مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 297-302

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تجزیه و تحلیل شکست‌های ناشی از انفجار لوله‌ها و مخازن تحت فشار

سحرناز توکلی[1]، مجید میرزائی[2*]

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-143، mmirzaei@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 اسفند 1394

پذیرش: 08 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 05 خرداد 1395

کلید واژگان:

رشد ترک

مخازن تحت فشار

تجزیه و تحلیل تنش دینامیکی

بار متحرک

انفجار

چکیده

هدف اصلی این مقاله، تجزیه و تحلیل خصوصیات رفتارهای تغییر فرم و شکست ناشی از دو نوع انفجار متفاوت (تراک و سوزش سریع) در لوله-ها و مخازن تحت فشار می‌باشد. مشخصات اصلی رفتارهای تغییر فرم و شکست در لوله‌ها از طریق آزمایش، و در مخازن با بررسی شکست سیلندر گاز طبیعی فشرده، تجزیه و تحلیل شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در این راستا، نتایج تحلیل المان محدود الاستوپلاستیک دینامیکی گذرای تغییر فرم و شکست ناشی از احتراق یک لوله فولادی و سیلندر گاز طبیعی فشرده نیز گزارش می‌شود. مدل‌های المان محدود از المان-های آجری سه بعدی مجهز به المان‌های چسبنده رابط به منظور شبیه سازی رشد ترک ساخته شده‌اند. تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیه سازی و الگوهای تغییر فرم و شکست واقعی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که به دلیل شرایط بارگذاری مختلف، الگوهای تغییر فرم و شکست خاص و وابسته به نوع انفجار در طول فرآیند انفجار ایجاد می شوند.

On fracture analysis of exploded pressure vessels and pipes

Saharnaz Tavakoli, Majid Mirzaei*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, mmirzaei@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 march 2016
Accepted 27 April 2016
Available Online 25 May 2016

Keywords:
Crack growth
Pressure vessel
Dynamic stress analysis
Moving load
Explosion

ABSTRACT

The main scope of this paper is the analysis of the specifications of deflagration-induced and detonation-induced deformation and fracture behaviors of cylindrical tubes. The main characteristics of deformation and fracture behaviors were studied through experimentations on steel pipes and failure analysis of a compressed natural gas (CNG) cylinder. The paper also reports the results of transient-dynamic elasto-plastic finite element (FE) analyses of the combustion-induced deformation and fracture behaviors of the pipe and the CNG cylinder. The FE models were composed of 3D brick elements equipped with interface cohesive elements for crack growth analysis. Very good agreement was found between the simulation results and the observed deformation and fracture patterns. It was shown that, because of different loading conditions, specific deformation and fracture features can develop during the explosion process.

1-مقدمه

مخازن و لوله‌های تحت فشار در بخش‌های عمومی و صنعتی مختلف به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین طراحی مناسب، ساخت، کنترل کیفیت، حمل و نقل و بکارگیری آن‌ها معمولا توسط استانداردها و مقررات سختگیرانه‌ای تعیین می‌شود. با این وجود، ترکیدن تصادفی یا حتی انفجار این مخازن امکان پذیر بوده و می‌تواند ویرانگر باشد.

به طور کلی، وقوع احتراق داخلی در لوله‌های استوانه‌ای سبب ایجاد فشار متحرکی می‌شود که با سرعت بسیار زیاد حرکت می‌کند. براساس نوع احتراق (تراک[1] و سوزش سریع[2])، سرعت فشار متحرک می‌تواند مادون صوت یا مافوق صوت باشد (شکل 1). تراک‌ها رخدادهای احتراقی هستند که در آن‌ها سرعت جبهه موج احتراق، مافوق صوت می‌باشد. انفجار تراک، بسیار شدیدتر از انفجار سوزش سریع (با جبهه موج مادون صوت) می‌باشد زیرا که امواج فشار متحرک، بسیار قوی‌تر هستند. ویژگی بارز پاسخ سازه‌ای یک لوله استوانه‌ای به امواج فشاری ناشی از تراک، تشکیل امواج سازه‌ای می‌باشد. تنش‌های دینامیکی حاصل شده، می‌توانند سبب انواع مختلف شکست‌های مکانیکی شوند [1].

به طور کلی، برای انواع مختلف پاسخ سازه‌ای که مورد انتظار می‌باشد، سه سطح فشار قابل تعریف است. این فشارها متناسب با مقدار تنش‌های حاصل، طبقه‌بندی می‌شوند و می‌توانند کمتر، برابر و یا بیشتر از مقاومت کششی نهایی دینامیکی ماده باشند. در ادامه، ما به این سطح‌های فشار به ترتیب به عنوان 1، 2 و 3 اشاره می‌کنیم.

