



## تحلیل و شبیه سازی رشد ترک و بررسی تنش ها در مخازن کروی جدار نازک با استفاده از نرم افزار آباکوس و مقایسه با نتایج تئوری

عقیل شاولی پور<sup>۱</sup>، علیرضا طاوسی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر ، a.shavalipour@velayat.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر ، a.tavousi@velayat.ac.ir

### چکیده

امروزه مخزن کروی یک مخزن تحت فشار با بیشترین کارایی و بازدهی است، زیرا بیشترین حجم برای کمترین سطح را ارائه می دهد و ضخامت این مخازن نصف ضخامت مخزن های استوانه ای با قطر یکسان می باشد. این مخازن در حوزه های نفت و پتروشیمی و اغلب در صنایع مادر همانند نیروگاه ها از کاربرد ویژه ای برخوردار است. از این رو توجه به طراحی، ساخت و تحلیل آن ها دارای اهمیت فوق العاده ای است. در این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود مقدار ضریب شدت تنش برای مخازن کروی ترکدار که در آنها ترک در تمام عمق دیوار نفوذ کرده به دست آمده است. سپس نتایج بدست آمده از محاسبات تئوری با شبیه سازی به کمک نرم افزار آباکوس مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده نزدیکی محاسبات دستی و نتایج بدست آمده از شبیه سازی کامپیوتری بود.

### واژه های کلیدی

مخازن کروی- روش اجزای محدود- رشد ترک- XFEM

### مقدمه

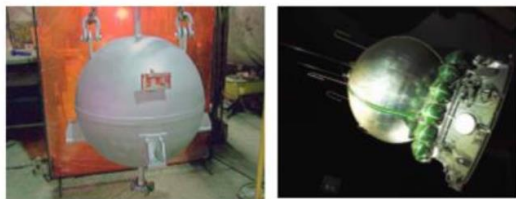
مخازن تحت فشار یکی از اجزای مهم در و تاسیسات مهندسی بوده کاربرد های متنوعی دارند. در طول عمر یک مخزن ممکن است به دلایلی چون خوردگی، برخورد جسم خارجی، بارگذاری خستگی و ... عیوب و ترک های مختلفی در آن به وجود آید. در صورتی که این ترک ها به موقع شناسایی نشوند و عملیات پیشگیرانه ای لازم انجام نگیرد گاه میتواند منجر به بروز شکست های ناگهانی و خسارات جانی و مالی فراوان شوند. یکی از این روش هایی که برای ایمنی مخازن ترک دار استفاده میشود روش نشتی پیش از شکست میباشد. در این روش سعی میگردد که ترک موجود در دیواره ی مخزن شناسایی شده و با انجام محاسبات مهندسی روی آن مشخص گردد. که ایا قبل از شکست ناگهانی نشت روی خواهد داد یا خیر. بروز نشتی

در ترک میتواند به عنوان یک عامل هشدار دهنده عمل نماید و قبل از شکست با روش های پیش گیری از بروز خسارت جلوگیری شود. یکی از پارامتر های بنیادی که در روش LBB و کلا در مکانیک شکست کاربرد زیادی دارد ضریب شدت تنش است. به کمک این ضریب توزیع تنش در نزدیکی نوک ترک به دست آمده شرایط لازم جهت رشد ترک مشخص میشود. تعیین ضریب شدت تنش برای هر حالت خاص بار گذاری و هر هندسه ی خاص لازم و ضروری است.

