



مدل سازی رشد ترک در استوانه جدار نازک آلومینیومی تحت بارگذاری دتونیشن گازی با استفاده از المان چسبنده

محمد ملکان^۱، مجید میرزائی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵، mmirzaei@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله به مدل سازی 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 مدل سازی رشد ترک استفاده شده است. نتایج بدست آمده با نتایج قبلی که بر پایه 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. Malekan¹, M. Mirzaei^{2*}

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.

۱- مقدمه

بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه مکانیک شکست استوانه جدار نازک تحت فشار داخلی، با بارگذاری های شبه استاتیکی و یا خستگی مرتبط می باشند [۲،۱]. شکست استوانه جدار نازک تحت دتونییشن به دو دلیل عمده از شکست لوله تحت بارگذاری شبه استاتیکی 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 استاتیکی معادل باشند. مطالعات مختلفی در حوزه پاسخ سازه ای پوسته ها به بارگذاری شوک و دتونییشن انجام گرفته است [۳-۹]. هرچند این مطالعات ترک را در نظر نگرفته و شکست را بررسی نکرده اند. در سال ۲۰۰۴ مطالعه آزمایشگاهی جامعی بر روی شکست استوانه جدار نازک تحت دتونییشن گازی توسط چاو و شپرد^۱ انجام گرفت [۲،۱].

شبیه سازی اثر متقابل سازه-سیال در شکست استوانه جدار نازک تحت بار شوک و دتونییشن توسط سیراک^۲ همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۰] انجام گرفت. آنها شبیه سازی برهمکنش سازه-سیال در ابعاد بزرگ و تغییر شکل ویسکوپلاستیک شکست آزمایشگاهی استوانه چاو و شپرد [۱۱] انجام دادند و از چقرمگی شکست (K_{IC}) استاتیک در حالت کرنش صفحه ای برای بدست آوردن خواص المانهای چسبنده استفاده کردند. در نهایت نتایج آنها با داده های چاو و شپرد در خصوص اندازه رشد ترک و سرعت تطابق نداشت. همچنین سرعت رشد ترک را ۲-۳ برابر مقدار آزمایشگاهی آن بدست آوردند [۱۲].

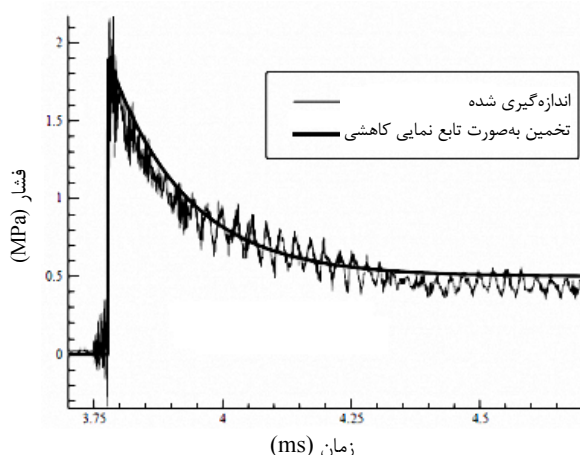
میرزائی و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۱۳] حل تحلیلی استوانه جدار نازک الاستیک به بارگذاری دتونییشن داخلی و در ادامه، میرزائی و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۴] حل تحلیل و عددی استوانه جدار نازک الاستودینامیک به بارگذاری دتونییشن داخلی را ارائه دادند. میرزائی و کریمی در سال ۲۰۰۶ [۱۵] به منظور بررسی رشد ترک در استوانه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

روش میزان رشد ترک را در حالتی که ترک در یک صفحه از پیش مشخص شده رشد می کند، محاسبه نمودند و نتایج را با نتایج چاو و شپرد [۱۱] مقایسه کردند. آنالیز شکست یک کپسول گازی منفجر شده توسط میرزائی در سال ۲۰۰۸ [۱۶] و شبیه سازی المان محدود این کپسول منفجر شده توسط میرزائی و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۷] از جمله دیگر مطالعات صورت گرفته در این زمینه می باشند که در مقاله خود به بررسی علت شکست و واماندگی یک سیلندر دارای گاز هیدروژن پرداخته اند. نتیجه این تحقیق نشان می دهد در محدوده خاصی از بارگذاری دتونییشن رشد ترک توسط امواج سازه ای کنترل شده و به صورت تناوبی می باشد.

