

### مدلسازی رشد ترک در استوانهٔ جدار نازک آلومینیومی تحت بارگذاری دتونیشن گازی با استفاده از المان چسبنده

محمد ملكان'، مجيد ميرزائى ً\*

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ۲- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران \* تهران، صندوق پستی۱۴۳– ۱۴۱۱۵، mmirzaei@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله به مدلسازی رشد ترک در یک استوانه جدار نازک تحت بارگذاری دتونیشن گازی پرداخته شده است. با توجه به مشکلات ناشی از اعمال بار متحرک و غیرخطی بودن مسأله، از روش المان محدود در این تحقیق استفاده شده است. ارتعاشات ناشی از بار متحرک با حل تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه و ارزیابی شده و از المان چسبنده با معیار خرابی کشش-جدایش جهت مدلسازی رشد ترک استفاده شده است. نتایج بدست آمده با نتایج قبلی که بر پایهٔ معیار رشد زاویه بحرانی نوک ترک انجام گرفته مقایسه شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. کلیدواژگان: بار متحرک، روش المان محدود، مخازن تحت فشار.

# Crack growth modeling for a thin aluminum tube under gaseous detonation loading using cohesive element

#### M. Malekan<sup>1</sup>, M. Mirzaei<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. Student of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University., Tehran, Iran
2- Assoc. Prof. of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
\* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran. mmirzaei@modares.ac.ir

**Abstract-** This paper reports the finite element modeling of axial crack growth in a thin aluminum tube under gaseous detonation loading. The finite element method was used to handle the moving load and also the nonlinear characteristics of the problem. The simulation results were compared with the experimental results reported in the literature and also with the results obtained from an analytical model. Moreover, the cohesive element with traction-separation law was used for the crack growth modeling. The final part of the paper is devoted to comparisons between the numerical crack growth simulations obtained from the current work and the numerical results based on the CTOA criteria that were previously reported in the literature. The very good agreement between the two methods was indicative of the robustness of the implemented procedures.

Keywords: Moving load, Finite Element Method, Pressure Vessels.

#### محمد ملکان و همکار

#### ۱– مقدمه

بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه مکانیک شکست استوانه جدار نازک تحت فشار داخلی، با بارگذاریهای شبه استاتیک و یا خستگی مرتبط می باشند [۲،۱]. شکست استوانه جدار نازک تحت دتونیشن به دو دلیل عمده از شکست لوله تحت بارگذاری شبه استاتیک متمایز می باشد. اول، امواج خمشی ناشی از عبور بارها می تواند باعث کرنش نوسانی شده که دامنه آنها وابسته به سرعت عبور بار بوده و می تواند چندین برابر بزرگتر از مقدار پیش بینی شده توسط فرمولاسیون استاتیکی باشد. دوم، پارامترهای شکست دینامیکی می تواند کاملاً متفاوت از شکل استاتیک معادل باشند. مطالعات مختلفی در حوزه پاسخ سازهای پوسته ها به بارگذاری شوک و دتونیشن انجام گرفته است [۳–۹]. هرچند این مطالعات ترک را درنظر نگرفته و شکست را بررسی نکرده اند. در سال ۲۰۰۴ مطالعه آزمایشگاهی جامعی بر روی شکست استوانه جدار نازک تحت دتونیشن گازی توسط چااو و شپرد<sup>۱</sup> انجام گرفت [۲۰۱].