از اولین کار های صورت گرفته در خصوص پوسته های کروی ترک دار میتوان به تحقیقات فولیاس [۱] اشاره کرد. فولیاس در سال ۱۹۷۳ با استفاده از تیوری انرژی گریفتمقدار طول بحرانی ترک را برای یک پوسته کروی بر حسب طول ترک بحرانی در یک صفحه تخت بدست آورد. فولیاس [۲] با انتشار مقاله در سال ۱۹۷۰ کارهای صورت گرفته در زمینه محاسبه مقدار ضریب شدت تنش در یک پوسته کروی را شرح داده است. اردوگان و کیبلر [۳] در ادامه کارهای صورت گرفته در زمینه ی محاسبه مقدار ضریب شدت تنش به مطالعه پوسته های کروی و استوانه ای در طول ترک های بزرگ پرداخته اند. هو و وانگ [۴] هم با استفاده از روش line spring مقدار جابجایی و توزیع تنش در اطراف یک ترک در پوسته کروی توخالی را بدست آورده و مقدار ضریب شدت تنش را محاسبه کرده اند و سپس مقدار ضریب شدت تنش در یک صفحه تخت که توصف ضریب تصحیح هندسی به ضریب شدت تنش یک ترک در پوسته کروی تبدیل شده است مقایسه نموده اند. نینگ و سان [۵] به بررسی شکست الاستیک پلاستیک ترک در پوسته های کروی پرداخته اند این دو محقق از روش line spring غیر خطی بر پایه معادلات پوسته های غیر کلاسیک بهره برده و ترکی از نوع راه به در در نظر گرفته اند. چاو و چن [۶] بررسی ضریب شدت تنش در پوسته های کروی که دارای ترک داخلی و خارجی هستند پرداخته و با استفاده از روش عددی المان محدود و روش ضرایب وزنی مقادیری جهت ضرایب شدت تنش این نوع از ترک ها در پوسته های کروی پیشنهاد کرده اند. بار گذاری مورد استفاده در این تحقیقات همگی از نوع فشار داخلی است. در روش دیگر براین [۷] با استفاده از تنش های محیطی متفاوت اطراف نوک ترک مقادیر ضریب شدت تنش را



و ساخته می شود. پارامتر تاثیرات جوی به صورت بار اضافی در شرایط مختلف محاسبه می شود.



شکل ۱: نمونه ای از کاربرد مخازن تحت فشار صنعت های مختلف

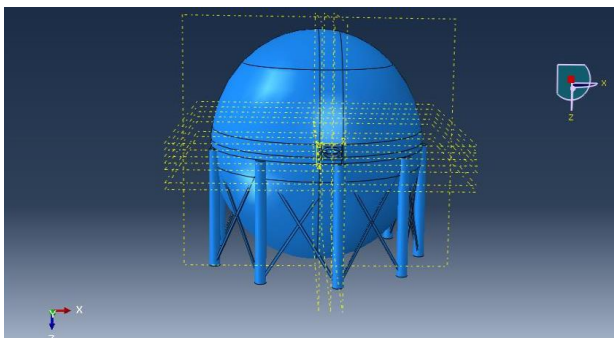
### معادلات مسئله و حل دستی

در این مخزن کروی طراحی شده به قطر ۵۳ متر از جنس الیاژ فولاد تحت فشار 7Mpa با ضخامت ۱۳ میلی متر است. در مرحله اول می خواهیم بدانیم که آیا مخزن از استحکام کافی برخوردار است. می دانیم که در مخزن های کروی بیشترین تنش در جداره از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\sigma = \frac{PD}{4t} = \frac{7 \times 10000}{4 \times 50} = 350 \quad (1)$$

استحکام تسلیم: ۳۸۵ < تنش در جداره مخزن ۳۵۰

در این پژوهش یک مخزن تحت فشار کروی با قطر ۹۵ متر به همراه ۹ پایه با ضخامت ۶۰ میلی متر در نظر گرفته میشود. در تحلیل مخزن تحت فشار ماده از جنس فولاد دارای خاصیت الاستیک یا مدول الاستیک ۱۸۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۵ می باشد. محل اتصال پایه ها به مخزن به صورت قید لحاظ می گردد. محل اتصال پایه ها با زمین در هیچ راستایی ازادی ندارد.



