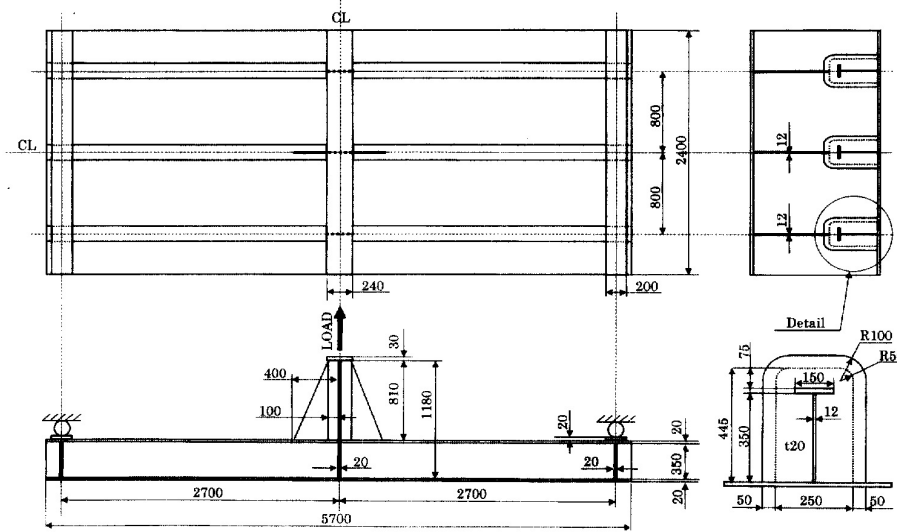
(۴) در جدول ۲ نتایج روش‌های مختلف ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، در سه روش اول میزان پراکندگی نتایج نسبت به اندازه المان‌های پوسته‌ای در نزدیکی محل‌های اسپات، بسیار کم بوده است، اما مقدار تنش‌های اسپات نسبت به روش برون‌یابی حساسیت بیشتری دارد. بگونه‌ای که نتایج حاصل از روش‌های مختلف برای هر نوع المان با اندازه‌های مختلف، حداکثر ۱۵٪ با هم اختلاف دارند.

(۵) نتایج حاصل از کاربرد روش دانگ، برخلاف آنچه انتظار می‌رفت دارای پراکندگی زیادی بوده و نسبت به اندازه المان حساس می‌باشد. بگونه‌ای که نتایج حاصل از کاربرد این روش، حدود ۲۰٪ اختلاف نشان می‌دهد.

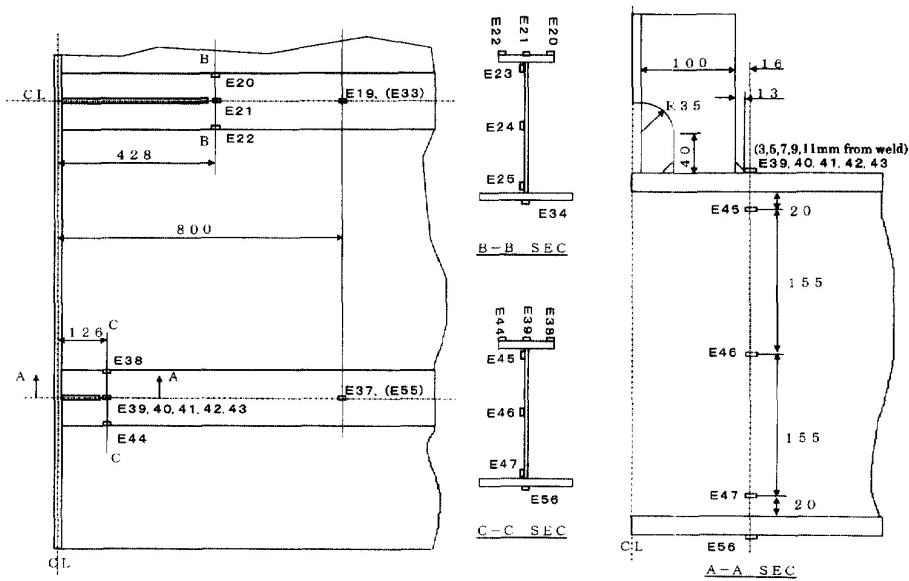
(۶) نتایج حاصل از المان پوسته‌ای ۴-گره‌ای با ابعاد $0.1t \times 0.1t$ که در شکل ۱۱ ارائه شده است، نشان می‌دهد در صورتی که جوش در نظر گرفته نشود، کوچک کردن ابعاد المان، تنها می‌تواند تغییرات شدید تنش در محل‌های اسپات را نشان دهد و در مقایسه با نتایج حاصل از ابعاد المانی بزرگتر، تفاوتی در مقدار تنش‌های اسپات بدست نمی‌آید. در واقع، در مدل‌هایی که جوش در نظر گرفته نمی‌شود، همواره یک اختلاف ذاتی با مقادیر واقعی وجود خواهد داشت که بخاطر عدم لحاظ سختی جوش می‌باشد.

