

تعیین ضرائب تمرکز تنش در مخازن کروی با یک انشعاب شعاعی - بررسی پارامتری

خسرو نادران طحان

استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده:

در تحلیل سازه کره- استوانه، وقتی که استوانه بصورت غیرشعاعی به کره متصل شده باشد، حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی تعادل به دلیل تغییر کمیت‌ها با متغیر مداری θ از حل معادلات برای این سازه وقتی که با تقارن محوری باشد مشکلتر است. ضرورت دارد تا روشهای سریع، مطمئن و ساده برای تحلیل اینگونه سازه‌ها پیدا و بکار گرفته شوند. یک روش انتخابی برای آنالیز سازه موردنظر می‌تواند روش المان معین (Finite Element Method) باشد مشروط بر اینکه قابل اطمینان بودن این روش و برنامه کامپیوتری و فرمولبندی‌های آن قبلاً ارزیابی شده باشد. این مقاله اختصاصاً به بررسی و ارزیابی روش مذکور و برنامه کامپیوتری آباکوس (ABAQUS) دارد و سازه تحت مطالعه یک مخزن کروی با یک انشعاب شعاعی بعنوان حالت خاصی از یک سازه غیرمتقارن است.

در این بررسی ابتدا توزیع تنش‌های حاصل در اثر فشار داخلی مخزن با اطلاعات موجود مقایسه شده و پس از اطمینان از عملکرد روش و برنامه مورد اشاره ضرائب تمرکز تنش تحت بارگذاری مذکور و برای دامنه نسبتاً وسیعی از پارامترهای هندسی سازه تعیین گردیده و به صورت جدول و نمودار ارائه شده‌اند. حالت‌های خاص نظیر وجود دریچه دایره‌ای در مخزن و نیز اتصال در پوشش صلب به مخزن نیز بررسی شده‌اند. همچنین به بارهای متمرکز محوری و ممان خمشی روی انشعاب بطور اجمال اشاره شده است. در تمام بررسیها فرض بر این است که سازه از پوسته نازک ساخته شده است و رفتار آن الاستیک و تغییر مکانها کوچکند. در آنالیز این سازه از المان عمومی پوسته (بدون تقارن محوری) استفاده شده است.

Stress Concentration Factors in Spherical Vessels with Single Radial Nozzle by Finite Element Method- a Parametric Survey

Khosro Naderan - Tahan, Ph.D.

Assistant Prof, Mech. Eng. Dept, Shahid Chamran University Ahwaz, Iran.

ABSTRACT

The solution of partial differential equations for a non symmetric sphere- cylinder intersection is more difficult than the symmetrical case since the quantities at the junction change with both circumferencial and meridional parameters. It is necessary to find and use reliable, quick, and simple methods to analyse such structures. The finite element method can be an ideal tool provided that the reliability of the method, the computer program and its formulation methods are evaluated already. This paper investigates and evaluates the ability of the finite element method and ABAQUS computer program in analysing a radial sphere-

cylinder intersection as a limit case of a non symmetrical intersection with zero angle of obliquity.

In this survey stress distributions around the junction under internal pressure are compared with the existed data and after confirmation the stress concentration factors under such loading are calculated for a wide range of geometrical parameters and the results are presented as tables and graphs. Unreinforced circular holes and rigid boss connections are also investigated as special cases. External loadings on the branch are discussed briefly. Thin shell theory, elastic behavior, and small deflections are considered in all cases. General shell element (non symmetric element) is used in this study to evaluate its performance.

مقدمه

صورت گرفته است. المان مورد استفاده از نوع پوسته نازک با تقارن محوری است. مجموعه‌ای از مدل‌های فولادی مخزن کروی نازک با یک انشعاب شعاعی در مآخذ ۱۱ توسط کرنش‌سنج‌ها تحت بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با اطلاعات بدست آمده از برنامه‌های کامپیوتری که مخصوصاً تدوین شده‌اند و می‌توانند بارهای حرارتی را نیز آنالیز نمایند مقایسه شده‌اند.

۱ - روش انجام بررسی

آنالیز انشعابات در مخازن تحت فشار یا بارهای متمرکز به کمک روش المان معین، هم بخاطر اهمیت نقش انشعابات در طراحی مخازن و هم بخاطر جاذبه رقابت برانگیز مسأله مورد علاقه و توجه طراحان و تحلیل‌گران است. با تقسیم هر سازه به تعداد معینی نواحی بنام المان می‌توان این روش را برای تحلیل سازه‌های پیچیده و نامتقارن با شرایط مرزی هندسی نامنظم بکار برد.

از بین مجموعه‌های مختلف روش المان معین که در دسترس است، مجموعه آباکوس (ABAQUS) مآخذ ۱۲، که در مرکز کامپیوتر منطقه‌ای دانشگاه منچستر (UMRCC) وجود دارد بخاطر تواناییها و عملکرد مطلوب آن در حل بسیاری از مسائل مختلف مهندسی و آنالیز سازه‌های غیرمقارن و مقارن در محدوده رفتار الاستیک مواد سازه و همچنین بکارگیری تئوریهای مربوط به تغییر مکانهای کوچک و بزرگ و رفتار غیرخطی هندسی و مواد و نیز سهولت کار با آن برای انجام بررسی انتخاب گردید.

مدل المان معین - برای تهیه مدل مخزن کروی با یک انشعاب شعاعی بدون دنباله به عنوان حالت خاصی از یک سازه غیرمقارن، المان عمومی (نامتقارن) پوسته با انحنا دوگانه $S8R$ که دارای هشت گره است بکار برده شد. کاربرد این المان برای مدل کردن پوسته‌های ضخیم مخصوصاً هنگامی که رفتار برشی غریب‌تر و تروپیک باید مدل شود توصیه شده است. هرگاه این

تاکنون روشهای تحلیلی قابل اطمینانی برای آنالیز الاستیک انشعاب‌های شعاعی در مخازن کروی نازک که تحت فشار داخلی و یا نیرو و ممان خارجی قرار دارند تدوین شده است. این روشها عموماً مبتنی بر تئوری پوسته‌های نازک الاستیک با تقارن محوری و برای تغییر مکانهای کوچک بوده و بنابراین نمی‌توانند اثرات ناشی از تقویت اطراف محل انشعاب را ارزیابی نمایند. نتایج حاصل از این روشها عموماً بوسیله مطالعات تجربی تأیید می‌شوند. تعداد قابل ملاحظه‌ای از این روشها را در کارهای گذشته می‌توان پیدا کرد. در مآخذ ۱ و ۲ و ۳ فهرستی از این کارها ارائه شده است.