برای فشارهای نسبتا کم (سطح 1)، عبور جبهه فشار سبب ایجاد یک الگوی کرنش الاستیک نوسانی می‌شود که حتی پس از بین رفتن بار متحرک می‌تواند وجود داشته باشد. برای این مورد، راه حل‌های تحلیلی، تجربی و

[1] Detonation
[2] deflagration

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
S. Tavakoli, M. Mirzaei, On fracture analysis of exploded pressure vessels and pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 297-302, 2016 (in Persian)

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.22.3]

المان محدود برای پاسخ سازه‌ای در دسترس می باشد [2-11].

از سوی دیگر، اعمال فشارهای متحرک با دامنه بسیار بالا (سطح3) می‌تواند سبب گسترش سریع و ترک خوردگی‌های متعدد پیشرو در دیواره لوله شود که منجر به تکه تکه شدن شدید دینامیکی می‌شود. با این حال، باید تاکید کرد که این نوع از شکست دینامیکی که می‌تواند از تراک گازی [12] و جامد [14,13] نتیجه شود، مورد بررسی این مقاله نیست.

تمرکز پژوهش حاضر بر روی حرکت فشارهای متوسط (سطح 2) می‌باشد که سبب ایجاد تنش‌های دینامیکی در محدوده مقاومت کششی نهایی ماده می‌شود. این تنش‌ها می‌توانند آغازگر ترک‌های محوری باشند که با انتشار بیشتر می‌توانند سبب پاره شدن یا تکه تکه شدن محدود دیواره لوله شوند. قبل از مطالعات تجربی چائو [15] بر روی لوله‌های آلومنیومی تحت تراک گازی، هیچ گزارشی در مورد این نوع شکست محدود ناشی از تراک در ادبیات فنی وجود نداشت. در ادامه این کار، چندین محقق مطالعات المان محدود برای مدل‌سازی این آزمایشات را انجام دادند [16-20]. از سوی دیگر، شواهد قابل اتکایی از رشد تدریجی ترک بوسیله امواج خمشی در حین تجزیه و تحلیل شکست یک سیلندر گاز هیدروژن منفجر شده، پیدا شد [22,21]. این شواهد شامل ویژگی‌های نشانه‌های خاص پیدا شده روی سطوح شکست می‌باشند و نشان می‌دهند که در این نوع شکست، بخش اصلی انتشار ترک می‌تواند شامل رشد تدریجی سیکلی باشد. متاسفانه، اکثر شبیه سازی‌های المان محدود گزارش شده از شکست ناشی از دتونیشن لوله‌های استوانه‌ای، فاقد ملاحظات فوق می‌باشند. اخیرا شبیه‌سازی‌های المان محدود شکست ناشی از تراک لوله‌های آزمایشی و شواهد پیدا شده روی سطوح شکست این لوله‌ها [23] تائید کرده‌اند که یک ویژگی مهم شکست ناشی از تراک لوله‌ها، این است که مرحله انتشار ترک می‌تواند اساسا یا کاملا توسط امواج سازه‌ای رانده شود و کل فرآیند ترک خوردگی و تکه تکه شدن می‌تواند بعد از عبور جبهه دتونیشن رخ دهد. از دیگر ویژگی‌های شکست ناشی از دتونیشن، فرآیند تورم لبه‌های ترک[1] و نهایتا شاخه شاخه شدن ترک می‌باشد.

با توجه به مطالب بالا، هدف از این مقاله بررسی ویژگی‌های اصلی الگوهای تغییر فرم و شکست ناشی از احتراق لوله‌های استوانه‌ای با استفاده از نتایج عددی و تجربی مربوط می‌باشد. ملاحظات فوق، کاربرد مستقیم در تجزیه و تحلیل شکست لوله‌ها و مخازن تحت فشار دارند.

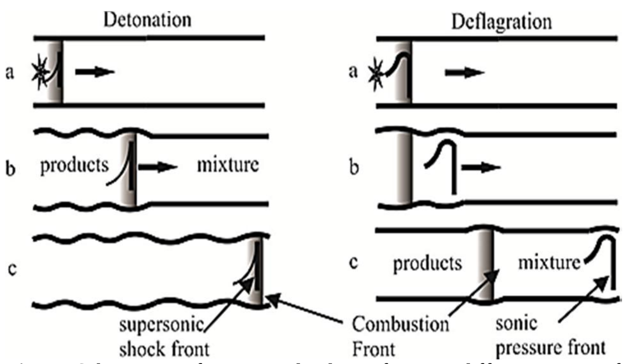

Fig. 1 Schematics of pressure loadings for two different types of internal combustions in cylindrical tubes. The amplitudes of deformations and structural waves are exaggerated for clarity.

شکل 1 شماتیک بارگذاری فشاری برای دو نوع مختلف احتراق داخلی در لوله‌های استوانه‌ای. دامنه تغییر فرم و امواج سازه‌ای به منظور وضوح، اغراق آمیز رسم شده‌اند.