شبیهسازی اثر متقابل سازه-سیال در شکست استوانه جدار نازک تحت بار شوک و دتونیشن توسط سیراک<sup>۲</sup> همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۰] انجام گرفت. آنها شبیهسازی برهمکنش سازه-سیال در ابعاد بزرگ و تغییر شکل ویسکوپلاستیک شکست آزمایشگاهی استوانه چااو و شپرد [۱۱] انجام دادند و از چقرمگی شکست (K<sub>IC</sub>) استاتیک در حالت کرنش صفحهای برای بدست آوردن خواص المانهای چسبنده استفاده کردند. در نهایت نتایج آنها با دادههای چااو و شپرد در خصوص اندازه رشد ترک و سرعت تطابق نداشت. همچنین سرعت رشد ترک

میرزائی و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۱۳] حل تحلیلی استوانه جدار نازک الاستیک به بارگذاری دتونیشن داخلی و در ادامه، میرزائی و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۴] حل تحلیل و عددی استوانه جدار نازک الاستودینامیک به بارگذاری دتونیشن داخلی را ارائه دادند. میرزائی و کریمی در سال ۲۰۰۶ [۱۵] به منظور بررسی رشد ترک در استوانه تحت بارگذاری دتونیشن از معیار بازشدگی نوک ترک<sup>۳</sup> (CTOA) استفاده کردند. با این

روش میزان رشد ترک را در حالتی که ترک در یک صفحه از پیش مشخص شده رشد میکند، محاسبه نمودند و نتایج را با نتایج چااو و شپرد [۱۱] مقایسه کردند. آنالیز شکست یک کپسول گازی منفجر شده توسط میرزائی در سال ۲۰۰۸ [۱۶] و شبیهسازی المان محدود این کپسول منفجر شده توسط میرزائی و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۷] از جمله دیگر مطالعات صورت گرفته در این زمینه میباشند که در مقاله خود به مورت گرفته در این زمینه میباشند که در مقاله خود به بررسی علت شکست و واماندگی یک سیلندر دارای گاز هیدروژن پرداختهاند. نتیجه این تحقیق نشان میدهد در سازهای کنترل شده و به صورت تناوبی میباشد.

هدف این مقاله مدلسازی عددی شکست تحت دتونیشن یک استوانه جدار نازک و مقایسه آن با نتایج بدست آمده از میرزائی و کریمی در سال ۲۰۰۶ [۱۵] میباشد.

#### ۲- مطالعات آزمایشگاهی و معادلات بارگذاری دتونیشن گازی

موج دتونیشن یک موج ماورای صوت ناشی از احتراق مواد سوختنی است که شامل یک موج شاک در جلوی جبهه موج و یک منطقه واکنش در پشت جبهه میباشد که به شدت با یکدیگر کوپل شدهاند. امواج دتونیشن دارای سرعت و فشار مشخصی به نام چاپمن-ژوکت میباشند که این دو پارامتر بستگی به درصدهای مخلوط سوخت-هوا دارد. پروفیل فشار در یک نقطه از استوانه در طول زمان مطابق شکل ۱ میباشد.



<sup>1.</sup> Chao & Shepherd

<sup>2.</sup> Cirak

<sup>3.</sup> Crack Tip Opening Displacement

همانگونه که ملاحظه می شود، در حالت واقعی به دلیل ارتعاشات سازه که به نوبه خود به سنسور اندازه گیری منتقل می-شود، در پروفیل فشار اندازه گیری شده، ارتعاشاتی دیده می شود. به منظور پیش گیری از پیچیده شدن تحلیل، از یک مدل ایده آل برای پروفیل فشار (بدون در نظر گرفتن ارتعاشات) استفاده می شود. پروفیل فشار ناشی از موج دتونیشن در یک لحظه از زمان در طول استوانه در شکل ۲ نشان داده شده است.

هنگامی که موج دتونیشن در استوانه حرکت میکند، سه منطقه با فشارهای متفاوت در استوانه ایجاد میشود:

۱- منطقه شامل سوخت و هوا در جلوی جبهه موج که دارای فشار اولیه P<sub>1</sub> است.

۲- ناحیه جبهه موج که دارای بیشترین فشار  $P_2$  می باشد. ۳- منطقه پشت جبهه موج که دارای فشار  $P_3$  است.