هدف این مقاله مدل سازی عددی شکست تحت دتونییشن یک استوانه جدار نازک و مقایسه آن با نتایج بدست آمده از میرزائی و کریمی در سال ۲۰۰۶ [۱۵] می باشد.

۲- مطالعات آزمایشگاهی و معادلات بارگذاری دتونییشن گازی

موج دتونییشن 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 می باشد که به شدت با یکدیگر کوپل شده اند. امواج دتونییشن دارای سرعت و فشار مشخصی به نام چاپمن-ژوکت می باشند که این دو پارامتر بستگی به درصدهای مخلوط سوخت-هوا دارد. پروفیل فشار در یک نقطه از استوانه در طول زمان مطابق شکل ۱ می باشد.



شکل ۱ پروفیل واقعی موج دتونییشن (اندازه گیری شده در آزمایشگاه) و معادل ایده آل آن [۱]

1. Chao & Shepherd
2. Cirak
3. Crack Tip Opening Displacement

در روابط (۱) و (۲) 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 می باشند.

۳- شبیه سازی بارگذاری دتوینشن گازی در استوانه جدار نازک

در این بخش پاسخ سازه ای یک استوانه جدار نازک بدون ترک به بارگذاری دتوینشن گازی ارائه شده است. به منظور شبیه سازی بارگذاری آزمایش تجربی صورت گرفته در مرجع [۱] مدنظر قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می شود، سیستم آزمایش از سه استوانه تشکیل شده است که استوانه اصلی مورد بررسی، استوانه دوم می باشد. جنس تمامی لوله ها -AL 6061 T6 بوده که مشخصات مادی و هندسی استوانه اصلی مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

سابروتین تحت فرترن VDLOAD نرم افزار آباکوس^۱ برای شبیه سازی بارگذاری دتوینشن 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.

جدول ۱ مشخصات مادی و هندسی استوانه جدار نازک [۱]

ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)	ν	σ_{ult} (MPa)	σ_{yld} (MPa)
۲۷۸۰	69×10^9	۰/۳۳	۳۱۰	۲۷۶
h (mm)	L (m)	R_m (m)	R_{out} (m)	
ضخامت) ۰/۸۹	۰/۶۱۰	۰/۰۱۹۷۵	۰/۰۲۰۶۴	

جدول ۲ مشخصات بارگذاری [۱]

P_1 (MPa)	P_2 (MPa)	P_3 (MPa)	T (ms)	V_{cj} (m/s)
۰	۲/۶	۰/۵	۰/۱۱۵	۰/۲۳۶۵

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

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 دتوینشن در یک لحظه از زمان در طول استوانه در شکل ۲ نشان داده شده است.

هنگامی که موج دتوینشن در استوانه حرکت می کند، سه منطقه با فشارهای متفاوت در استوانه ایجاد می شود:

۱- منطقه شامل سوخت و هوا در جلوی جبهه موج که دارای فشار اولیه P_1 است.

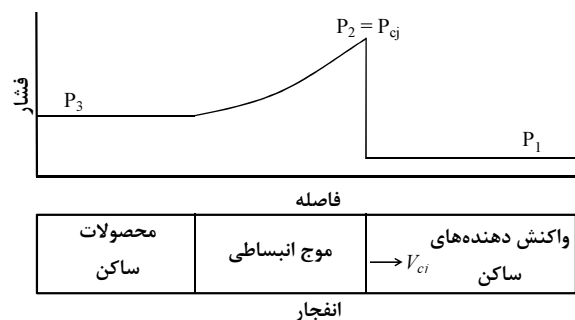
۲- ناحیه جبهه موج که دارای بیشترین فشار P_2 می باشد.