آنالیز سازه مقارن کره - استوانه با استفاده از روش المان معین به عنوان حالت خاصی از این سازه وقتی که انشعاب استوانه‌ای به صورت غیرشعاعی به مخزن کروی متصل شده باشد در مآخذ ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. در مآخذ ۵ تئوری مخصوصی تدوین شده و با کمک آن انشعاب دنباله‌دار و بدون دنباله در مخزن کروی مورد مطالعه قرار گرفته و ضرائب تمرکز تنش براساس تنش اصلی ماکزیمم در کره محاسبه شده‌اند ولی تنش‌های موجود در انشعاب نادیده گرفته شده‌اند. اطلاعات مربوط به محاسبه تنش‌ها در انشعابات پوسته‌های کروی بعداً در مآخذ ۶ ارائه گردیدند. ضرائب تمرکز تنش با استفاده از مفهوم تنش برشی ماکزیمم و برحسب تنش غشائی در کره و نیز تأثیر پارامترهای هندسی بر این ضریب در مآخذ ۷ ارائه شده‌اند.

مسأله تقویت محل انشعاب و تأثیر پارامترهای هندسی و شکل‌های مختلف تقویت به کمک روش المان معین و استفاده از المانهای توپر دوسعدی با تقارن محوری در مآخذ ۸ مورد مطالعه قرار گرفته است. فرمولبندیهایی که در این گزارش مورد استفاده قرار گرفته‌اند مربوط به اجسام توپر الاستیک‌اند. تقویت محل اتصال انشعاب شعاعی مخزن کروی توسط وصله‌ها در مآخذ ۹ بررسی شده است. مطالعه نسبتاً جامع مخازن کروی با انشعاب شعاعی به کمک روش المان معین در مآخذ ۱۰

المان در يك شبكه با اعوجاج زياد و ضخامت‌های خيلي كم بكار گرفته شده، نتايج حاصل نظير مواردی است كه پوسته خيلي نازك انعطاف‌ناپذیری بیشتری داشته باشد. مخزن به صورت نیمكره در نظر گرفته شده و سپس با انتخاب يك صفحه تقارن فقط برای نصف آن با بكار بردن ۱۸۰ المان پوسته ایزوپارامتریک كه اندازه آنها در محل اتصال بتدریج كوچك شده و بیشترین تعداد المانها در مجاورت این محل متركم هستند و يك المان صفحه ضخیم به عنوان درپوش انشعاب، مدلی تهیه گردید. در هر مدل ۶۰۵ گره با ۳۶۳۰ درجه آزادی وجود دارد و مجموعاً قریب ۱۲۰ مدل آنالیز شد. زمان تقریبی CPU برای آنالیز هر مدل با استفاده از سوپر كامپیوتر CYBER 205 تقریباً ۱۳۰ ثانیه است. شرایط مرزی مناسب انتخاب شد و پیوستگی تغییر مکانها و دوران گره‌ها در امتداد نصف منحنی فصل مشترك انشعاب و مخزن در ۲۱ نقطه تأمین گردیده است. طول انشعاب به اندازه كافی طویل در نظر گرفته شده است تا اثرات اتصال درپوش در ناحیه فصل مشترك انشعاب و مخزن تداخل نكند. فصل مشترك استوانه و كره تیز و بدون هرگونه ماده اضافی تقویت كننده یا شعاع گوشه در نظر گرفته شده و در تمام مدل‌ها نازك بودن مخزن و انشعاب بطور همزمان با شرط بزرگتر بودن نسبت شعاع به ضخامت از ۱۰ رعایت شده است. برای تولید مدل‌های مختلف در محدوده وسیعی از پارامترهای هندسی شعاع مخزن ثابت ولی ضخامت آن و یا شعاع و ضخامت انشعاب تغییر یافته‌اند.

برای درك بهتر از چگونگی توزیع تنش‌ها و تأثیر ناپیوستگی هندسی محل اتصال در تنش‌های غشایی چند مدل به كمك المان نامتقارن پوسته تهیه شد. المان متقارن پوسته SAx2 (با تقارن محوری) با سه گره از مجموعه آباكوس برای ارزیابی عملکرد و مقایسه نتايج حاصل از کاربرد این دو المان با نتايج حاصل از المان متقارن محوری برنامه كامپیوتری دیگری كه با روش "تفاوت معین" محاسبات را انجام می‌دهد، مأخذ ۱۴، و نیز برای مقایسه با سایر اطلاعات موجود بكار گرفته شد.

تنش‌ها و تغییر شكل‌ها در نقاط انتگرال‌گیری و روی سطوح داخلی و خارجی پوسته محاسبه می‌شوند. با استفاده از مقادیر كمیت‌ها در نقاط انتگرال‌گیری و با برون‌یابی، متوسط این مقادیر در گره تعیین می‌گردد. از آنجا كه تعیین مقادیر متوسط به كمك مقادیری كه در دو طرف ناپیوستگی قرار دارند فاقد معنی فیزیکی است، برای تعیین این مقادیر در فصل مشترك كره، اثرات مجموعه المانهای كره و استوانه بطور جداگانه منظور شده است.

ضرائب متركز تنش - حالت تنش در هر نقطه از يك سازه بوسیله اندازه و جهت سه تنش اصلی كاملاً معین می‌شود. ماكزیمم تنش برشی در يك نقطه برابر است با نصف تفاوت بین بیشترین و كمترین مقدار جبری تنش‌های اصلی در آن نقطه یا

بعبارت دیگر $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$ برحسب تعریف $SCF = 2\tau_{max} / (PR/2T)$ ضریب متركز تنش نامیده می‌شود كه در آن $PR/2T$ تنش غشایی در مخزن كروی است. در مواردی این ضریب با استفاده از تنش اصلی ماكزیمم بجای دوبرابر تنش برشی ماكزیمم نیز تعریف می‌شود كه در این صورت آنرا "ضریب متركز تنش بر مبنای تنش اصلی ماكزیمم" می‌نامند. ضرائب متركز تنش با استفاده از مقادیر تنش اصلی در گره‌های المانهایی كه در مجاورت فصل مشترك قرار دارند محاسبه شده‌اند.