با توجه به اینکه مخلوطهای استفاده شده در این تحقیق به گونهای میباشند که جبهه موج حالتی تقریباً متقارن دارد، در شبیه سازی جبهه موج نیز این تقارن در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱ می توان پروفیل فشار را در داخل لوله بر حسب پارامترهای زمان و مکان به صورت روابط (۱) و (۲) نوشت [۹]:

$$P(t) = (P_1 - P_{atm}) + \left[ (P_2 - P_1) + (P_2 - P_3)e^{-\frac{t}{T}} \right]$$
$$\times \left[ 1 - H(x - V_{cj} t) \right] \qquad 0 < x < L \qquad (1)$$

$$P(x) = (P_1 - P_{alm}) + \left[ (P_2 - P_1) + (P_2 - P_3)e^{-\frac{x - L}{V_{cj} \times T}} \right] \times \left[ 1 - H(x - L) \right] \quad 0 < x < L \tag{7}$$



شکل ۲ پروفیل فشار در یک لحظه از زمان در طول استوانه [۹]

در روابط (۱) و (۲)  $P_1$  فشار اولیه،  $P_2$  فشار ماکزیمم،  $P_3$  فشار نهایی، t و x پارامترهای زمان و مکان، T ضریب کاهش نمایی،  $V_{cj}$  سرعت پیشانی موج (سرعت چاپمن-ژوکت)، تابع H معرف تابع پله واحد و L نیز طول استوانه میباشند.

## ۳- شبیه سازی بارگذاری د تونیشن گازی در استوانه جدار نازک

در این بخش پاسخ سازهای یک استوانه جدار نازک بدون ترک به بارگذاری دتونیشن گازی ارائه شده است. بهمنظور شبیهسازی بارگذاری آزمایش تجربی صورت گرفته در مرجع [۱] مدنظر قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده میشود، سیستم آزمایش از سه استوانه تشکیل شده است که استوانه اصلی مورد بررسی، استوانه دوم میباشد. جنس تمامی لولهها -AL 6061 بوده که مشخصات مادی و هندسی استوانه اصلی مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

سابروتین تحت فرترن VDLOAD نرمافزار آباکوس<sup>۱</sup> برای شبیه سازی بارگذاری دتونیشن بازنویسی شده و برای بازه زمانی ۴/۷ms شبیه سازی اجرا شده است. پارامترهای مورد استفاده در کد بارگذاری بر اساس جدول ۲ می باشند.

جدار نازک [۱]	ل استوانه	مادي و هندسي	مشخصات	جدول ۱
---------------	-----------	--------------	--------	--------

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E(N/m^2)$	v	$\sigma_{Ult}(MPa)$	$\sigma_{Yld}$ (MPa)	
۲۷۸۰	۶۹ × ۱۰ ۹	۰/۳۳	۳۱۰	778	
<i>h</i> (mm)	(ضخامت)	<i>L</i> (m)	$R_{in}(\mathbf{m})$	$R_{out}(\mathbf{m})$	
• /	178	۰ <i>/۶</i> ۱۰	۰/۰۱۹۷۵	•/•7•94	

	<b>جدول ۲</b> مشخصات بارگذاری [۱]					
$P_{I}$ (MPa)	$P_2$ (MPa)	$P_3$ (MPa)	<i>T</i> (ms)	$V_{cj}$ (m/s)		
•	۲/۶	۰/۵	۰/۱۵	•/۲۳۶۵		

برای ساخت مدل استوانه از تقارن طولی استفاده شده و نیمی از آن مدل شده است. تعداد المانها در راستای طولی ۳۵۰، در راستای ضخامت ۳ و در راستای محیطی ۳۰ درنظر گرفته شد.

DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.3.2

<sup>1.</sup> ABAQUS



شکل ۳ سیستم آزمایش مربوط به استوانه جدار نازک [۱]

به این ترتیب در مدل المان محدود جمعاً ۳۱۵۰۰ المان و ۴۳۵۲۴ گره بکار رفت. المانهای مورد استفاده نیز المانهای مکعبی ۸ گرهای میباشد و گرهای که تاریخچه کرنش در آن محاسبه شده در فاصله ۰/۲۸۲۲۳ از ورودی سمت چپ لوله قرار دارد.