شکل ۲: هندسه مخزن

محاسبه کرده است. کار های اولیه صورت گرفته برای محاسبه ضریب شدت تنش در مخازن استوانه ای و کروی بیشتر بر اساس تئوری پوسته های جدار نازک بنا شده است. مقادیر ضریب شدت تنش برای گستره وسیع تر هندسی و بارگذاری با استفاده از روش های اجزاع محدود محاسبه گردیده اند که شامل کار های گرین و نولز [۸] فرانس و همکارانش [۹] زانگ [۱۰] و اندرسون [۱۱] میشود استاندارد های مختلفی مانند API579, R(6) و 7910BS از راه حل های تحلیلی و اجزای محدود موجود برای محاسبه ی ضریب شدت تنش در ترک ها راه به در موجود در استوانه ها و کره ها استفاده کرده اند. اسمیت [12] تاکاهاشی [13] و میورا [14] راه حل های موجود برای محاسبه ضریب شدت تنش را مقایسه کرده و مشخص نموده اند که تفاوت هایی بین مقادیر بدست آمده از روش های منتشر شده برای محاسبه ضریب شدت تنش وجود دارد. به طور کلی از سه طریق می توان ضریب شدت تنش را محاسبه کرده این سه روش عبارتند از ۱- روش تحلیلی 2- روش عددی ۳- روش آزمایشگاهی.

در این پژوهش با استفاده از روش اجزاع محدود مقدار ضریب شدت تنش برای مخازن کروی ترکدار که در آنها ترک در تمام عمق دیوار نفوذ کرده به دست آمده است. شبیه سازی به کمک نرم افزار اباکوس صورت گرفته.

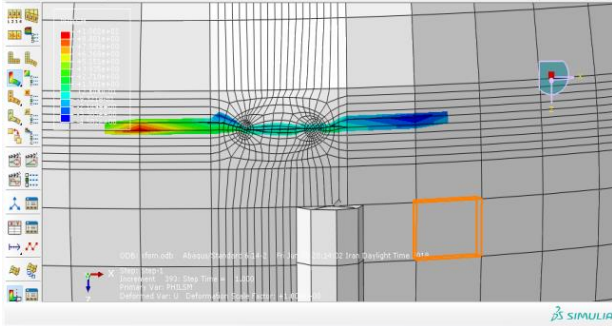
### تعریف مسئله و بیان فرضیات

تحقیق پیش رو به بررسی رفتار ترک، در یک نوع مخزن کروی تحت فشار پرداخته است. شکل اکثر مخازن تحت فشار استوانه ای یا کروی بوده که فرم استوانه ای آن با کلهگی کروی یا بیضوی یا کاسه ای قابل ساخت و مونتاژ می باشد. و کلهگی های کروی به دو حالت نورد گرم و سرد تولید می شوند.

طراحی و ساخت مخازن تحت فشار بر اساس پارامتر های مختلف فنی از قبیل فشار، درجه حرارت، نوع فولاد باران و زلزله، عمر مفید مقاومت، برف، مصرفی حجم مورد مصرف، امکانات کارگاهی، تاثیر عوامل جوی از قبیل باد مصالح و مواد مصرفی در مقابل خوردگی الکتروشیمیایی و مکانیکی طراحی می شود. فشار مخزن با توجه به استاندارد ASME CODE با ضخامت، تنش مجاز مواد مصرفی، امکانات جوشکاری ارتباط دارد. درجه حرارت که عاملی در طراحی و ساخت بوده یکدیگر از عوامل مهم در طراحی می باشند. مواد مصرفی در مخازن تحت فشار و ذخیره ای معمولاً Carbon steel از انواع مختلف بوده که انتخاب هر کدام از این فولاد ها با توجه به تنش مجاز درجه حرارت کاری و فرم پذیری فولاد و جوشکاری آن و ... انجام می گیرد. عامل حجم مخزن با در نظر گرفتن موقعیت محل نصب و با تغییراندازه و قطر و ارتفاع بر اساس استاندارد مربوطه و با حفظ تناسب اجزاء، مطابق با نیاز طراحی



Visualization رفته نوار Selection در روی حالت PHILSM قرار داده هیچ تحلیلی مسیر رشد ترک را بررسی کرده.