[1] Flap

2- تجزیه و تحلیل تغییر فرم و شکست ناشی از دتونیشن یک لوله فولادی

در این بخش بررسی‌های تجربی و عددی شکست ناشی از تراک داخلی یک لوله فولادی گزارش شده است.

2-1- روش تجربی

نمونه‌های تجربی، قطعات کوتاه از لوله‌های فولادی (St52-3، کار سرد شده) با ابعاد و خواص مواد ذکر شده در جدول 1 می‌باشند.

فتیله انفجاری (پتن[2]،8 گرم بر متر) درون لوله‌ها و در یک آرایش هم محور با استفاده از جدا کننده‌های پنبه‌ای، نصب شده است. جزئیات بیشتر در مورد آزمایش تجربی را می‌توان در مرجع [23] یافت. لازم به ذکر است که آزمایشات گزارش شده در مرجع [23] مربوط به لوله گاز از جنس متفاوت بوده و همچنین شبیه‌سازی‌های مربوط با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا[3] و با کوپل سازه - سیال و استفاده از معیار آسیب کرنش بحرانی انجام شده که با روش های تحقیق حاضر متفاوت است.

2-2- شبیه سازی المان محدود

مدل المان محدود با استفاده از 650000 المان آجری سه بعدی با تعداد 5، 130 و 1000 المان، به ترتیب در جهت‌های شعاعی، محیطی و محوری ساخته شده است. اثرات نرخ کرنش با استفاده از رابطه جانسون– کوک، چنانچه در رابطه (1) آمده، در نظر گرفته شده است.

$$\sigma_{\text{flow}} = \left[A + B(\varepsilon_{\text{eff}}^{\text{p}})^N\right]\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^{\text{p}}}{\dot{\varepsilon}}\right)\right] \quad (1)$$

که در آن σ_{flow} تنش پلاستیک، $\varepsilon_{\text{eff}}^{\text{p}}$ کرنش پلاستیک موثر، $\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^{\text{p}}$ نرخ کرنش پلاستیک موثر و $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش مرجع می باشد. علاوه بر این، A، B، N و C پارامترهای جانسون – کوک برای ماده هستند که مقادیر مورد استفاده در این مقاله در جدول 2 آورده شده است.

بخش بسیار مهم شبیه سازی، مربوط به آماده سازی و اعمال بار فشاری متحرک با ویژگی‌های مورد نیاز می‌باشد. پیشینه بارگذاری یا فشار ناشی از تراک فتیله انفجاری روی دیواره لوله می‌تواند توسط یک تقریب نمایی از مدل تیلور - زلدویچ[4] برای تغییر فشار در یک نقطه ثابت در فضا نشان داده شود.

$$P(t) = \begin{cases} P_1, & 0 < t < t_{\text{d}}. \\ (P_2 - P_3)\exp\left(-\dfrac{(t - t_{\text{d}})}{T}\right) + P_3 & t_{\text{d}} \leq t. \end{cases} \quad (2)$$

جدول 1 ابعاد و خواص مواد لوله فولادی

Table 1 Dimensions and Material properties of the steel tube

خواص	مقدار
طول لوله (mm)	500
قطر خارجی (mm)	22
ضخامت (mm)	2
دانسیته (kgm^{-3})	7870
مدول الاستیسیته (GPa)	206
ضریب پواسون	0.29
مقاومت تسلیم (MPa)	350
استحکام کششی نهایی (MPa)	590
افزایش طول نسبی (%)	12

[2] PETN
[3] LSDYNA
[4] Taylor - zeldovich

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.22.3]

جدول 2 پارامترهای جانسون – کوک برای فولاد کار سرد شده St52-3 با فرم نرخ کرنش استاندارد

Table 2 Johnson-Cook parameters for St52-3 cold-drawn steel with standard strain-rate form.

پارامترهای معادله جانسون - کوک	مقدار
A (MPa)	350
B (MPa)	370
C	0.012
N	0.34
نرخ کرنش مرجع (sec^{-1})	1

در رابطه (2)، P_1 فشار اولیه، P_2 فشار حداکثر، P_3 فشار پس از شاک، t متغیر زمان، T فاکتور کاهش نمایی و V_d سرعت تراک) $t_d = \frac{x}{V_d}$ (زمان مورد نیاز برای آن‌که جبهه تراک به مکان x برسد، می‌باشند. سرعت موج تراک 7040 متر بر ثانیه می‌باشد که برای آن فشار حداکثر 210 مگاپاسکال، فشار اولیه 0.1 مگاپاسکال، و فشار پس از شاک 42 مگاپاسکال قرار داده شده است. ضریب کاهش نمایی، 3×10^{-6} ثانیه بوده است. پارامترهای بار متحرک از تجزیه و تحلیل اندرکنش سیال و سازه یک لوله مشابه بدست آمده‌اند که در مرجع [23] گزارش شده است. تنش چسبنده برای دو حالت رشد ترک بازشونده و برشی (مود 1 و 3) 550 و 275 مگاپاسکال بوده و انرژی‌های شکست برای رشد ترک در این دو حالت به ترتیب 70 و 35 کیلوژول بر متر مربع انتخاب شده‌اند.