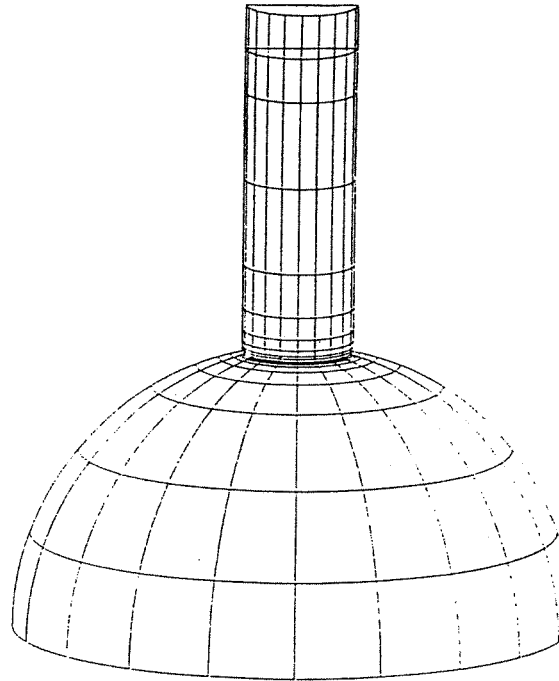
انواع دیگر بارگذاری - در مواردی اعمال بارگذاری متركز روی سازه‌هایی كه از نظر هندسی متقارن هستند منجر به حل معادلاتی خواهد شد كه در آنها مشتقات جزئی كمیت‌ها نسبت به متغیر مداری θ صفر نیست. سازه متقارن متشكل از كره و انشعاب شعاعی استوانه‌ای تحت بارهای متركز محوری و ممان خمشی كه به انشعاب وارد می‌شود در مأخذ ۵ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. مأخذ ۵ با نوشتن معادلات تعادل و استفاده از تئوری پوسته‌های نازك و مأخذ ۱۰ به كمك روش المان معین توزیع تنش‌ها و ضرائب متركز تنش را با فرض متقارن بودن سازه ارائه نموده‌اند. برای اینکه بتوانیم امکان تممim روش المان معین را برای سایر بارگذاریها در سازه‌های غیرمتقارن نیز بررسی كنیم. سازه كره - استوانه را بعنوان حالت خاصی از يك سازه نامتقارن پوسته نیز بررسی و نتايج حاصل با بعضی از اطلاعات موجود در سایر مأخذ مقایسه شده‌اند.

۲ - نتايج

برای مدل‌هایی با نسبت‌های هندسی متفاوت، انواع مختلف المانهای مورد استفاده، تعداد المانها، و نیز شرایط مرزی مختلف، تحت فشار داخلی، توزیع تنشها و ضرائب متركز تنش و زمان اجراء برنامه تعیین شدند. برای مقایسه نتايج حاصل با اطلاعات موجود در سایر منابع تا آن اندازه كه در دسترس بودند، جدول ۱ تنظیم شد. با توجه به نزدیکی ضرائب متركز تنش و نیز مناسب بودن ظرافت شبكه و شرایط مرزی، به منظور درك بهتر توزیع تنش در امتداد نصف النهار كره و مولد استوانه، مدلی با مشخصات $t=1mm$ و $r=10mm$ و $T=1mm$ و $R=50mm$ از جنس فولاد با مدول الاستیسیته $E=2 \times 10^5 MPa$ و $\nu=0.3$ تهیه شد. تنش‌های مداری HS و نصف النهاری MS روی سطوح داخلی و خارجی سازه محاسبه و سپس برحسب فاصله از محل اتصال در شكل ۲ رسم شدند. در شكل‌های ۳ و ۴ تنش‌های حاصل از روش المان معین با المان نامتقارن پوسته و تنش‌های حاصل از روش تفاوت معین با المان متقارن پوسته در يك نمودار رسم شده‌اند تا بتوان آنها را به سادگی با يكدیگر مقایسه نمود. نزدیکی نتايج حاصل از کاربرد المان نامتقارن پوسته و المان متقارن محوری در برنامه آباكوس

جدول ۱ - مقایسه ضرائب تمرکز تنش حاصل از روش المان معین
بامقادیر موجود در سایر مآخذ و المان‌های مختلف

Model geometry	Element type	Fixed BC #from ap	No. of El me.xci.	CPU sec	SCF
r/R=0.2, R/T=50, t/T=1	SBR	90°	18x10	137	3.57
	SAX2	90°	18x1	19.8	3.59
	SAX2	177°	18x1	20	3.49
	SAX2	177°	256x1	37	3.56
	BOSOR4 Ref(8)	90°	18x1	18	3.66 4.0
r/R=0.5, R/T=25, t/T=1	SBR	90°	18x10	133	4.3
	SBR	177°	18x10	133	4.23
	SAX2	90°	256x1	37	4.31
	Ref(8)				5.38
r/R=0.2, R/T=148.8 t/T=1	SBR	90°	18x10	133	5.53
r/R=0.082 R/T=40.14 t/T=0.329	SAX2	90°	18x1	20	2.81
	Ref(8)				2.85
	Ref(12)				2.81



شکل ۱ - مدل المان معین مخزن کروی با انشعاب شعاعی. این مدل با استفاده از المان عمومی پوسته تهیه شده است.

جدول ۲ - مقایسه ضرائب تمرکز تنش برای r/R=1

t/T	0.0	0.25	0.5	1.0
F.E.M.	1.0	2.47	2.15	1.51
Theoretical	1.0	2.47	2.13	1.50

جدول ۵ ارائه گردید.

سودار تغییرات ضرائب تمرکز تنش در کره برحسب پارامتر $\sqrt{R/T}$ و برای هر r/R و t/T بطور جداگانه در شکل ۵ رسم شدند.

برای بررسی اجمالی اثرات شعاع گوشه روی ضریب تمرکز تنش مدلی با مشخصات $R=69mm$ و $T=3mm$ و $t=2.25mm$ و $r=21.125mm$ شعاع گوشه روی سطح خارجی سازه $r'=1mm$ در نظر گرفته شد. برای آنالیز این مدل از برنامه کامپیوتری دیگری که با استفاده از روش المان معین و به کمک المان توپر با تقارن محوری سازه‌ها را آنالیز می‌کند، استفاده شده نتایج حاصل بصورت زیر است:

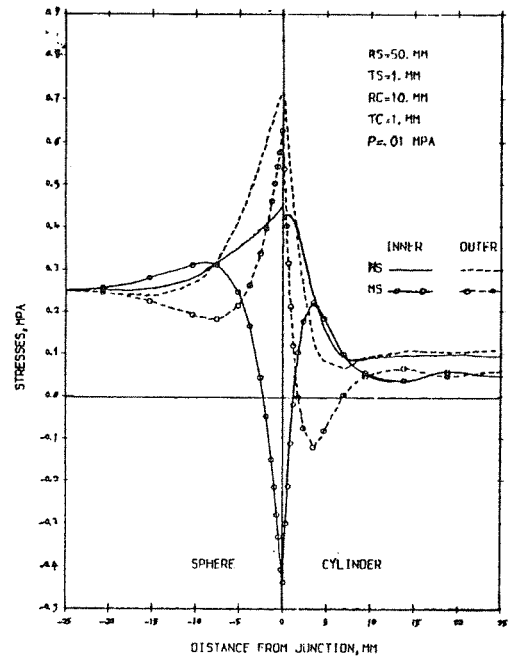
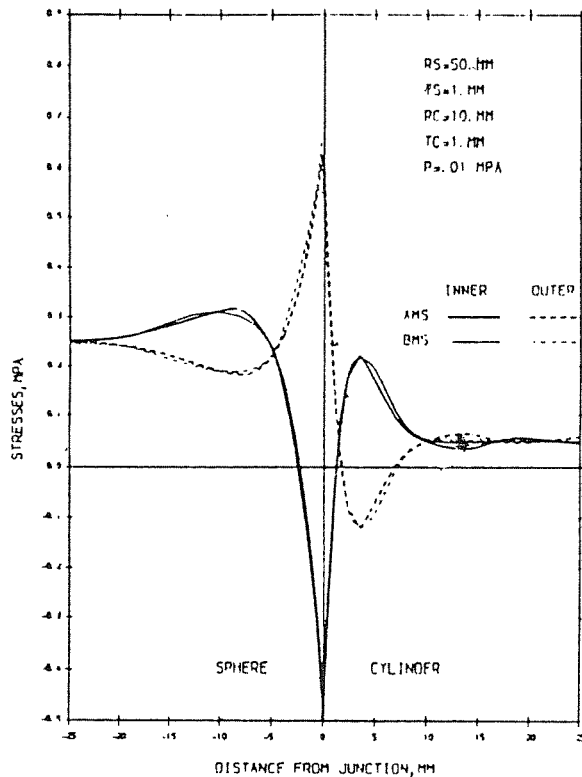
در استوانه	در کره	
۳/۴۸	۳/۲۳	المان توپر با شعاع گوشه
۴/۰۸	۴/۰	المان پوسته نازک بدون شعاع گوشه