۳- منطقه پشت جبهه موج که دارای فشار P_3 است.

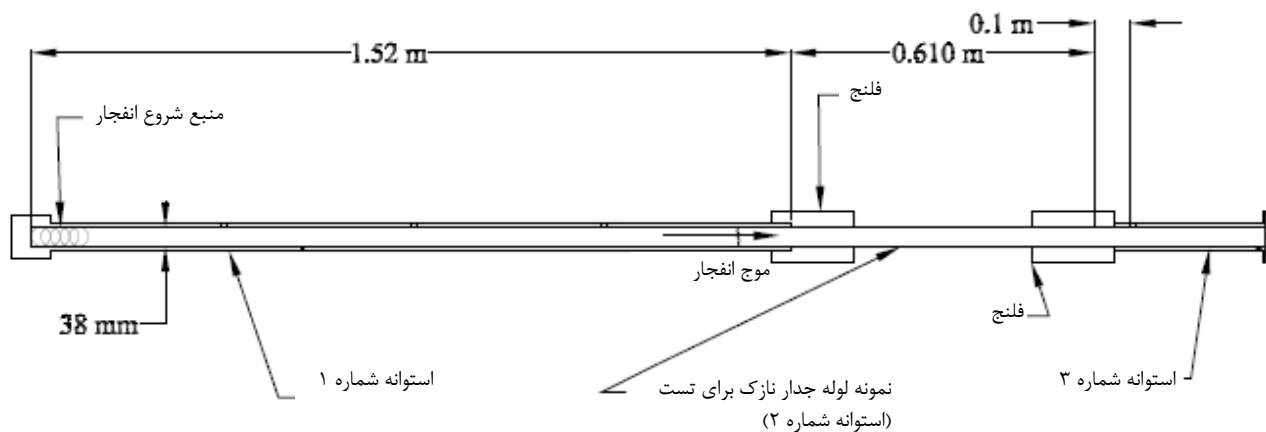
با توجه به اینکه مخلوط های استفاده شده در این تحقیق به گونه ای می باشند که جبهه موج حالتی تقریباً متقارن دارد، در شبیه سازی جبهه موج نیز این تقارن در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱ می توان پروفیل فشار را در داخل لوله بر حسب پارامترهای زمان و مکان به صورت روابط (۱) و (۲) نوشت [۹]:

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

$$P(x) = (P_1 - P_{atm}) + \left[(P_2 - P_1) + (P_2 - P_3) e^{-\frac{x-L}{V_{cj} \times T}} \right] \times [1 - H(x - L)] \quad 0 < x < L \quad (2)$$



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



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

۴- مدل‌سازی رشد ترک

در این بخش به آنالیز یک استوانه جدار نازک دارای ترک اولیه تحت بارگذاری دتوئیشن 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 می‌شود.

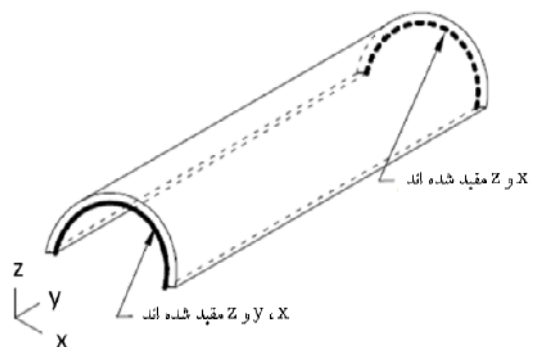
۴-۱- مدل‌سازی رشد ترک با استفاده از المان چسبنده

یکی از قابلیت‌های المان چسبنده که در این تحقیق استفاده شده، امکان مدل‌سازی آسیب تدریجی^۱ و واماندگی^۲ در لایه-های چسبنده مبتنی بر پاسخ کشش-جدایش است. روش آسیب بر پایه پاسخ کشش-جدایش اجازه استفاده از ترکیب چندین مکانیزم آسیب به صورت 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)^۳ 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).