2-3- نتایج تجربی

"شکل 2"، شکست لوله بعد از انفجار را نشان می‌دهد. الگوی ترک خوردگی، به وضوح رشد ترک تدریجی رو به جلو (جهت بار متحرک) و رو به عقب (جهت مخالف) را نشان می‌دهد. واضح است که در طول این دوره محدود رشد، نوک ترک رو به جلو بیشتر از نوک ترک رو به عقب رشد می‌کند. نکته جالب این است که این رشد تناوبی توسط امواج خمشی ایجاد شده‌اند که به صورت پی در پی توسط اثرات دینامیکی بار متحرک سرعت بالا تولید شده‌اند.

از یک طرف، این نشانه‌های بوجود آمده در سطح شکست شبیه علائم نواری خستگی هستند زیرا که رشد ترک ناشی از کرنش‌های نوسانی را نشان می‌دهند (اگرچه آن‌ها هزاران بار بزرگ‌تر از علائم نواری خستگی چرخه بالای عادی هستند). از سوی دیگر، آن‌ها را می‌توان به‌عنوان نشانه های توقفی ترک در نظر گرفت چرا که آن‌ها مکان توقف ترک در حال رشد تحت کنترل جابجایی را نشان می‌دهند [22,21]. از این‌رو، سرعت ترک را می‌توان با تقسیم فاصله بین این نشانه‌ها بر دوره زمانی هر چرخه بارگذاری بدست آورد

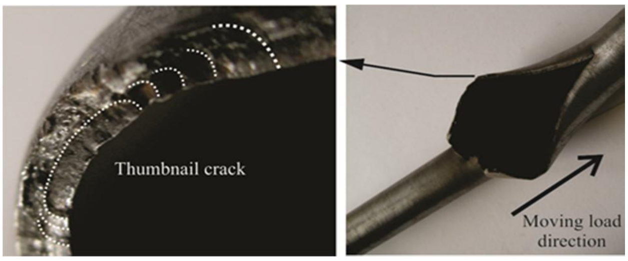

Fig. 2 Right: the fractured tube (direction of the moving pressure is shown by the arrow). Left: the crack initiation (thumbnail crack) and the subsequent incremental growth at both directions

شکل 2 سمت راست: لوله شکسته شده (جهت فشار متحرک توسط پیکان نشان داده شده). سمت چپ: شروع ترک (نیم بیضی سطحی) و رشد تدریجی پی در پی در هر دو جهت

[21]. از دیگر ویژگی‌های مهم، تورم تدریجی لبه‌های ترک و انشعاب ترک در مجاورت ناحیه متورم می‌باشد (شکل 2).

2-4- نتایج شبیه سازی

"شکل 3"، نتایج تجزیه و تحلیل الاستوپلاستیک دینامیکی دو لوله با شرایط مرزی گیردار– آزاد را نشان می‌دهد (شبیه آزمایش‌ها). این شکل، تصاویر لحظه‌ای از رشد ترک شبیه‌سازی شده برای مدل المان محدود در فواصل زمانی مختلف را نشان می‌دهد.

این دو مدل کاملا مشابه بودند با این تفاوت که ترک‌های نیمه بیضوی کوچک در مکان‌های مختلف (x = 170 mm و 380 mm) از ورودی لوله (نقطه شروع احتراق) قرار گرفته‌اند. نتایج، رشد افزایشی ترک در هر دو نوک ترک و فرآیند تورم تدریجی لبه‌ها تا انشعاب نهایی ترک را نشان می‌دهند. کانتور تنش، حرکت امواج خمشی ناشی از دتونیشن را به سمت انتهای لوله نشان