در آنالیز سازه کره - استوانه بدون شعاع گوشه و تحت بارهای محوری و ممان خمشی روی انشعاب مدلی با مشخصات $R=50mm$ و $T=0.5mm$ و $r=10mm$

بطور جداگانه بررسی شده‌اند.

برای اطمینان بیشتر از عملکرد روش المان معین و المان نامتقارن پوسته مورد استفاده سه حالت خاص دیگر مورد مطالعه قرار گرفتند. در حالت اول ضرائب تمرکز تنش برای $r/R=1$ و t/T های مختلف به کمک روش مذکور محاسبه شدند. با استفاده از حل معادلات تعادل کره - استوانه نیز ضرائب تمرکز تنش محاسبه و در جدول ۲ درج شدند. در حالت دوم ضرائب تمرکز تنش در یک مجرای دایره‌ای باز در مخزن کروی تحت فشار داخلی محاسبه شدند. این ضرائب تقریباً مستقل از پارامترهای هندسی r/R و R/T بوده و در حدود ۲ ثابت می‌مانند. در حالت سوم ضرائب تمرکز تنش در محل اتصال درپوش دایره‌ای صلب در مخزن کروی تحت فشار داخلی محاسبه و در جدول ۳ درج شدند.

پس از بررسی‌های فوق و حصول اطمینان نسبی از عملکرد روش المان معین و المان نامتقارن پوسته برنامه کامپیوتری مورد نظر، تا جایی که نتایج حاصل از تئوری پوسته‌های نازک مورد علاقه باشد، ضرائب تمرکز تنش برای سازه کره - استوانه تحت فشار داخلی هم برای کره و هم برای استوانه و برای محدوده پارامترهای هندسی $10 < R/T < 625$ و $0.05 < r/R < 0.5$ محاسبه و در جدول ۴ درج شدند. همچنین ضرائب تمرکز تنش بر مبنای تنش اصلی ماکزیمم محاسبه و در



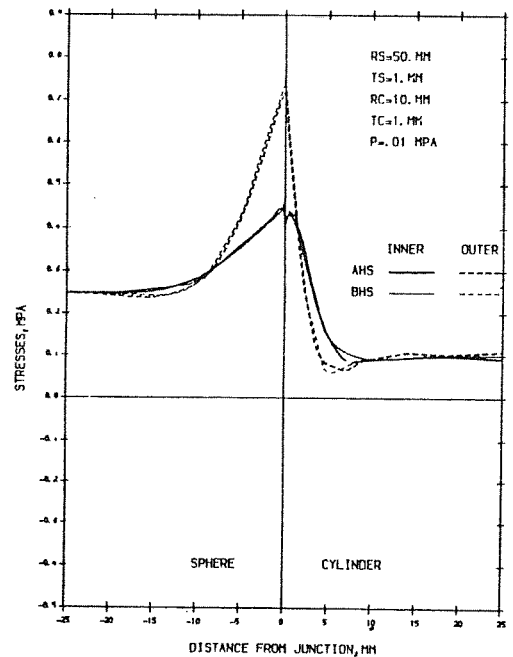
شکل ۲ - توزیع تنش‌ها در کره و استوانه. MS و HS به ترتیب تنش‌های مداری و نصف‌النه‌ای هستند.

شکل ۴ - مقایسه تنش‌های نصف‌النه‌ای حاصل از کاربرد المان عمومی پوسته (AMS) و المان متقارن محوری با روش تفاوت معین (BMS) در مخزن کروی با انشعاب شعاعی.

نتایج زیر بدست آمد که با مقادیر نظیرشان در منابع دیگر قابل مقایسه‌اند: $t=0.25mm$

مأخذ ۱۰	مأخذ ۵	بکمک روش المان	
۱/۵۶	۱/۶۱	۱/۵۹ (۴/۰۴)	بارگذاری محوری
۱/۵۰	۱/۴۲	۱/۴۶ (۴/۲۰)	روی انشعاب بارگذاری خمشی روی انشعاب

اعداد داخل پرانتز برای انشعاب می‌باشند. پارامترهایی که برای محاسبه ضریب تمرکز تنش در این حالت بارگذاری به کار می‌روند عبارتند از: $(P/T)\sqrt{R/T}$ برای بار محوری و $(P/T)\sqrt{R/T}$ برای بار خمشی که در این عبارت $P=F/(2\pi r)$ و $\bar{P}=M/(\pi r^2)$ و F و M به ترتیب نیروی محوری و ممان خمشی می‌باشند.



شکل ۳ - مقایسه تنش‌های مداری حاصل از کاربرد المان عمومی پوسته (AHS) و المان متقارن محوری با روش تفاوت معین (BHS) در مخزن کروی با انشعاب شعاعی.

