

بررسی عددی شکست استوانه شیاردار تحت اثر بار انفجار داخلی با استفاده از روش CLE

جواد اکبردوست *

دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی مکانیک

(تاریخ وصول: ۸۷/۱۱/۲، تاریخ پذیرش: ۸۸/۳/۵)

چکیده

هنگامی که ماده‌ی منفجره‌ی داخلی پوستره‌ی استوانه‌ای منفجر می‌شود، انرژی زیادی به طور ناگهانی آزاد می‌کند که سبب شکسته شدن پوسته به تکه‌هایی (ترکش‌هایی) با ابعاد و اندازه‌های مختلف می‌شود. برای کنترل ابعاد و شکل ترکشها، روش‌هایی همچون ایجاد شیار بر سطح مخزن ماده منفجره ارائه شده است. عمق، راستا، شکل و فاصله بین شیارها از جمله عوامل مؤثر در کنترل شکست استوانه‌ها می‌باشد. به منظور بررسی شکست با توجه به پیچیده بودن، پرهزینه و خطرناک بودن پدیده‌ی انفجار، از شبیه سازی عددی استفاده شده است. در این مقاله پس از بررسی شبیه سازی شکست استوانه تحت اثر بار انفجاری، به بررسی تأثیر چندین چیدمان شیار با عمق‌های متفاوت در فرآیند ایجاد ترکش در استوانه‌ها پرداخته شده است. برای شبیه سازی عددی، از روش حل صریح و نرم افزار LS-DYNA استفاده شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که شیارهای طولی، تأثیر بسیار بیشتری نسبت به شیارهای حلقوی در نحوه‌ی شکست استوانه شیاردار دارد، به طوری که فرآیند شکست عمدتاً توسط شیارهای طولی کنترل می‌شود. همچنین شیارهایی که در خارج پوسته استوانه‌ای ایجاد می‌شوند، کارآیی چندانی در کنترل شکست ندارند.

واژه‌های کلیدی: شبیه سازی عددی، شکست استوانه، چیدمان شیار، بار انفجاری، LS-DYNA.

۱. مقدمه

انفجار از میان ترک‌ها جریان می‌یابد و موجب خروج ماده منفجره می‌شوند. در نهایت با گسترش منافذ عبور، شکست اتفاق می‌افتد. محققین متعددی از سال ۱۹۴۰ تاکنون در مورد شکست استوانه تحت اثر بار انفجاری بحث کرده‌اند. تیلور^[۲] معیار شکستی پیشنهاد نمود که بر اساس آن، شکست

شکست در استوانه‌ها بر اثر بار انفجاری داخلی در چهار مرحله انجام می‌گیرد: [۱]؛ شکست با انبساط شعاعی پوسته شروع می‌شود، سپس پوسته از خارج ترک برداشته و ترک‌ها به سمت لایه داخلی رشد می‌کنند. گازهای حاصل از

* E-mail: javadakbaroost@gmail.com

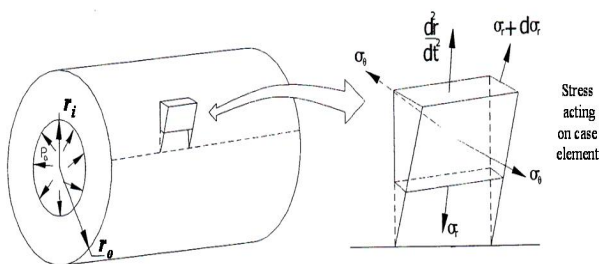
1- Taylor

* کارشناس ارشد

روزافزون علم رایانه، بسیار کارآمد می‌باشد. با توجه به دینامیکی و غیر خطی بودن پدیده انفجار، بهتر است از روش حل صریح برای شبیه سازی شکست استفاده شود. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از رابطه ی تیلور شعاع شکست برای یک نمونه ی استوانه ای محاسبه شده و سپس با استفاده از نرم افزار LS-DYNA روش شبیه سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا صحت نتایج بررسی شود. در انتها نیز به بررسی اثرات چیدمان های مختلف شیار در کنترل شکست استوانه پرداخته می‌شود.

۲. محاسبه ی شعاع شکست با استفاده از معیار تیلور

بر اثر اعمال موج فشاری حاصل از انفجار، تنش محیطی فشاری در پوسته ایجاد می‌شود. هنگامی که موج فشاری تنش، به سطح بیرونی می‌رسد، به صورت کششی باز می‌گردد [۱]. فرضیه ی تیلور بر این اساس استوار است که شکست کامل زمانی اتفاق می‌افتد که ناحیه ی فشاری از بین رفته و در نتیجه ترکها می‌توانند به سطح داخلی نفوذ کنند و شکست کامل به وجود آید. ترکهای شعاعی فقط در ناحیه تنش کششی شروع شده و نمی‌توانند به داخل ناحیه فشاری حرکت نمایند. در نتیجه شکست در پوسته، زمانی رخ می‌دهد که تنش محیطی در سرتاسر پوسته کششی باشد. تیلور برای محاسبه ی شکست، یک روش ریاضی اصلاح شده گسترش داد. پوسته انفجاری و المان شعاعی جدا شده از آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار پوسته با بزرگ نمایی المان شعاعی [۱].