برای شرایط مرزی، تکیهگاههای دوسر استوانه به عنوان تکیهگاههای ساده درنظر گرفته شده و صفحه تقارن نیز به علت مدل کردن نصف استوانه در راستای عمود بر محور تقارن مقید شده است (شکل ۴).

کرنش محیطی در فاصله ۰/۲۸۲۲۳ از ورودی سمت چپ استوانه به همراه نتایج تجربی و تحلیلی در شکل ۵ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود نتایج از تطابق بسیار خوبی برخوردارند. تنها تفاوت قابل ذکر در بین نتایج فوق، صفر بودن کرنش متوسط در حل تحلیلی می باشد که این امر به دلیل صفر بودن مقدار فشار نهایی در حل مذکور می باشد.



شکل ۴ شرایط مرزی مدنظر برای استوانه جدار نازک

#### ۴- مدلسازی رشد ترک

در این بخش به آنالیز یک استوانه جدار نازک دارای ترک اولیه تحت بارگذاری دتونیشن گازی پرداخته میشود. در ابتدا توضیح مختصری در مورد المان چسبنده که در مدلسازی رشد ترک از آن استفاده شده توضیح داده خواهد شد، سپس در خصوص مدلسازی ترک در استوانه توضیح داده می شود.

#### ۴-۱- مدلسازی رشد ترک با استفاده از المان چسبنده

یکی از قابلیتهای المان چسبنده که در این تحقیق استفاده شده، امکان مدلسازی آسیب تدریجی<sup>۱</sup> و واماندگی<sup>۲</sup> در لایه-های چسبنده مبتنی بر پاسخ کشش-جدایش است. روش آسیب بر پایه پاسخ کشش-جدایش اجازه استفاده از ترکیب چندین مکانیزم آسیب بهصورت همزمان بر روی یک ماده را میدهد. هر مکانیزم واماندگی شامل سه جزء میباشد: معیار شروع آسیب، قانون رشد آسیب و انتخاب انتقال دادن المان (یا حذف کردن)<sup>۳</sup> در هنگام رسیدن به حالت آسیب کامل. اگر معیار شروع آسیب بدون مدل رشد آسیب متناظر مدل شود، نرمافزار آباکوس معیار رشد آسیب را فقط برای اهداف خروجی ارزیابی خواهد کرد، در این حالت هیچگونه تأثیری بر روی پاسخ المان چسبنده نخواهد گذاشت (به بیان دیگر هیچ آسیبی اتفاق نخواهد افتاد).

<sup>1.</sup> Progressive Damage

<sup>2.</sup> Failure

<sup>3.</sup> Element Demoval (or Deletion)

مدلسازی رشد ترک در استوانهٔ جدار نازک . . .

و (ماکزیمم مقاومت کششی ماده) و -۲ مقدار پارامتر  $\sigma_c$ (داکتیلیتی مادہ، بیانگر سطح زیر نمودار f- $\delta$  میباشد.)  $G_c$ از بین معیارهای ارائه شده در نرمافزار آباکوس برپایه کشش- جدایش، در این تحقیق معیار شروع آسیب تنش نامی درجه توان دو درنظر گرفته شده است. در این حالت فرض می شود که آسیب هنگامی شروع می شود که توان دو نسبت تنش نامی (همانگونه که در زیر تعریف شده) به مقدار ۱ برسد: (٣)

که در آن  $t_n^0$ ،  $t_s^0$  و  $t_t^0$  بیانگر مقادیر بیشینه تنش نامی هنگامیکه تغییر شکل بهصورت خاص عمود بر سطح اینترفیس و یا در جهت اول و دوم جهت برشی باشد. علامت ( ) بیانگر براکت مک کولای کا تفسیر معمولی آن است. براکت مک کولای برای جلوگیری از شروع آسیب در اثر تغییر شکلهای فشاری خالص و یا تنش فشاری استفاده شده است.