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 ۰/۲۸۲۲m از ورودی سمت چپ لوله قرار دارد.

برای شرایط مرزی، تکیه‌گاه‌های دوسر استوانه به عنوان تکیه‌گاه‌های ساده در نظر 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 ۰/۲۸۲۲m از ورودی سمت چپ استوانه به همراه نتایج تجربی و تحلیلی در شکل ۵ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج از تطابق بسیار خوبی برخوردارند. تنها تفاوت قابل ذکر در بین نتایج فوق، صفر بودن کرنش متوسط در حل تحلیلی می‌باشد که این امر به دلیل صفر بودن مقدار فشار نهایی در حل مذکور می‌باشد.



شکل ۴ شرایط مرزی مدنظر برای استوانه جدار نازک

1. Progressive Damage
2. Failure
3. Element Demoval (or Deletion)

۲- مقدار پارامتر σ_c (ماکزیمم مقاومت کششی ماده) و G_c (داکتیلیتی ماده، بیانگر سطح زیر نمودار $t-\delta$ می باشد). از بین معیارهای ارائه شده در نرم افزار آباکوس برپایه کشش-جدایش، در این تحقیق معیار شروع آسیب تنش نامی درجه توان دو^۲ در نظر 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:

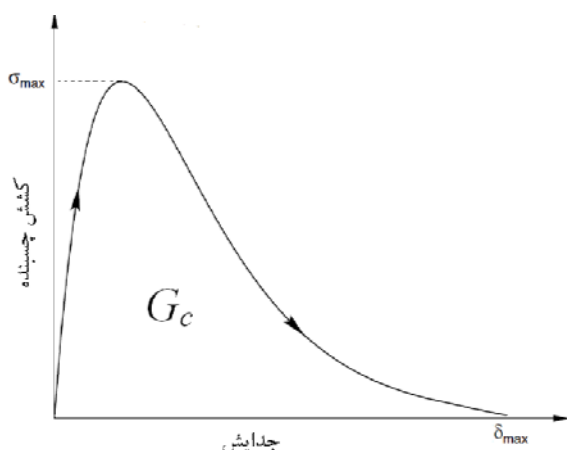
$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

که در آن t_n^0 ، t_s^0 و t_t^0 بیانگر مقادیر بیشینه تنش نامی هنگامی که تغییر شکل به صورت خاص عمود بر سطح اینترفیس و یا در جهت اول و دوم جهت برشی باشد. علامت $\langle \rangle$ بیانگر براکت مک کولای^۳ با تفسیر معمولی آن است. براکت مک کولای برای جلوگیری از شروع آسیب در اثر تغییر شکل های فشاری خالص و یا تنش فشاری استفاده شده است.

برای حالت تابع نمایی، نرم افزار آباکوس رشد متغیر آسیب، D ، را استفاده می کند که به صورت زیر خلاصه شده است:

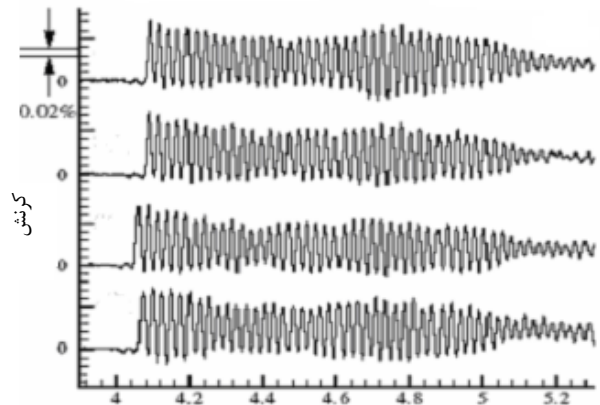
$$D = \int_{\delta_m^0}^{\delta_m^f} \frac{T_{eff}}{G^c - G_0} d\delta \quad (4)$$

در رابطه (4) T_{eff} و δ به ترتیب کشش مؤثر و جابجایی مؤثر می باشند. G_0 انرژی الاستیک در شروع آسیب می باشد. در این حالت سطح کشش ممکن است فوراً پس از شروع آسیب کاهش نیابد.