شکل ۵: مسیر رشد ترک

### نتایج دستی:

در این قسمت می خواهیم نتایجی برای  $K_1, K_2$  و  $\sigma$  به صورت محاسباتی حساب کرده در ابتدا از فرمول هایی که قبلا بیان گردید برای محاسبات خود استفاده می کنیم:

$$\sigma = \frac{pr}{2t} = 35 \quad (2)$$

از انجایی که  $\sigma_\theta$  و  $\sigma_z$  با هم برابر هستند و نتیجه تقسیم آنها برابر ۱ می شود باید  $k$  را برابر ۱ گذاشت. و همچنین با جایگزینی مقادیر  $\sigma_\theta$  و  $\sigma_z$  به جای  $\sigma$  داریم:

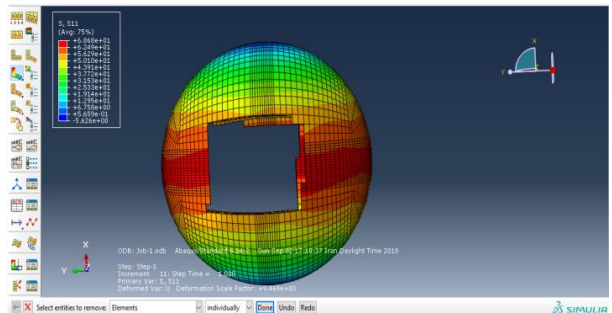
$$K_I = \frac{1}{2} [k+1 + (k-1) \cos 2\beta] \sigma \sqrt{\pi a} = 196.17 \quad (3)$$

$$K_{II} = -\frac{k-1}{2} \sin 2\beta \sigma \sqrt{\pi a} = 0 \quad (4)$$

$K_{II}$  و  $K_I = 196.17$  برابر با صفر می شود.

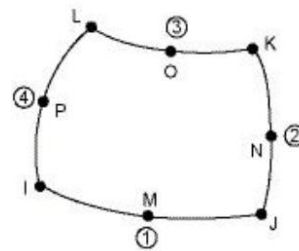
### نتایج نرم افزار برای $\sigma$

برای مشاهده مقادیر  $\sigma$  نوار ابزار را روی حالت Primary, S, S11 و S33 گذاشته و با حذف ناحیه اطراف ترک مقدار تنش را می توان مشاهده کرد و همان طور که مشاهده می شود مقدار تنش  $3.77e1$  می گردد:



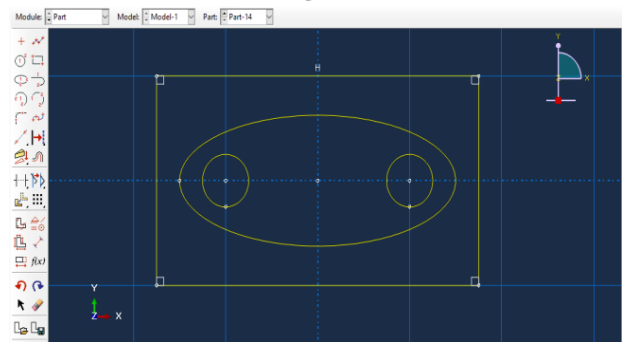
شکل ۶: تنش S11

با توجه به این نکته که مخزن دارای شکلی متقارن است برای افزایش سرعت در انجام محاسبات المان را دو بعدی و رفتار آن را متقارن انتخاب می کنیم. برای این تحلیل می توانیم از المان دو بعدی چهار گوشه ای با ۴ گره یا ۸ گره و یا همچنین المان مثلثی استفاده کنیم. المان دو بعدی نیز در صورتی که Element behavior را Axisymmetric انتخاب کنیم برای این تحلیل مناسب است. این المان دارای دو درجه آزادی در هر گره در راستای X و Y می باشد. از این المان صفحه ای می توان به عنوان تنش صفحه ای، کرنش صفحه ای و یا یک المان متقارن استفاده کرد.



شکل ۳: هندسه ی المان solid183

همچنین برای ایجاد ترک در ناحیه مورد نظر، با ساختن چند پارت مکعبی حول ترک در ماژول part گزینه Create part را انتخاب کرده با انتخاب گزینه های 3D و تایپ از نوع Deformable و همچنین Base Feature از نوع shell, Extrusion انتخاب کرده و همچنین Approximate size آن را ۲۰۰ انتخاب کرده. این پارت فقط جهت ایجاد پارتیشن حول ترک بوده برای افزایش دقت و رشد ترک و محاسبات  $\sigma$  حول ترک به وجود می آید.