برای حالت تابع نمایی، نرمافزار آباکوس رشد متغیر آسیب، *D*، را استفاده میکند که بهصورت زیر خلاصه شده است:

$$D = \int_{\delta_m^0}^{\delta_m^f} \frac{T_{eff} d\delta}{G^c - G_0} \tag{(f)}$$

در رابطه (۴)  $T_{e\!f\!f}$  و  $\delta$  بهترتیب کشش مؤثر و جابجایی مؤثر میباشند. G<sub>0</sub> انرژی الاستیک در شروع آسیب میباشد. در این حالت سطح کشش ممکن است فوراً پس از شروع آسیب کاهش نیابد.



2. Quads Damage

<sup>3.</sup> Macaulay





<sup>1.</sup> Traction-Separation

بهمنظور استفاده از المان چسبنده نیاز به تعیین مقادیر پارمترهای  $\delta_c$  و  $\sigma_c$  میباشد. پارامترهای  $\delta_c$  و  $\sigma_c$  در واقع خواص مکانیک شکست ماده میباشند و با تغییر در نرخ بارگذاری، ضخامت و دما مقدار آنها نیز تغییر خواهد کرد. با توجه به محاسبات عددی انجام شده توسط Li و همکاران [۱۸] و همچنین سیراک و همکاران [۱۰] در حالت تنش صفحهای و شکست نرم'،  $\sigma_{vs}=2\sigma_{vs}$  بوده که درآن  $\sigma_{vs}$  مقاومت تسلیم ماده حجمی مورد استفاده در مدلسازی میباشد.

مقدار  $\Gamma_c$  با توجه به این نکته که در لحظه رشد ترک ارائه CTOA میباشد، با استفاده از میزان بحرانی  $\Gamma_c = G_c$ شده توسط میرزائی و کریمی [۱۵] در لحظه شروع رشد ترک محاسبه می شود. مدل هایی که برپایه تغییر مکان های ماکروسکوییک است، مانند زوایه بازشدگی نوک ترک CTOA معیار مناسبتری برای رشد در قطعات نازک میباشد. СТОА را می توان با رابطه زیر به CTOD مربوط کرد:

 $CTOA = 2\tan^{-1}(CTOD/2x)$ (۵) که در آن x فاصلهای است که CTOA و CTOD در آن محاسبه می شوند. طبق مرجع [۱۹]، میزان CTOA بحرانی برابر ۴/۶۱ درجه و میزان x متناسب با آن ۰/۷۶۳mm میباشد. بنابراین با توجه به رابطه (۵) میزان CTOD بحرانی ۰/۰۶۱۴mm بدست خواهد آمد. رابطه زیر می تواند برای انرژی شكست استفاده شود:

 $G_c = CTOD_c \times \sigma_{vs}$ (6) بر اساس مقادیر ذکر شده در بالا، مقدار انرژی شکست متناسب با CTOA بحرانی بدست می آید. CTOA متناسب با J

#### ۲-۴- تحلیل نتایج مدلسازی

برای استوانه جدار نازک ارائه شده در جدول ۱ و مشخصات ترک مدل سازی رشد ترک انجام گرفته است.  $2a = 8.115 \,\mathrm{mm}$ بارگذاری بر اساس آزمایش شماره ۳۴ مرجع [۱] انجام گرفته که مقادیر پارامترهای مختلف آن در جدول ۳ ارائه شده است.

در شکل ۷ نتایج مدلسازی میرزائی و کریمی [۱۵] نشان داده شده است. در این تحقیق آنها از معیار رشد ترک CTOA و کد تحقیقاتی Warp3D برای مدلسازی رشد ترک استفاده کردند [۱۹].

بهمنظور مدلسازی رشد ترک با استفاده از المان چسبنده مقدار ۱۶۹۵۳ J/m<sup>2</sup> برای انرژی شکست بحرانی با توجه به مقدار CTOA بحرانی در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از رشد ترک با استفاده از المان چسبنده در شکل ۸ نشان داده شده است.