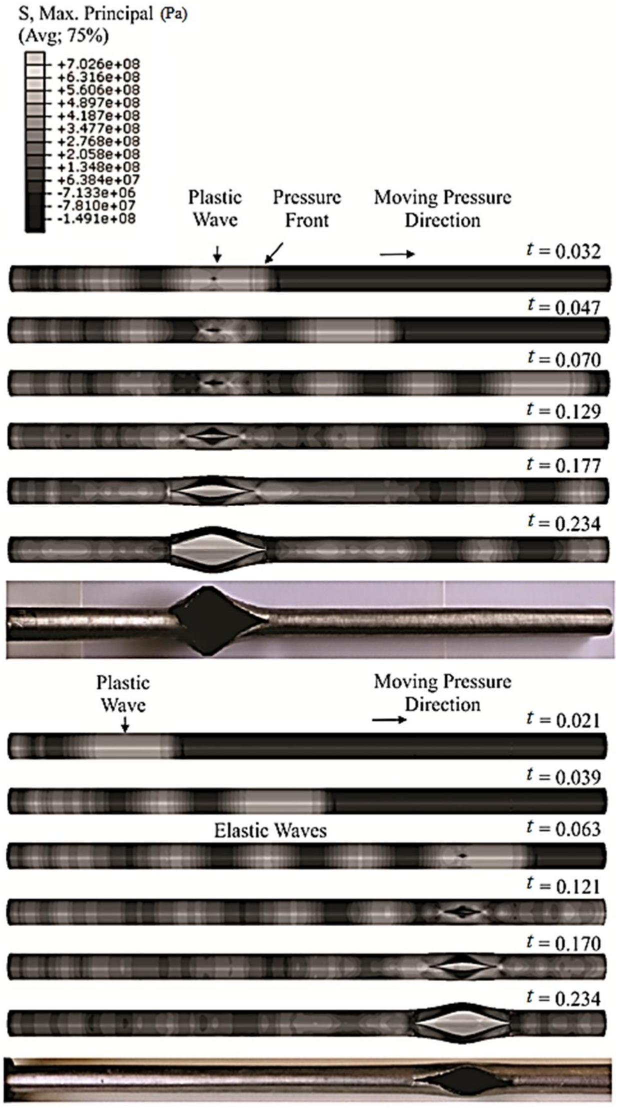

Fig. 3 The snapshots of simulated crack growth caused by a supersonic pressure wave at different time intervals (ms) for two similar FE models with different pre-crack locations

شکل 3 عکس‌های لحظه‌ای شبیه‌سازی رشد ترک ناشی از حرکت موج فشار مافوق صوت در فواصل زمانی مختلف (میلی‌ثانیه) برای دو مدل المان محدود مشابه با مکان‌های ترک اولیه متفاوت

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.22.3]

می‌دهد. همچنین نشان داده شده است که موج پلاستیک اولیه تنها یک ترک کوچک درون- ضخامتی را ایجاد کرده است. رشد تدریجی ثانویه، کار امواج خمشی بوده که در امتداد طول لوله حرکت می‌کنند و در هر دو انتها منعکس می‌شوند. کیفیت و کمیت الگوهای تغییر فرم و شکست (میزان رشد، متورم شدن لبه‌ها و انشعاب) کاملا با نتایج آزمایشگاهی قابل مقایسه هستند.

3- تجزیه و تحلیل شکست سیلندر گاز طبیعی فشرده

در این بخش، به طور خلاصه تجزیه و تحلیل شکست یک سیلندر گاز طبیعی فشرده[1] منفجر شده را بررسی می‌کنیم [24]. هدف این است که تفاوت‌های عمده بین ویژگی‌های شکست ناشی از تراک و سوزش سریع را نشان دهیم. الگوهای شکست کلی سیلندر، همان‌گونه که در "شکل 4"، نمایش داد شده، یک شروع و رشد نامتقارن ترک اصلی، مربوط به ناحیه میانی سیلندر را نشان می‌دهد. این الگو کاملا مغایر با الگوی ترکیدن معمول این سیلندرها (ناشی از فشار بیش از حد) می باشد. الگوی معمول به طور طبیعی در ناحیه میانی شروع می‌شود و به سمت دو انتهای سیلندر منتشر می‌شود و تولید یک الگوی شکست تقریبا متقارن (نسبت به ناحیه میانی) می‌کند. براساس استدلال‌های بالا، در ابتدا نتیجه گیری شد که علت شکست نامتقارن مشاهد شده یا یک عیب موجود از قبل و یا یک بارگذاری فشاری نامتقارن بوده است. بازرسی محل شروع ترک‌های اصلی و موازی هیچ شواهدی از ترک خوردگی قبلی به علت خستگی، خوردگی تنش، عیوب ماده و یا معایب ساخت را نشان نداد. بر این اساس، اعمال یک بارگذاری نامتقارن (نسبت به ناحیه میانی) به عنوان یک سناریوی محتمل در نظر گرفته شد. مطابق مشاهدات و تجزیه و تحلیل‌های بالا، به نظر محتمل رسید که این شکست می‌تواند به علت سوزش سریع مادون صوت یک مخلوط گازی اتفاق افتاده باشد. مرحله بعدی شبیه-سازی المان محدود تغییر فرم و شکست سیلندر تحت فشار متحرک فرض شده و محاسبه سطوح تنش که باعث تغییر فرم و شکست قسمت‌های مختلف سیلندر شده‌اند، می‌باشد. شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از نرم-افزار آباکوس انجام شد. یک بخش بسیار مهم شبیه‌سازی، آماده‌سازی و اعمال بار فشاری متحرک با ویژگی‌های موردنیاز می‌باشد. در مجموع، پروفایل و سرعت جبهه احتراق در مخلوط گازی به پارامترهای بسیاری از جمله ترکیب و فشار مخلوط بستگی دارد. از آن‌جا که سرعت جبهه احتراق سوزش سریع، مادون صوت می‌باشد و امواج فشاری حاصل در سرعت صوت حرکت می‌کنند، الگوی بارگذاری همان‌طور که در "شکل 1"، نشان داده شده به صورت یک پیشانی شاک صوتی تنظیم شده است. "شکل 4"، نتایج تجزیه و تحلیل المان محدود الاستوپلاستیک دینامیکی تغییر فرم و شکست سیلندر، ناشی از حرکت موج فشار با سرعت صوت از قسمت گلویی به سمت قسمت تحتانی را نشان می‌دهد. پیشرفت تنش حلقه‌ای که باعث ترک‌های موازی طولی در ابتدای بخش استوانه‌ای سیلندر می‌شوند در "شکل 4"، نشان داده شده‌اند. این همان مکانی است که شروع ترک‌های محوری بر روی سیلندر منفجر شده، تشخیص داده شده‌اند. شروع و رشد جزئی ترک‌های موازی در همان بخش را می‌توان به ماهیت بارگذاری حلقه‌ای فشار متحرک، ناشی از سوزش سریع نسبت داد. در حالت ایده‌آل، انتظار می‌رود که بارگذاری حلقوی باعث جابجایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های شعاعی متقارن شود. اگرچه در واقعیت، ناهمگنی ذاتی ماده می‌تواند سبب ترک خوردگی موضعی در مکان‌های نسبتا ضعیف اطراف حلقه شود. در مواردی که جبهه‌های متحرک دارای فشار بالا هستند، ترک خوردگی‌های موازی فراوان است و به طور طبیعی منجر به تکه تکه شدن شدید می‌شوند. با این وجود، برای یک جبهه فشار متوسط با سرعت صوت، رشد ترک‌های موازی می‌تواند به علت مصرف سریع انرژی کرنشی توسط پیشروی یک ترک مطلوب، متوقف شود. خوشبختانه در مدل المان محدود، ناهمگنی عددی مش، تا حدی نقش مشابه را ایفا می‌کند و رشد آغازی و جزئی ترک‌های موازی می‌توانند به طور طبیعی همان‌گونه که در "شکل 4"، نمایش داده شده، رخ دهند.