- 12-Iwahashi, Y., Sumi, Y., Hu, T., Paetzold, H., Wu, C.C., Jang, C.D., Rigo, P., Nie, W., and Kawano, H., "Finite Element Comparative Study of Ship Structural Detail", Journal of Marine Structures, Vol. 11, 1998, pp. 127-139.
- 13-Rawson, K.J., and Tupper, E.C., "Basic Ship Theory", 5th ed., Butterworth Heinemann, 2001.
- 14-ANSYS User's Guide, Revision 7.0, Swanson Analysis Systems.
- 15-Basu, R.I., Kirkhope, K.J., and Srinivasan, J., "Guidelines for Evaluation of Ship Structural Finite Element Analysis", SSC Report 387, Ship Structure Committee, 1996.
- 6-Det Norske Veritas, Recommended Practice DNV-RP-C203, draft October 2001.
- 7-American Bureau of Shipping, "Guide for the Fatigue Assessment of Offshore Structures", 2003.
- 8-Nippon Kaiji Kyokai, "Guidelines for Fatigue Strength Assessment", draft November 2001.
- 9-Registro Italiano Navale, Pt.B Ch.7 Sec.4, Rina Rules, 2003.
- 10-IACS, "Fatigue Assessment of Ship Structures", Recom. No. 56, July 1999.
- 11-Germanischer Lloyd. "Rules for Classification and Construction- Guidelines for Fatigue Strength Analysis of Ship Structures", ed. 2000.

۹- ضمایم

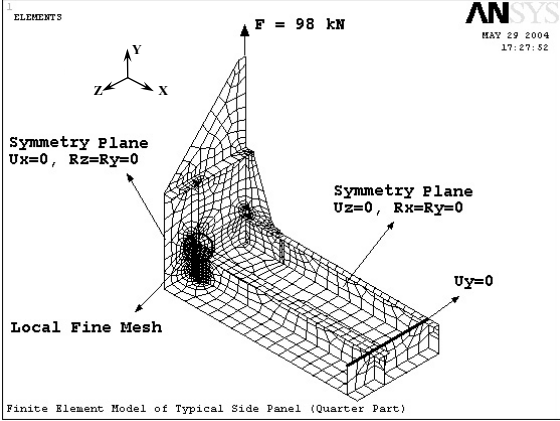
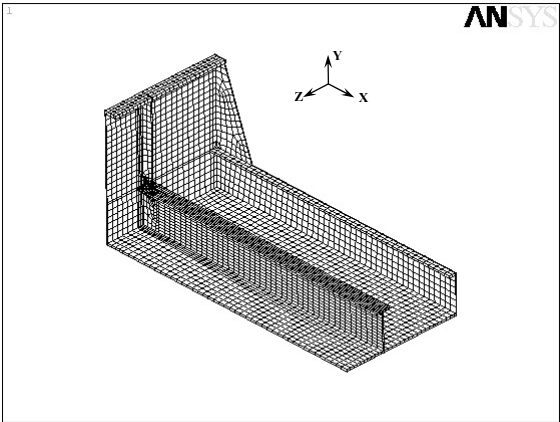
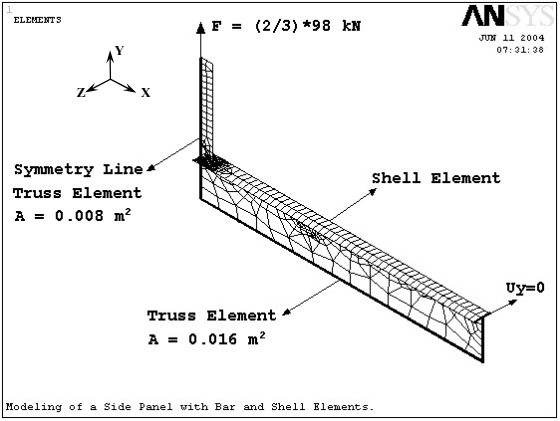