با مقایسهٔ شکلهای ۷ و ۸ به این نکته پی خواهیم برد که نتایج حاصله از استفاده از المان چسبنده در نرمافزار آباکوس با نتایج بدست آمده از معیار رشد ترک CTOA در کد تحقیقاتی Warp3D تطابق خوبی دارند. در هردو مدلسازی مشاهده می شود که سرعت رشد ترک در جبهه جلو بیشتر از جبهه عقب ترک می باشد.

رشد ترک [۱]	مدلسازى	گازی برای	ج دتونيشن	مشخصات مو	عدول ۳
Shot	V	D	D	D	T

د ر۱	ی رشد تر	ای مدلساز	ـن کازی بر	موج دتونيش	مشخصات	جدول ۲
Shot #	<i>L</i> (m)	V <sub>cj</sub> (m/s)	$P_l$ (MPa)	P <sub>cj</sub> (MPa)	P <sub>3</sub> (MPa)	<i>T</i> (ms)
٣۴	۰/۶۱۰	74.4	•/\٨	۶/۱	٢	٠/١۵
	t	= 0.102 ms	• •	$\Delta a_f = 0,$		$\Delta a_b = 0$
a	<i>t</i> = 0	0.223 ms,	 Δa	f = 71.7,	$\Delta a_{i}$	<sub>b</sub> = 53.3
20.00	<i>t</i> = 0	).287 ms,	 Да	f =122.8,	$\Delta a_{i}$	<sub>b</sub> = 81.6
	t = 0.	414 <i>ms</i> ,	 Δa <sub>f</sub>	· = 195.2,	$\Delta a_b$	=123.5
		- 24		and a feature		

 $0 \quad \ \ 30.7 \quad 61.5 \quad 92.2 \quad 123 \quad 154 \quad 184 \quad 215 \quad 246 \quad 277 \quad 307 \quad 338$ 

t = 0.541 ms,

 $\Delta a_f = 236.4,$ 

 $\Delta a_{h} = 163.2$ 

شکل ۷ توزیع تنش اصلی اول براساس نتایج مدلسازی رشد ترک با استفاده از معیار رشد ترک CTOA [۱۹] (بر حسب MPa)

DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.3.2

<sup>1.</sup> Ductile Fracture

رشد ترک و برآمدگی آن تحت بارگذاری دتونیشن گازی به صورت سیکلی می باشد. به عبارت دیگر، در محدوده خاصی از بارگذاری دتونیشن رشد ترک توسط امواج سازهای کنترل شده و بهصورت تناوبی می باشد. مدل سازی بر آمدگی یکی از مهمترین نتایج بدست آمده حاصل از این مقاله می-باشد که با استفاده از الگوی رشد حاصل از بکارگیری المان چسبنده برای اولین بار صورت گرفته است.