یکی دیگر از ویژگی‌های جالب این شکست، وجود ترک‌های متعدد در گلوگاه سیلندر می‌باشد. شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد که این ترک‌های سطحی توسط تمرکز تنش‌های خمشی روی هر نیمه جدا شده گلوگاه ایجاد شده‌اند. ین شبیه‌سازی همچنین به وضوح نشان می‌دهد که گلوگاه، نخست در سمت جلو توسط رشد ترک اصلی و بعد از آن در سمت عقب به علت خمش لبه‌های ترک، دچار ترک خوردگی می‌شود.در حقیقت، نتایج شبیه‌سازی المان محدود نه تنها با فرض اولیه در مورد علت این شکست مطابقت دارد بلکه همچنین تعدادی از ویژگی‌های خاص شکست ناشی از سوزش سریع داخلی مخازن را آشکار می‌سازد. این ویژگی‌ها با آنچه در بخش 2 ذکر شده و آن‌چه در قبل برای شکست ناشی از تراک در سیلندر مشابه [21] گزارش شده، کاملا متفاوت هستند.

4- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج عددی و تجربی ارائه شده در این مقاله به وضوح ویژگی‌های مهم دو نوع رفتار مختلف تغییر فرم و شکست لوله‌های استوانه‌ای، ناشی از تراک و سوزش سریع را نشان می‌دهند. در نوع اول، مشاهده نشانه-های پله‌ای [21] روی سطوح شکست لوله‌های گسیخته شده، رشد ترک تدریجی توسط امواج سازه‌ای ناشی از تراک را نشان می‌دهد. یکی از ویژگی-های رشد ترک توسط امواج خمشی، تورم افزایشی لبه‌های ترک می‌باشد. با گسترش ناحیه متورم، تنش‌های کششی بزرگ (معادل تنش تسلیم) می‌توانند در ناحیه متورم در جهت محوری لوله توسعه یابند. از آن‌جا که ترک‌ها معمولا تمایل به رشد عمودی بر جهات بزرگ‌ترین تنش اصلی را دارند، رشد ترک در جهت اولیه توسط تنش‌های اطراف ناحیه متورم به رشد محیطی تبدیل

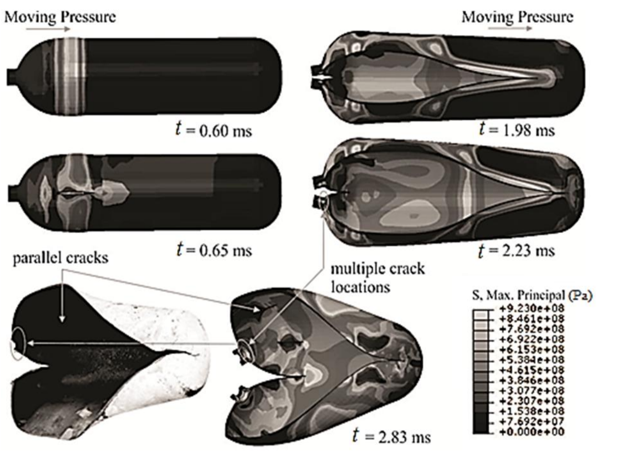

Fig. 4 FE simulation of deformation and fracture of a CNG cylinder. The snapshots show the initiation and growth of the main crack, the parallel cracks, and the multiple cracks caused by traveling of a sonic pressure wave from the neck towards the bottom of the cylinder [24].