جدول ۳ - ضوابط تمرکز تنش در محل اتصال دژپوش دایره‌ای صلب در پوسته کروی

r/R	1/20			1/10			1/5			1/2		
R/T	25	50	100	25	50	100	25	50	100	25	50	100
SCF	1.69	1.76	1.84	1.84	1.93	2.0	2.0	2.08	2.13	2.15	2.19	2.21

اطلاعاتی را ارائه داده است که نشان می‌دهد برنامه‌های مختلف حتی برای حل يك مسأله معین ممکن است جوابهای متفاوتی را ارائه نمایند. علیرغم مشکلاتی که در استفاده از روش المان معین وجود دارد این روش می‌تواند اطلاعات مربوط به نقاط مختلف سازه در داخل مدل و یا در نقاطی که امکان نصب وسایل اندازه‌گیری در آنها فراهم نباشد را در اختیار محققین قرار دهد. بررسی حاضر به منظور ارزیابی عملکرد و دقت این روش و برنامه آباکوس در تحلیل سازه کره-استوانه شعاعی بعنوان حالت خاصی از يك سازه نامتقارن صورت گرفته است. دقت جوابهای حاصل از آنالیز يك سازه معمولاً بستگی به فرمول‌بندی المانها، دقت بکار گرفته شده در آنها، و ظرافت شبکه دارد. ثابت شده که استفاده از المان سه‌بعدی توپر برای آنالیز انشعابات در مخازن استوانه‌ای بجای المان پوسته نتایج مطلوبتری در نواحی کاملاً مجاور اتصال بدست می‌دهد. برای

۳- بحث و بررسی

روش المان معین بخاطر بازدهی بالا و سادگی استفاده از آن در کارهای کامپیوتری و نیز بخاطر عمومیت کاربرد آن در بدست آوردن جوابهای عددی به میزان زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت مهمترین پیشرفت در طراحی سازه‌ها توسعه این روش برای آنالیز سازه‌های نامتقارن تحت انواع گوناگون بارگذاری و برای رفتارهای مختلف سازه بوده است. معذالك بدون ارزیابی این روش و برنامه‌های کامپیوتری که از آن استفاده می‌کنند ممکن است خطاهایی غیر قابل تشخیص، خواه در ایجاد مدل و خواه در برنامه کامپیوتری، بروز کنند ولی جوابهای حاصل همچنان صحیح بنظر رسند با توجه به فراوانی و تعدد برنامه‌های کامپیوتری روش المان معین در بازار، تحلیل‌گران باید قبلاً بنحو مطلوبی از توانایی و دقت برنامه مورد استفاده برای آنالیز سازه در دست مطالعه، اطمینان حاصل کنند. مأخذ ۱۳

جدول ۴ - ضوابط تمرکز تنش در محل اتصال مخزن کروی و انشعاب استوانه‌ای. اعداد داخل پرانتز متعلق به انشعاب می‌باشند.

F/R	R/T	$\tau/T=1$	$\tau/T=0.5$	$\tau/T=0.25$	$\tau/T=0.$
1/20	10				2.32
	50			2.54(4.49)	
	100		2.3(4.05)	2.98(5.68)	3.47
	200	2.74(2.45)	2.73(4.81)	3.49(6.58)	4.12
	400	3.36(2.8)	3.32(5.75)	4.22(7.94)	5.01
	625	3.92(3.01)	3.81(6.4)	4.8(8.49)	5.73
1/10	10				2.85
	25			3.0(4.78)	
	50		2.69(4.62)	3.51(6.31)	
	100	3.15(3.16)	3.2(6.06)	4.22(8.57)	5.02
	200	3.82(3.47)	4.01(8.06)	5.18(11.76)	6.20
	400		5.28(8.99)	6.26(13.73)	7.8
1/5	625	8.56(4.36)	6.3(9.71)	7.22(14.84)	9.22
	25		3.2(5.22)	4.22(6.76)	
	50	3.57(3.6)	3.9(7.01)	5.12(9.54)	6.12
	100	4.68(4.72)	4.86(9.54)	6.39(13.57)	
	156.3	5.68(5.72)	5.75(11.68)	7.49(17.18)	8.97
	313.3	7.71(7.67)	7.84(16.33)	9.69(23.94)	11.7
1/2	625	10.45(10.29)	10.74(22.15)	12.54(31.77)	15.57
	10	3.0(3.02)	4.0(5.49)	5.33(6.56)	5.9
	25	4.2(4.24)	5.02(10.14)	6.70(10.14)	7.95
	50	5.64(5.65)	6.34(11.51)	8.44(15.42)	10.3
	100	7.74(7.76)	8.46(16.17)	11.0(22.77)	13.54
	200			14.89(34.12)	18.17
400		16.81(33.09)	20.02(48.68)	24.66	
	625	19.06(18.95)	20.8(41.03)	23.22(60.64)	30.37

مخازن گروهی موضوع در مآخذ ۸ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی اجمالی مطالعه حاضر نیز معلوم شد که اگر اینگونه المانها بکار گرفته شوند برای ضرائب تمرکز تنش مقادیر پائین تری بدست خواهد آمد. تجربه نشان می دهد که حتی اگر با انتخاب المانهای توپر دقت محاسبات را بالا ببریم، در حل مسائل مربوط به انشعابات در مخازن گروهی و استوانه ای تعداد زیادی المان مورد نیاز است که هزینه های زیادی را دربر خواهد داشت. از آنجا که دقت و هزینه باید با هم در نظر گرفته شوند، استفاده از المان پوسته نازک و یا المانهای ترکیبی (هیبرید) که زمان و هزینه کمتری صرف آنالیز آنها می شود شاید بتواند بعنوان یک راه حل در نظر گرفته شود. به کمک تئوریهای ریاضی می توان اثبات کرد که برای بسیاری از فرمولبندها گرایش به نتایج "دقیق" با ظریفتر کردن شبکه المانها افزایش می یابد. بنابراین یکی از راههای مستقیم قضاوت در مورد دقت نتایج بررسی همگرایی شبکه است بدین معنی که هر مسأله را چندین بار با تغییر تراکم المانها در نواحی که تغییرات کمیتها در آنها شدید است حل می کنند. محدودیت این روش برای سازه های بزرگ هزینه زیاد آن است ولی برای سازه مورد مطالعه از این روش برای قضاوت در مورد دقت شبکه استفاده شد که بعضی از نتایج آن در جدول ۱ درج گردیده اند. بطوری که ملاحظه می شود شبکه مورد استفاده با بکارگیری المان نامتقارن پوسته از ظرافت کافی برخوردار است. معذالك در مواردی که ضخامت مخزن و انشعاب خیلی کوچک باشد، نسبت کوچکترین بعد المان به ضخامت آن در محدوده $0.25 < t/T < 6.25$ برای کره و $0.25 < t/T < 25$ برای استوانه خواهد بود. در مواردی که این نسبت بزرگ باشد نمی توان شبکه را به اندازه کافی ظریف دانست ولی حتی در اینگونه موارد نیز ضرائب تمرکز تنش معمولاً کمتر از ۵٪ با مقادیرشان در یک شبکه بسیار ظریف اختلاف دارند. بیشترین اختلاف در سازه های با مشخصات $R/T=625$ و $r/R=0.2$ و $t/T=0.5$ برابر $7/7\%$ محاسبه گردید. در این مدل $t/T=6.25$ است. روش دیگر برای قضاوت در مورد دقت شبکه مقایسه کمیتها در دو المان مجاور است که اگر تفاوت این کمیتها از حد معینی کوچکتر باشد، شبکه المانها "مطلوب" و نتایج "دقیق" ارزیابی می شوند.