شکل ۴: ترسیم پارت برای ایجاد پارتیشن اطراف ترک

### نتایج و تحلیل نرم افزاری

در ابتدا بدون مسیر رشد ترک در راستای لبه های ترک بوده در صورت ایجاد ترک توصیه می شود با ایجاد حفره هایی در مسیر ترک از رشد آن جلوگیری کرده. در ماژول Job بعد از باز کردن پنجره Job manager و انتخاب گزینه Results به ماژول



International journal of pressure vessel and piping, 77, pp130-154

[8] D.Green and J.Knowles, (5994), "The treatment of residual stress in fracture assessment of vessels", Journal of pressure vessels and technology, 556, pp041-017.

[9] C.France and T.Chivers, (5994), "New stress intensity factors and crack opening area solutions for through-wall cracks in pipes and cylinders", ASME PVP conference fatigue and fracture, 513, pp013016.

[10] W.Zang, (5997), "Stress intensity factor solutions for axial and circumferential through-wall cracks in cylinders", SAQ Report SINTAP/SAQ/32.

[11] T.L. Anderson, (2330), "Stress intensity and crack growth opening area solutions for through-wall cracks in cylinders and spheres", WRC Bulletin 478.

[12] M.Smith, "SIF solutions for through-wall defects in cylinders", BE report,34/34/38.

[13] Y.Takahashi, (2332), "Evaluation of leak-before-break assessment methodology for pipe with a circumferential through-wall crack", Journal of pressure vassels and technology, 79, pp081-430.

[14] N.Miura and k.Inoue, (2331), "Comparison of stress intensity factor solutions for cylinders with axial and circumferential cracks", SMIRT58,Beijing

### مقایسه نتایج دستی با داده های نرم افزار

بعد از محاسبه  $\sigma_\theta$  و  $\sigma_z$  برای مخزن کروی و مقایسه آن با نتایج بدست آمده نرم افزار متوجه می شویم که نتایج اختلاف زیادی با هم ندارند و همچنین بعد از محاسبه  $K_1$  و  $K_2$  و مقایسه آن با نتایج بدست آمده از نرم افزار متوجه می شویم که این نتایج نیز تفاوت چندانی ندارد. نتایج بدست آمده برای  $\sigma$  و  $K$  و مقایسه آنها در جداول پایین آمده است:

جدول ۱: مقایسه تنش های بدست آمده از حل اجزاء محدود و تئوری

Stress(Mpa)	Theory	FEM
$\sigma_z$	۲۵	۲۷.۷۲
$\sigma_\theta$	۲۵	۲۷.۷۲

جدول ۲: مقایسه ضرایب شدت تنش بدست آمده از حل اجزاء محدود و تئوری

SIF(Mpa)	Theory	FEM
$K_I$	۱۹۶.۱۷	۲۳۶.۶۸
$K_{II}$	.	۵.۳۶

### منابع

- [1] E.S. Folias., (5973), "On the theory of fracture of curved sheets", Engineering fracture mechanics", 25, pp15-61.
- [2] E.S. Folias, (5961), "A finite line crack in a pressurized spherical shell",International journal of fracture, 5, pp23-02.
- [3] F.Erdogan and J.J.Kibler, (5969), "Cylindrical and spherical shell with cracks,International journal of fracture mechanics", 1, pp229-245.
- [4] B.Wang and N.Hu, (2333), Study of Spherical shell with a surface crack by line spring model,Engineering structures, 22, pp533-520.
- [5] X.Sun and J.Ning, (5987), "Fracture mechanics analysis of spherical shell with surface crack", Theoretical and applied fracture mechanics, 7, pp589-234.
- [6] Y.J.Chao and h.Chen, (5989), "Stress intensity factors for complete internal and external cracks in spherical shells", Internatinal Journal of pressure vessel and piping, 43, pp051-003.
- [7] R.Brighenti, (2333), "Surface Cracks in shells under different hoop strees distribution",