شکل 4 شبیه‌سازی المان محدود تغییر فرم و شکست یک سیلندر گاز طبیعی فشرده. تصاویر لحظه‌ای، شروع و رشد ترک اصلی، ترک‌های موازی، ترک‌های متعدد ناشی از حرکت موج فشار صوتی از گلوگاه به سمت انتهای سیلندر [24].

[1] compressed natural gas (CNG)

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.22.3]

می‌شود. وقوع انشعاب در این نقطه برای مواردی که نرخ آزادسازی انرژی ترک برای پشتیبانی از دو جبهه ترک به اندازه کافی بالا باشد، امکان‌پذیر است. جالب توجه است که مشاهدات بالا، کاربرد مستقیمی در تجزیه و تحلیل شکست لوله‌ها و مخازن تحت فشار منفجر شده، مانند تراک‌های تصادفی که در نیروگاه‌های هسته‌ای ژاپن و آلمان در سال 2001 رخ داد، دارند. گزارش شده است که در مورد قبلی، بخش‌های لوله‌های بخار فولادی به علت احتراق مخلوط هیدروژن– اکسیژن توسط تجزیه ناشی از تشعشع، تکه تکه شده‌اند [25].یکی از مهمترین سوال‌هایی که در طول بررسی حادثه بوجود آمد این بود که آیا نوع احتراق تصادفی می‌تواند از الگوهای شکست استنباط شود. براساس شواهد نشان داده شده در مراجع [21] و نتایج تجربی پژوهش حاضر، واضح است که ترکیدن ناشی از تراک داخلی لوله‌های استوانه‌ای دارای ویژگی‌های مشخصی می‌باشد. از سوی دیگر، نشان داده شده است که نشانه‌های شکست‌های ناشی از سوزش سریع (به علت امواج فشاری حاصل از جبهه احتراق مادون صوت) می‌توانند با ویژگی‌های تغییر فرم و شکست ناشی از تراک، کاملا متفاوت باشند.

به طور خلاصه، امواج فشاری مافوق صوت حاصل از تراک باعث تحریک لوله شده و امواج سازه‌ای حاصل سبب رشد ترک سیکلی می‌شوند، در حالی که رشد ترک ایجاد شده به علت حرکت امواج فشاری متحرک با سرعت صوت ناشی از سوزش سریع، یکنواخت هستند و توسط خود امواج فشاری رانده می‌شوند. این نتیجه گیری‌ها می‌توانند به تجزیه و تحلیل شکست‌های مشابه در آینده و همچنین پیدا کردن پاسخ برای برخی از سوال‌های مطرح شده در گذشته، کمک کنند. در خاتمه اهم نتایج حاصل و نوآوری‌های این تحقیق به شرح زیر لیست شده اند:

- انفجار فتیله 8 گرم بر متر پتن داخل لوله فولادی با مشخصات مندرج در جدول 1، باعث ایجاد بار متحرک مافوق صوت با سطح فشار متوسط شده و امواج تنشی ناشی از آن سبب تغییر فرم و رشد تناوبی ترک می‌شوند.
- این نوع شکست مشخصه‌های ویژه‌ای از جمله ایجاد علائم پلکانی در سطح شکست، تورم لبه‌های ترک و انشعاب ترک در همسایگی ناحیه متورم را دارا است.
- مدل‌سازی رشد و انشعاب ترک ناشی از تراک فتیله انفجاری در لوله با استفاده از المان چسبنده در هیچ مرجعی گزارش نشده و نوآوری این مقاله محسوب می‌شود.
- انطباق بسیار خوب نتایج شبیه‌سازی با الگوهای تغییر فرم و شکست مشاهده شده بر روی نمونه‌های آزمایشی نشانگر مدل-سازی مناسب و بکارگیری مقادیر صحیح پارامترهای متعدد مربوط به خواص مکانیکی و همچنین روش حل می‌باشد.