مدل های المان معین بکار گرفته شده در این بررسی همگی دارای گوشه تیز در محل اتصال و بدون هیچگونه مواد اضافی تقویت کننده در این محل هستند. کد ASME اینگونه اتصال را برای مجاری با شعاعهای بیش از $0.2\sqrt{R/T}$ توصیه نمی کند. معذالك برای درک عمیق از تمامی جنبه های مسأله انشعاب در مخازن گروهی لازم است اتصال مذکور بطور کامل و با دقت مطالعه شود.

همانطور که از شکل ۲ ملاحظه می شود تنشها در مجاورت اتصال به شدت افزایش یافته و با دور شدن از این محل در

فاصله ای کمتر از $L_D=(2-2.8)\sqrt{R/T}$ به مقادیر غشایی خود نزدیک می شوند. مقادیر واقعی تنشها در محل اتصال، بعلمت عدم توانایی تئوری پوسته های نازک در توجیه رفتار سازه در این محل، ممکن است با آنچه که از طریق المان معین بدست آمده اند متفاوت باشد. هرچند که المانهای توپر مقادیر تنش کمتری بدست خواهند داد. در یک مدل فیزیکی در اثر رفتار پلاستیکی موضعی سازه، تنشها تا حد پیش بینی شده افزایش نخواهند یافت اما بهرحال هنگام طراحی سازه باید به سطح تنشها در محل اتصال و مخصوصاً در انشعاب استوانه ای که گاهی اوقات تا سه برابر مقادیرشان در کره می رسد، توجه شود. در حقیقت رفتار سازه در نواحی کوچکی در اطراف اتصال بیشتر به وسیله کرنشها کنترل می شود تا به وسیله تنشها. در محاسبات الاستیک اعدادی بدست می آید که از لحاظ دیمانسیون تنش هستند ولی متناسب با کرنش می باشند. برای حالت یک بعدی تنش ضریب تناسب همان مدول الاستیسیته است. در شکل های ۳ و ۴ نتایج حاصل از روش المان معین و روش تفاوت معین برای مدل مورد نظر بسیار نزدیک به یکدیگر است و این بخاطر استفاده از تئوری پوسته های نازک الاستیک در هر دو روش است.

انتخاب پارامتر $\sqrt{R/T}$ بعنوان متغیر مستقل در رسم ضرائب تمرکز تنش در شکل ۵ بخاطر پراکندگی این ضرائب بهنگام استفاده از پارامتر بدون بعد $\rho=r/\sqrt{R/T}$ که معمولاً بکار برده می شود بوده است زیرا برای مقادیر $\rho > 1$ این پراکندگی غیر قابل صرف نظر کردن می شود. همچنین در ازاء هر مقدار از R/T (مثلاً ۱۰۰)، و t/T (مثلاً $t/T=1$) ضرائب تمرکز تنش با t/R بتدریج افزایش می یابند ولی بعد از یک مقدار معین (مثلاً ۰.۷ برای مدل مورد اشاره) این ضرائب سرعت کاهش می یابند. تغییر ضرائب تمرکز تنش برحسب $\sqrt{R/T}$ خطی است و لذا با درون یابی خطی می توان ضرائب تمرکز تنش را تعیین نمود و این امر تعداد مدل های مورد نیاز در آنالیز را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می دهد.

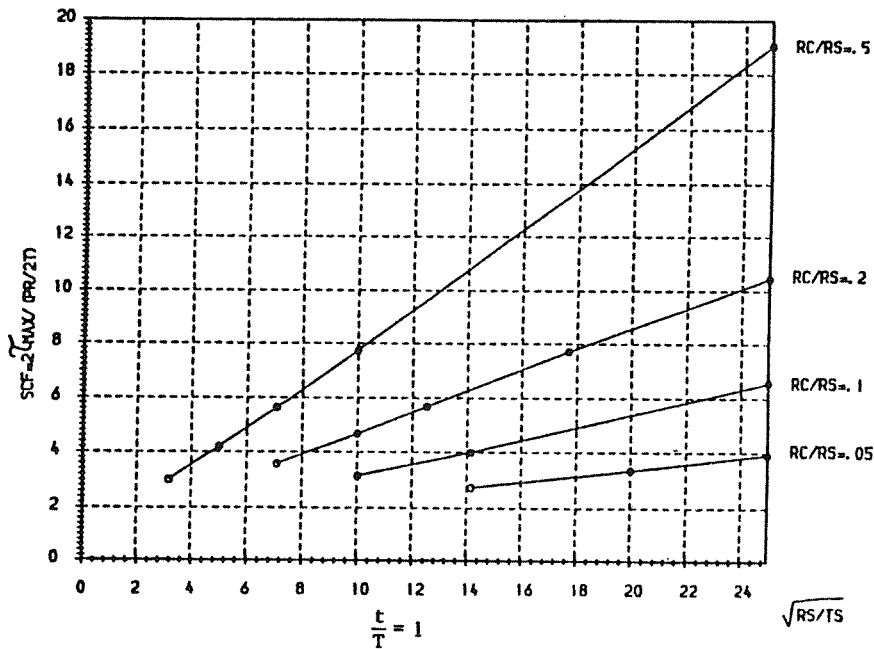
نتایج حاصل برای بارهای متمرکز نشان می دهد که امکان پراکندگی ضرائب تمرکز تنش با پارامتر ρ را نباید از نظر دور داشت. هرچند مقادیر حاصل از کاربرد روش المان معین با آنچه که در مآخذ ۵ ارائه شده نزدیکند ولی همانگونه که قبلاً اشاره شد این امر بخاطر استفاده از تئوری پوسته نازک در هر دو روش است. هرگونه اظهار نظر در این مورد نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