شکل ۱- مدل تجربی [۱۲]

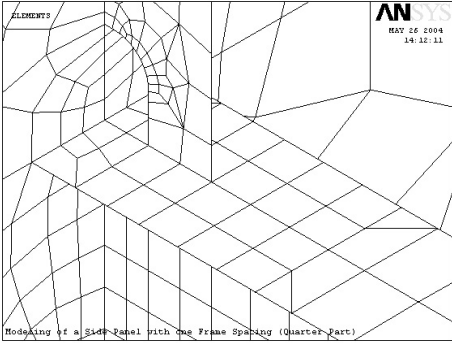
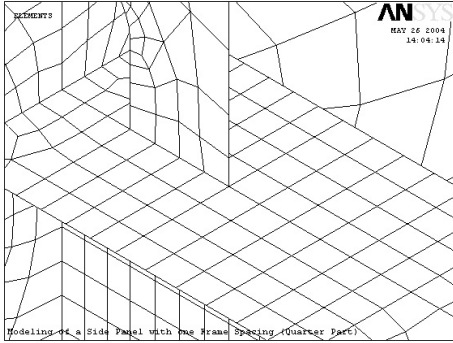
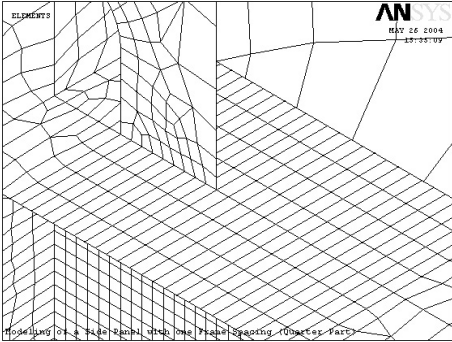
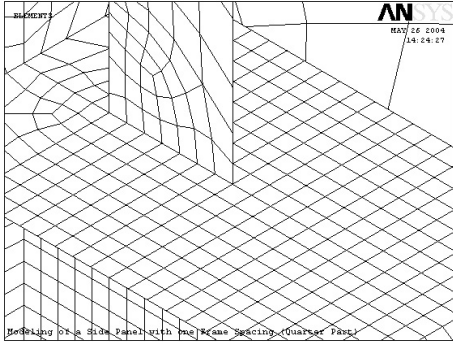


شکل ۲- موقعیت کرنش سنج‌ها [۱۲]

جدول ۱- مدل‌های المان محدود

مشخصات مدل	انواع مدل المان محدود	ردیف
<p>نوع المان: المان‌های پوسته‌ای (۴-گره‌ای یا ۸-گره‌ای) اندازه مدل: یک چهارم نمونه کامل شرایط مرزی: شرط مرزی متقارن (در صفحات تقارن) شرط مرزی ساده (در تکیه‌گاه)</p>		A
<p>نوع المان: المان‌های صلب (۸-گره‌ای یا ۲۰-گره‌ای) اندازه مدل: یک چهارم نمونه کامل شرایط مرزی: شرط مرزی متقارن (در صفحات تقارن) شرط مرزی ساده (در تکیه‌گاه غلطکی)</p>		B
<p>نوع المان: ترکیبی از المان‌های پوسته‌ای ۴-گره‌ای و المان‌های خربایی اندازه مدل: یک چهارم نمونه کامل شرایط مرزی: شرط مرزی متقارن (در محور تقارن) شرط مرزی ساده (در تکیه‌گاه غلطکی)</p>		C

جدول ۲- نحوه شبکه بندی موضعی و ابعاد المان

۱	$2t \times 2t$	۲	$t \times t$
			
۳	$0.4t \times t$	۴	$0.5t \times 0.5t$
			
۵	مدل با المان صلب و در نظر گرفتن جوش	۶	مدل ساده جوش با المان پوسته‌ای
	