#### 6- مراجع

- [1] Chao T.W, Gaseous Detonation-Driven Fracture of Tubes, PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, March 2004.
- [2] Chao T. and Shepherd J.E., "Detonation Loading of Tubes in the Modified Shear Wave Regime. In Z. editor", Proceedings of the Jiang. 24th International Symposium on Shock Waves, volume 2, Springer, 200, pp. 865-870.
- [3] Tang, S., "Dynamic Response of a Tube under Moving Pressure", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 5., 1965, pp. 97-122.
- [4] Reismann H., Response of a Pre-Stressed Cylindrical Shell to Moving Pressure Load, Eighth Midwest Mechanics Conference, (S. Ostrach and R. H. Scanlon, editors), Pergamon Press: Oxford, 1965, pp.349-363.
- [5] M. C. de Malherbe, R. D. Wing, A. J. Laderman, A. K. Oppenheim, "Response of a Cylindrical Shell to Internal Blast Loading," *Journal of Mechanical Engineering Science* 8, 91–98, 1966.
- [6] Simkins T. E, Resonance of Flexural Waves in Gun Tubes, Technical Report ARCCBTR-87008, US Army Armament Research, Development and Engineering Center, Watervliet, NY, July, 1987.
- [7] Thomas G.O. The Response of Pipes and Supports Generated by Gaseous Detonations. Journal of Pressure Vessel Technology, 124:66–73, 2002.
- [8] Beltman W.M., Burcsu E.N., Shepherd J.E., and L. Zuhal. The Structural Response of Cylindrical Shells to Internal Shock Loading. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 121:315–322, 1999.
- [9] Beltman WM, Shepherd JE. Linear elastic response of tubes to internal detonation loading. Journal of Sound and Vibration 2002; 252(4):617-55.
- [10] Fehmi Cirak, Ralf Deiterding, Sean P. Mauch. Large-Scale Fluid-Structure Interaction Simulation of Viscoplastic and Fracturing Thin-Shells Subjected to Shocks and Detonations. Computers & Structures, 2006.
- [11] Chao T.W, Shepherd J.E. Fracture Response of Externally Flawed Aluminum Cylindrical Shells under Internal Gaseous Detonation Loading.





شکل ۸ توزیع تنش اصلی اول براساس نتایج مدلسازی رشد ترک با استفاده از المان چسبنده (بر حسب MPa)

#### ۵- نتیجه گیری

#### نتیجه گیری های زیر از تحقیق حاضر می آیند: ۲۰۰۰ مدلسازیهای صورت گرفته برپایه معیار رشد ترک CTOA توسط کد تحقیقاتی Warp3D و المان چسبنده در نرمافزار تجارى آباكوس رشد ترك تحت دتونيشن يكساني را نشان میدهند. در هردو مدلسازی سرعت رشد ترک در جلو و عقب متفاوت بوده و سرعت رشد ترک در جبهه جلو بیشتر می باشد [۱۹].

۲- در صورت مشاهده نتایج در بازه زمانی کوچک (در حدود μs)، همان گونه که در مراجع [۱۷،۱۶] اشاره شده است،

DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.3.2 ]

- [15] Mirzaei M, Karimi R. Crack Growth Analysis for a Cylindrical Shell under Dynamic Loading. In: Proceedings of ASME PVP 2006/11th international conference on pressure vessel technology, ICPVT-11, Vancouver, Canada, 2006.
- [16] Mirzaei M. Failure Analysis of an Exploded Gas Cylinder. *Engineering Failure Analysis*, 15(7), (2008), 820–34.
- [17] Mirzaei M, Harandi A, Karimi R, Finite Element Analysis of Deformation and Fracture of an Exploded Gas Cylinder, *Engineering Failure Analysis*, 2008.
- [18] Li W, Siegmund T. An Analysis of Crack Growth in Thin-Sheet Metal via a Cohesive Zone Model. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002; 69: 2073–93.
- [19] Mirzaei M., Finite Element Analysis of Deformation and Fracture of Cylindrical Tubes under Internal Moving Pressures, In: David Moratal (ed.) *Finite Element Analysis, Chapter 21*, http://www.intechopen.com, 2010.

International Journal of Fracture, 134(2) (2005), 59–90.

- [12] Deiterding, R., Cirak, F., & Meiron, D. (2006). Computational Results for the Fracturing Tube Validation Experiment. ASCI/ASAP Research review Caltech, http://www.cacr.caltech.edu/asc/wiki/pub/Fracturin gTube/WebHome/DetFracSim.ppt
- [13] Mirzaei, M., Mazaheri, K., Biglari, H., Analytical Modeling of the Elastic Response of Tubes to Internal Detonation Loading, *International Journal* of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82, No. 12, pp. 883-895, 2005.
- [14] Mirzaei, M. K., Biglari, H. M. Salavatian, Analytical and Numerical Modeling of the Transient Elasto-Dynamic Response of a Cylindrical Tube to Internal Gaseous Detonation, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83/7 pp. 531-539, 2006.