۴- نتیجه گیری

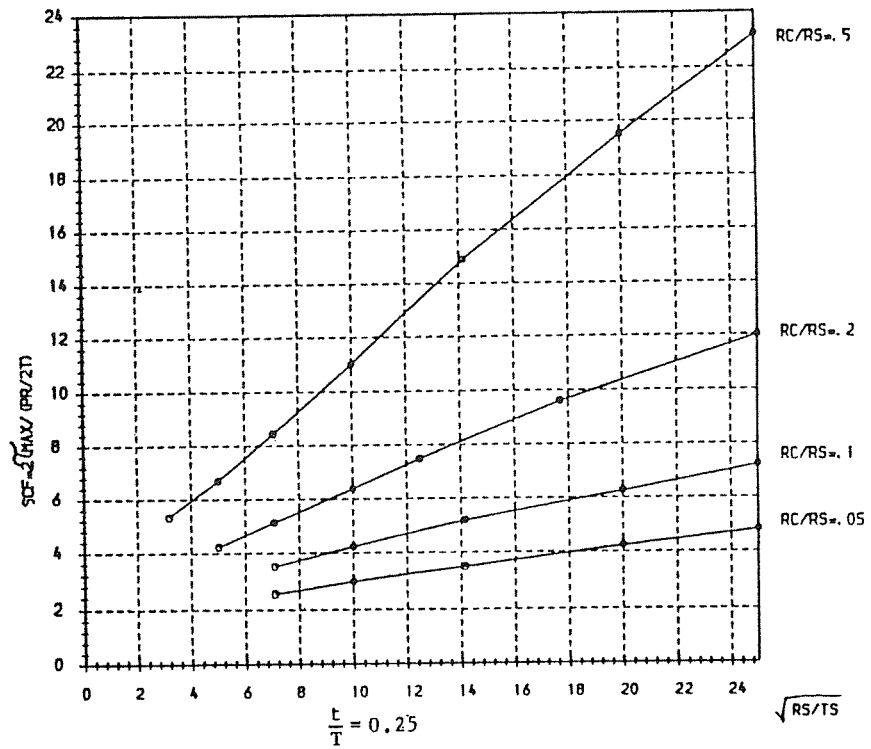
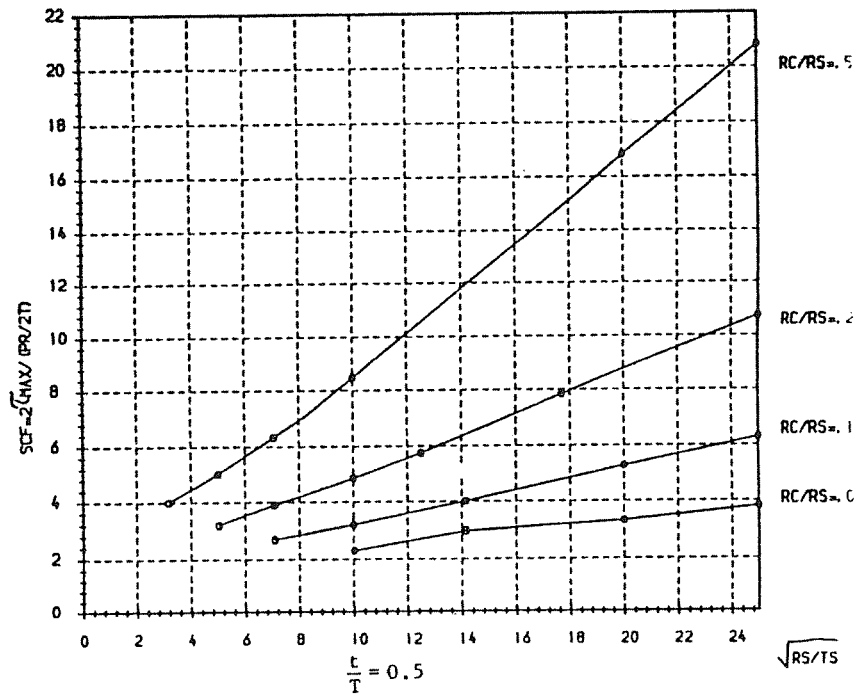
۱- تا جایی که نتایج حاصل از کاربرد تئوری پوسته های نازک مورد نظر باشد می توان از روش المان معین برای تحلیل الاستیک سازه کره- استوانه بعنوان حالت خاصی از یک سازه غیرمتقارن استفاده نمود. المان نامتقارن پوسته برنامه آباکوس تنشها و ضرائب تمرکز تنش را می تواند پیش بینی کند.

جدول ۵ - ضرائب تمرکز تنش بر مبنای تنش اصلی ماکزیمم در محل اتصال مخزن کروی و انشعاب استوانه‌ای. اعداد داخل پرانتز متعلق به انشعاب می‌باشند.

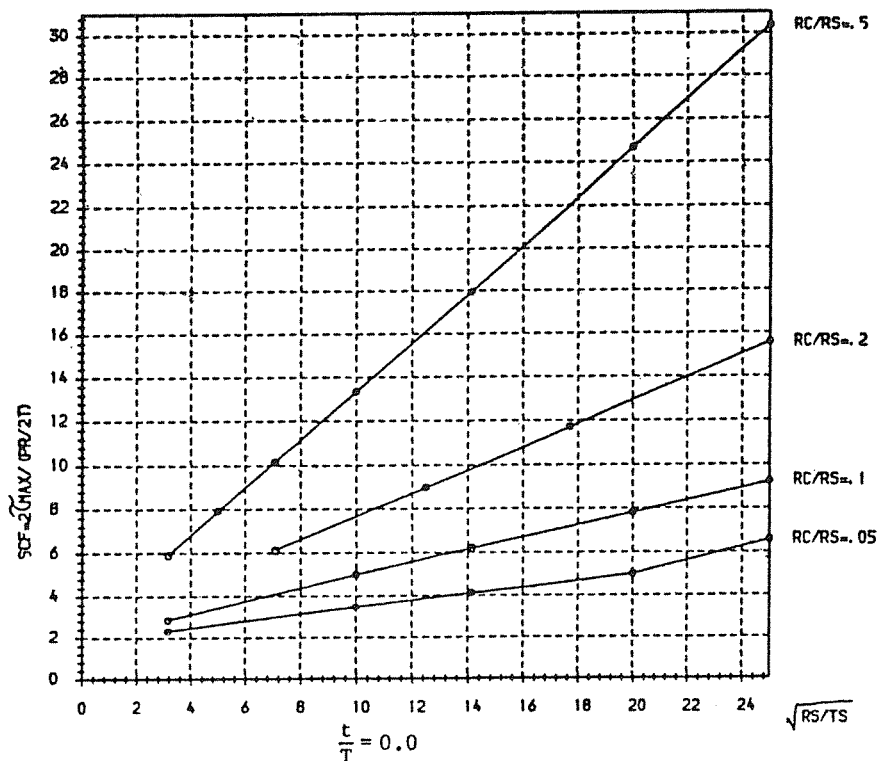
r/R	R/T	t/T=1	t/T=0.5	t/T=0.25	t/T=0.
1/20	10				2.32
	50			2.54(3.61)	
	100		2.29(2.96)	2.95(4.79)	3.47
	200	2.18(2.24)	2.73(3.51)	3.49(5.09)	4.12
	400	2.70(2.62)	3.32(4.32)	4.22(6.05)	4.99
	625	3.92(3.01)	3.81(6.4)	4.8(8.49)	5.73
1/10	10				2.85
	25			2.98(4.16)	
	50		2.69(3.74)	3.51(5.76)	
	100	2.5(2.58)	3.24(5.16)	4.21(7.96)	5.02
	200	2.99(2.92)	4.0(6.98)	5.18(10.80)	6.18
	400		4.76(6.37)	6.26(10.62)	7.7
1/5	25				
	50	2.89(2.94)	3.9(6.41)	5.12(9.23)	6.12
	100	3.67(3.70)	4.86(8.82)	6.39(12.87)	
	156.3	4.38(4.39)	5.75(10.92)	7.50(15.97)	8.97
	313.3	5.79(5.78)	7.49(14.54)	9.69(20.96)	11.58
	625	7.71(7.63)	9.79(18.59)	12.54(26.19)	15.21
1/2	10	2.81(2.8)	4.01(5.37)	5.33(6.56)	5.9
	25	3.65(3.62)	5.01(7.85)	6.68(10.10)	7.95
	50	4.60(4.56)	6.34(11.01)	8.44(14.86)	10.3
	100	6.05(6.01)	8.2(15.16)	11.0(20.85)	13.54
	200			14.89(31.88)	18.17
	400		15.03(30.17)	20.02(42.73)	24.62
625	14.48(13.73)	18.27(36.10)	23.22(50.69)	30.06	