5- فهرست علائم

A, B	پارامترهای جانسون – کوک (MPa)
C	پارامتر جانسون - کوک
N	پارامتر جانسون - کوک
P_1	فشار اولیه (MPa)
p_2	فشار ماکزیمم (MPa)
P_3	فشار پس از شاک (MPa)
t	متغیر زمان (sec)
t_d	زمان مورد نیاز رسیدن جبهه انفجار به مکان x (sec)
T	فاکتور کاهش نمایی (sec)
σ_{flow}	تنش پلاستیک (MPa)
ε_{eff}^{p}	کرنش پلاستیک موثر
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش مرجع (sec^{-1})
$\dot{\varepsilon}_{eff}^{p}$	نرخ کرنش پلاستیک (sec^{-1})

6- مراجع

[1] M. Mirzaei, *Finite element analysis of deformation and fracture of cylindrical tubes under internal moving pressures*, David Moratal (Editor), *Finite element analysis*, pp. 978-953, INTech, chapter 21, 2010.
[2] J. Zhou, Z. Deng, T. Liu, X. Hou, Elastic structural response of prismatic metal sandwich tubes to internal moving pressure loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 11, pp. 2354-2371, 2009.
[3] S.-C. Tang, Dynamic response of a tube under moving pressure, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 91, No. 5, pp. 97-122, 1965.
[4] H. Reismann, Response of a pre-stressed cylindrical shell to moving pressure load, *Proceeding of Eighth Midwest Mechanics Conference*, Pergamon, New York, 1965.
[5] T. Simkins, Amplification of flexural waves in gun tubes, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 172, No. 2, pp. 145-154, 1994.
[6] W. Beltman, J. Shepherd, Linear elastic response of tubes to internal detonation loading, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252, No. 4, pp. 617-655, 2002.
[7] M. Mirzaei, H. Biglari, 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, No. 7, pp. 531-539, 2006.
[8] M. Mirzaei, On amplification of stress waves in cylindrical tubes under internal dynamic pressures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 8, pp. 1292-1303, 2008.
[9] H. Hu, H. Hamidzadeh, Analytical solutions of structural response of cylindrical shells subjected to detonation loading, *Proceeding of ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* , Denver, Colorado, USA, November 11–17, 2011.
[10] M. Mirzaei, Vibrational response of thin tubes to sequential moving pressures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 59, No. 1, pp. 44-54, 2012.
[11] M. Mirzaei, M. T. Asadi, R. Akbari, On vibrational behavior of pulse detonation engine tubes, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 47, No. 12, pp. 177-190, 2015.
[12] J. W. Price, An acetylene cylinder explosion: A most probable cause analysis, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 4, pp. 705-715, 2006.
[13] D. Goto, R. Becker, T. Orzechowski, H. Springer, A. Sunwoo, C. Syn, Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 12, pp. 1547-1556, 2008.
[14] O. Soto, J. Baum, R. Löhner, An efficient fluid–solid coupled finite element scheme for weapon fragmentation simulations, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 3, pp. 549-564, 2010.
[15] T. W. Chao, *Gaseous detonation-driven fracture of tubes*, PhD Thesis, California Institute of Technology, 2004.
[16] M. Mirzaei, R. Karimi, Crack growth analysis for a cylindrical shell under dynamic loading, *Proceeding of The 11th International Conference on Pressure Vessel Technology*, Vancouver, Canada, July 23–27, 2006.
[17] F. Cirak, R. Deiterding, S. P. Mauch, Large-scale fluid–structure interaction simulation of viscoplastic and fracturing thin-shells subjected to shocks and detonations, *Computers & Structures*, Vol. 85, No. 11, pp. 1049-1065, 2007.
[18] J.-H. Song, T. Belytschko, Dynamic fracture of shells subjected to impulsive loads, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 76, No. 5, pp. 051301, 2009.
[19] C. Gato, Detonation-driven fracture in thin shell structures: Numerical studies, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 12, pp. 3741-3753, 2010.

[20] K. Wang, P. Lea, C. Farhat, A computational framework for the simulation of high-speed multi-material fluid–structure interaction problems with dynamic fracture, *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* Vol. 104, No. 7, pp. 585-623, 2015.

[21] M. Mirzaei, Failure analysis of an exploded gas cylinder, *Engineering Failure Analysis,* Vol. 15, No. 7, pp. 820-834, 2008.

[22] M. Mirzaei, A. Harandi, R. Karimi, Finite element analysis of deformation and fracture of an exploded gas cylinder, *Engineering Failure Analysis,* Vol. 16, No. 5, pp. 1607-1615, 2009.

[23] M. Mirzaei, M. Najafi, H. Niasari, Experimental and numerical analysis of dynamic rupture of steel pipes under internal high-speed moving pressures, *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 85, pp. 27-36, 2015.

[24] M. Mirzaei, M. Malekan, E. Sheibani, Failure analysis and finite element simulation of deformation and fracture of an exploded CNG fuel tank, *Engineering Failure Analysis,* Vol. 30, No. 6, pp. 91-98, 2013.

[25] M. Naitoh, F. Kasahara, T. Mitsuhashi, I. Ohshima, Analysis on pipe rupture of steam condensing line at Hamaoka-1,(I) Accumulation of non-condensable gas in a pipe, *Journal of nuclear science and technology,* Vol. 40, No. 12, pp. 1032-1040, 2003.