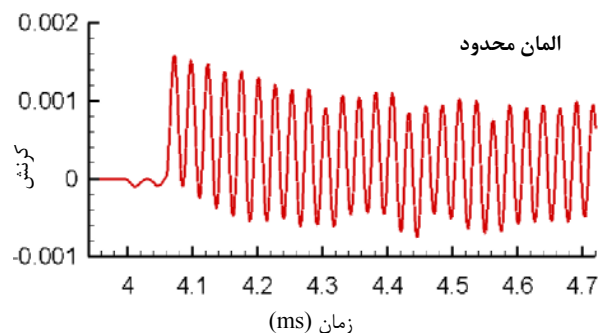
شکل ۶ نمودار کشش-جدایش برای حالت تابع نمایی

آزمایشگاهی



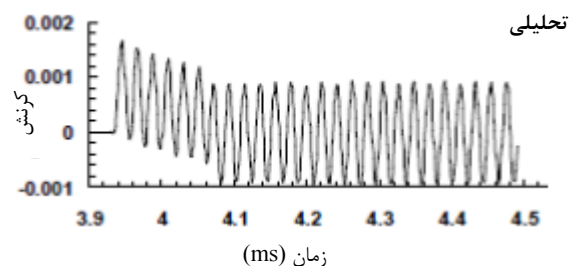
زمان (ms)

(الف) نتایج آزمایشگاهی به همراه سه مرتبه چرخش ۹۰ درجه نسبت به محور طولی [۱]



زمان (ms)

(ب) کرنش بر حسب زمان برای استوانه جدار نازک در فاصله ۰/۲۸۲۲m از سمت چپ آن



زمان (ms)

(ج) نتایج حل تحلیلی [۱۳]

شکل ۵ تاریخچه کرنش

در این مقاله معیار شروع آسیب بر اساس رابطه کشش-جدایش^۱ برای المان چسبیده می باشد. از مدل کشش-جدایش، موارد زیر استخراج می شود:

۱- شکل کلی نمودار کشش-جدایش (شکل ۶ در حالت نمایی)

1. Traction-Separation

2. Quads Damage
3. Macaulay

به‌منظور استفاده از المان چسبنده نیاز به تعیین مقادیر پارامترهای δ_c و σ_c می‌باشد. پارامترهای δ_c و σ_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^۱، $\sigma_c = 2\sigma_{ys}$ بوده که در آن σ_{ys} مقاومت تسلیم ماده حجمی مورد استفاده در مدل‌سازی می‌باشد.

مقدار Γ_c با توجه به این نکته که در لحظه رشد ترک $\Gamma_c = G_c$ می‌باشد، با استفاده از میزان بحرانی $CTOA$ ارائه شده توسط میرزائی و کریمی [۱۵] در لحظه شروع رشد ترک محاسبه می‌شود. مدل‌هایی که برپایه تغییر مکان‌های ماکروسکوپی است، مانند زوایه بازشدگی نوک ترک $CTOA$ معیار مناسب‌تری برای رشد در قطعات نازک می‌باشد. $CTOA$ را می‌توان با رابطه زیر به $CTOD$ مربوط کرد:

مقدار Γ_c با توجه به این نکته که در لحظه رشد ترک $\Gamma_c = G_c$ می‌باشد، با استفاده از میزان بحرانی $CTOA$ ارائه شده توسط میرزائی و کریمی [۱۵] در لحظه شروع رشد ترک محاسبه می‌شود. مدل‌هایی که برپایه تغییر مکان‌های ماکروسکوپی است، مانند زوایه بازشدگی نوک ترک $CTOA$ معیار مناسب‌تری برای رشد در قطعات نازک می‌باشد. $CTOA$ را می‌توان با رابطه زیر به $CTOD$ مربوط کرد:

مقدار Γ_c با توجه به این نکته که در لحظه رشد ترک $\Gamma_c = G_c$ می‌باشد، با استفاده از میزان بحرانی $CTOA$ ارائه شده توسط میرزائی و کریمی [۱۵] در لحظه شروع رشد ترک محاسبه می‌شود. مدل‌هایی که برپایه تغییر مکان‌های ماکروسکوپی است، مانند زوایه بازشدگی نوک ترک $CTOA$ معیار مناسب‌تری برای رشد در قطعات نازک می‌باشد. $CTOA$ را می‌توان با رابطه زیر به $CTOD$ مربوط کرد:

$$CTOA = 2 \tan^{-1}(CTOD / 2x) \quad (5)$$

که در آن x فاصله‌ای است که $CTOA$ و $CTOD$ در آن محاسبه می‌شوند. طبق مرجع [۱۹]، میزان $CTOA$ بحرانی برابر $4/61$ درجه و میزان x متناسب با آن $0/763mm$ می‌باشد. بنابراین با توجه به رابطه (۵) میزان $CTOD$ بحرانی $0/614mm$ بدست خواهد آمد. رابطه زیر می‌تواند برای انرژی شکست استفاده شود:

$$G_c = CTOD_c \times \sigma_{ys} \quad (6)$$

بر اساس مقادیر ذکر شده در بالا، مقدار انرژی شکست $16953 J/m^2$ متناسب با $CTOA$ بحرانی بدست می‌آید.

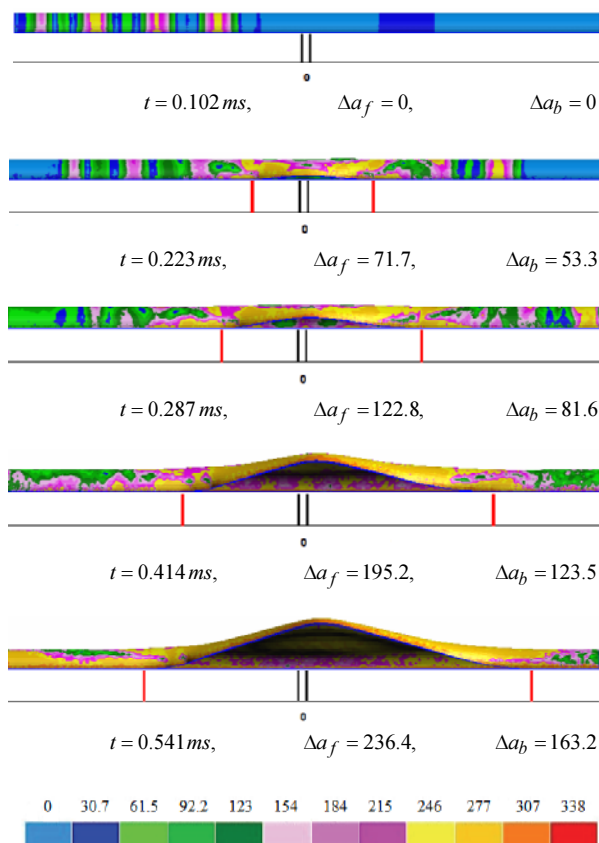
۲-۴- تحلیل نتایج مدل‌سازی

برای استوانه جدار نازک ارائه شده در جدول ۱ و مشخصات ترک برای استوانه جدار نازک ارائه شده در جدول ۱ و مشخصات ترک $2a = 8.115 mm$ مدل‌سازی رشد ترک انجام گرفته است. 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].