شکل ۵ - نمودار ضرائب تمرکز تنش در مخزن کروی با انشعاب شعاعی برای $\frac{1}{T}$ های مختلف



شکل ۵- اداامه



شکل ۵- ادامه

بعنوان راه حل مناسبی بتواند مورد استفاده قرار گیرد.
۵ - در صورتی که سازه تحت بارهای متمرکز قرار گیرد باید مطالعات بیشتری انجام شود.

تشکر و قدردانی

از وزارت فرهنگ و آموزش عالی بخاطر پشتیبانی مالی و فراهم کردن امکانات انجام تحقیق و از آقایان دکتر ام. رابینسون و پروفیسور آر. کیتچینگ بخاطر راهنماییهایشان و از مرکز کامپیوتر منطقه ای دانشگاه منچستر بخاطر فراهم نمودن امکان اجراء برنامه های کامپیوتری تشکر و قدردانی می نمایم.

۲ - پارامتر ρ برای رسم نمودار ضرائب تمرکز تنش مناسب نیست و به جای آن باید از پارامتر $\sqrt{R/T}$ استفاده شود. در این صورت نمودارها خطی خواهند بود و در صورت لزوم می توان روش درون یابی خطی را برای محاسبه ضرائب تمرکز تنش بکار گرفت.

۳ - در طراحی سازه تحت بررسی باید توجه داشت که بیشترین تنش ها همواره در انشعاب بوجود خواهد آمد.

۴ - برای دسترسی به جوابهای واقعی تر توصیه می شود از المان توپر استفاده شود که در این صورت هزینه های بیشتری را باید صرف نمود. استفاده از المانهای ترکیبی (هیبرید) شاید

علائم و اختصارات:

P	۹ - فشار داخلی	R, RS	۱ - شعاع متوسط کره
F	۱۰ - نیروی محوری روی انشعاب	T, TS	۲ - ضخامت کره
M	۱۱ - بار خمشی روی انشعاب	r, RC	۳ - شعاع متوسط استوانه
σ_1, σ_2	۱۲ - تنش های اصلی	t, TC	۴ - ضخامت استوانه
HS	۱۳ - تنش مداری	r'	۵ - شعاع گوشه روی سطح خارجی سازه
MS	۱۴ - تنش نصف النهاری	l	۶ - طول کوچکترین ضلع المان
τ_{max}	۱۵ - تنش برشی ماکزیمم	L_D	۷ - طول مشخصه
SCF	۱۶ - ضریب تمرکز تنش	ρ	۸ - پارامتر بدون بعد

مراجع :

- 1- Moore, S.E., Greenstreet, W.L., Mershon, J.L., "The Design of Nozzles and Openings in Pressure Vessels" in *Pressure Vessels and Piping: Design Technology - A Decade of Progress*, 1982 - pp. 375 - 388.
- 2- Rodabough, E.L., Mershon, J.L., Far, J.R., "Nozzles, Openings, and Local Loads", in *Pressure Vessels and Piping: Design and Analysis - A Decade of Progress*, 1972, pp. 917 - 924.
- 3- Hodge, P.G., JR., "Plastic Analysis and Pressure Vessel Safety", *Applied Mechanics Review*, 1971, pp. 741 - 747.
- 4- Naderan - Tahan, Khosro, "Stress Analysis of Spherical Shells with One and/or two Neighbouring Nozzles Under Internal Pressure and External Loadings by Finite Element Method A Parametric Survey", Ph.D. Thesis, 1989.
- 5- Leckie, F.A., Penny, R.K., "Stress Concentration Factors for the Stresses at Nozzle Intersections in Pressure Vessels", *WRC Bulletin* 90 September 1963.
- 6- Rodabough, E.C., Atterbury, Cloud, R.L., and Witt, F.J., "Stresses at Nozzles in Spherical Shells Loaded with Pressure, Moment, or Thrust", Phase Report No. 2, July 15, 1966, Published as part of, "Evaluation of Experimental and Theoretical Data on Radial Nozzles in Pressure Vessels", TID - 24342, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, Virginia.
- 7- Leckie, F.A., Payne, D.J., "Some Observations on the Design of Spherical pressure Vessels with Flush Cylindrical Nozzles", *Proc Instn Mech Engrs* 1965 - 66, Vol. 180, pt 1, No. 20, pp. 497-512.
- 8- Gwaltney, R.C., Corum, J.M., "Analytic Investigations of Compact Reinforcement for Radial Nozzles in Spherical Shells", *Journal of Engineering for Industry*, November 1971, pp. 905 - 912.
- 9- Kitching, R., Gill, S.S., Bani - Ahmad, M., Paine, R.T., "Analysis of Pad - Reinforced Spherical Pressure Vessel with Radial Branch", Chapter 2 in "Development in Stress Analysis for Pressurized Components", Editor R.W. Nichols, Applied Science Publishers Ltd. 1977.
- 10- Beckman, Rudy, "Stress Concentration Factors in Spheres with Radial Flush Nozzles", CRIF - MT129, Center de Recherches Scientifique et Techniques del, Industrie des Fabrications Metaliques, Feb. 1977.
- 11- Witt, F.J., Gwaltney, R.C., Maxwell, T.L., Holland, R.W., "A Comparison of Theoretical and Experimental Results from Spherical Shells with a Single Radially Attached Nozzle", *Journal of Engineering for Power*, July 1967, pp. 333 - 340.
- 12- ABAQUS, Hibbitt, Karlson and Sorenson, Inc., 35, South Angel Street, Providence, R.I., 02906, 1984ed.
- 13- Davies, G.A.O., "Results for Selected Benchmarks", in *Benchmark, The National Agency for Finite Element Method and Standards*, National Laboratory, East Kilbride, Glasgow G75 OQU, UK. October 1987, pp. 8-12.
- 14- Bushnell, D., "BOSOR4; Program for Stress, Buckling, and Vibration of Complex Shells of Revolution", Lockheed Missiles & Space Co. Inc. In *Structural Mechanics, Software Series Vol. I*, edited by Nicholas Perrone and Walter Pilkey, University Press of Virginia, Box 3608, University Station, Press of University Station, Charlottesville, Virginia.