جدول ۳ مشخصات موج دتوئیشن گازی برای مدل‌سازی رشد ترک [۱]

Shot #	L (m)	V_{cj} (m/s)	P_1 (MPa)	P_{cj} (MPa)	P_3 (MPa)	T (ms)
۳۴	۰/۶۱۰	۲۴۰۴	۰/۱۸	۶/۱	۲	۰/۱۵



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

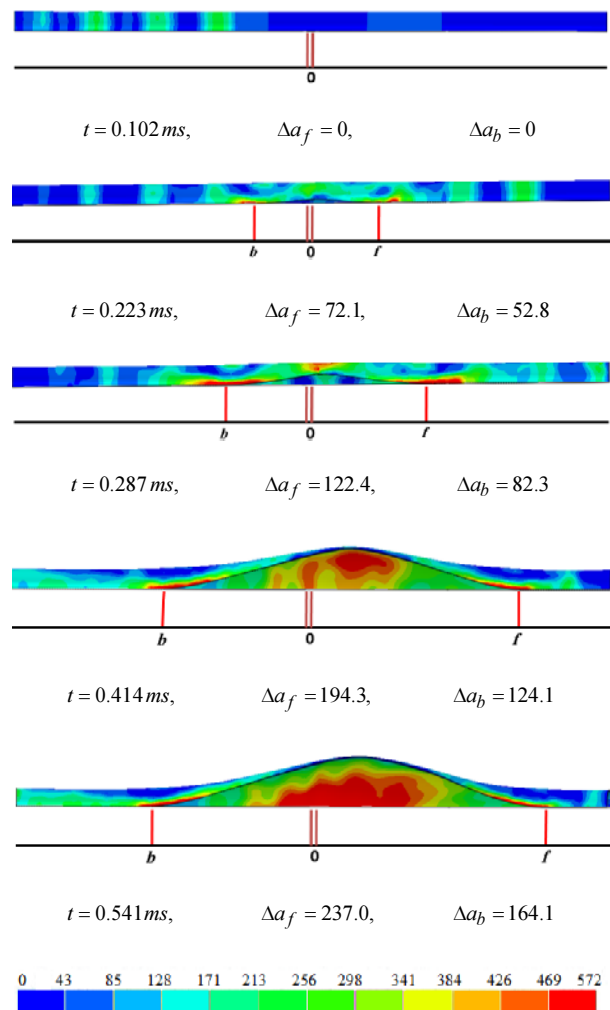
1. Ductile Fracture

رشد ترک و برآمدگی^۱ آن تحت بارگذاری دتونیشن گازی به صورت سیکلی می‌باشد. به عبارت دیگر، در محدوده خاصی از بارگذاری دتونیشن رشد ترک توسط امواج سازه‌ای کنترل شده و به صورت تناوبی می‌باشد. مدل‌سازی برآمدگی یکی از مهمترین نتایج بدست آمده حاصل از این مقاله می‌باشد که با استفاده از الگوی رشد حاصل از بکارگیری المان چسبنده برای اولین بار صورت گرفته است.

۶- 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. Jiang, editor", *Proceedings of the 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. Zuhail. 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.

1. Bulging



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

۵- نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری‌های زیر از تحقیق حاضر می‌آیند:

- ۱- مدل‌سازیهای صورت گرفته برپایه معیار رشد ترک CTOA توسط کد تحقیقاتی Warp3D و المان چسبنده در نرم‌افزار تجاری آباکوس رشد ترک تحت دتونیشن یکسانی را نشان می‌دهند. در هردو مدل‌سازی سرعت رشد ترک در جلو و عقب متفاوت بوده و سرعت رشد ترک در جبهه جلو بیشتر می‌باشد [۱۹].
- ۲- در صورت مشاهده نتایج در بازه زمانی کوچک (در حدود μs)، همان‌گونه که در مراجع [۱۶، ۱۷] اشاره شده است،

- [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/FracturingTube/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.