معادله حرکت المان را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\bar{r}} + \frac{\partial \sigma_r}{\partial \bar{r}} = \rho \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} \quad (1)$$

در رابطه ی فوق σ_r و σ_θ به ترتیب تنش شعاعی و محیطی، \bar{r} شعاع لحظه ای، t زمان و ρ چگالی جسم می‌باشد. همچنین رابطه ی $\frac{d^2 \bar{r}}{dt^2}$ شتاب المان پوسته را بیان می‌کند. با فرض اینکه حجم ماده تغییر نمی‌کند،

نهایی بدنه پوسته ناشی از گسترش شعاعی ترک است و مقدار تنش نرمال در شکست اثر بیشتری دارد، در معیار تیلور، عمق ترک تابعی از تنش تسلیم، ضخامت پوسته و فشار انفجار است. هوگات و ریچت^۱ [۳] فرض کردند که شکست بر اثر تنش برشی اتفاق می‌افتد و سپس با استفاده از روشی مشابه تیلور فشار مؤثر لازم جهت تسلیم پلاستیک و همچنین شعاع تسلیم پلاستیک برای هر لحظه از انبساط را محاسبه نمودند. ایوانف^۲ [۴] برای مواد ویسکوالاستو-پلاستیک یک معیار انرژی پیشنهاد کرد. او فرض نمود که انرژی شروع ترک و رشد آن برابر انرژی کرنش الاستیک رها شده از برداشتن امواج الاستیک است. معیار او بر اساس کرنش شکست و نرخ آن می‌باشد، زیرا شکست های قابل توجه (یا ماکرو شکست ها) در اثر شکل گیری، رشد و همگرا شدن آسیب های ریز بوجود می‌آید. در بین معیارهای ذکر شده، بیشتر محققین از معیار تیلور جهت بررسی شکست استوانه استفاده می‌کنند [۵].

از طرف دیگر، ترکش های ایجاد شده، دارای ابعاد و اندازه های متفاوتی هستند. ابعاد و اندازه های مختلف ترکش، سبب پایین آمدن کارایی آنها می‌شود. ترکش های بزرگ دارای نیروی درگ بزرگ می‌باشند، لذا حین اصابت به هدف، سرعت کمتری دارند و آسیب رسانی آنها کم می‌شود. در مورد ترکش های کوچک، هرچند سرعت آنها زیاد است لیکن به دلیل جرم کم، قدرت آسیب رسانی مناسب ندارند. لذا برای بالا بردن کارایی ترکش ها نیاز به یکسان سازی ابعاد و اندازه آنها می‌باشد. اصطلاحاً به این عمل، کنترل ترکش زایی گفته می‌شود. روشهای متعددی همچون ترد کردن موضعی، استفاده از آستری^۳، ایجاد شیار بر روی سطوح پوسته، استفاده از حلقه های مسی و غیره برای کنترل ترکش زایی وجود دارد [۱]. یکی از روش های بدست آوردن ترکش هایی با شکل، ابعاد و اندازه های همسان، ایجاد شیار بر روی سطح داخلی و یا خارجی پوسته می‌باشد [۱]. بدین منظور، راستای شیارها نقش مهمی در کنترل فرآیند شکست دارد. دشتیان و همکاران [۵] در تحقیقی به بررسی اثرات شیار طولی در پوسته های استوانه ای پرداخته اند. همچنین پیرسون [۷] تحقیقات وسیعی در مورد روش کنترل برشی و بررسی شیارهای مارپیچ انجام داده است.

بررسی شکست پوسته های استوانه ای در حالت های پیچیده با استفاده از روش های تئوری، معمولاً مشکل و در برخی موارد غیرممکن است. همچنین بهتر است که استفاده از روش های تجربی (آزمایش های میدانی) به دلیل پرهزینه بودن و خطرناک بودن پدیده انفجار، به حداقل برسد. لذا استفاده از روش های عددی برای تحلیل پدیده ی شکست، با توجه به پیشرفت

1- Hoggatt-Rechet
2- Ivanov
3- Liner

(۱۰)

$$\sigma_{\theta} = \sigma_y - P_a + \left[\sigma_y + \rho \left(r_i \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i^2 \right) \right] \ln \frac{\bar{r}}{r_i} + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{r_i^2}{\bar{r}^2} - 1 \right) v_i^2$$

را $y = r_o - \bar{r}$ شعاع خارجی سیلندر است که تابعی از زمان می‌باشد. عمق به طرف داخل پوسته‌ی سیلندر قرار می‌دهیم، که برابر با عمق ناحیه‌ی کششی تنش محیطی می‌باشد. بنابراین:

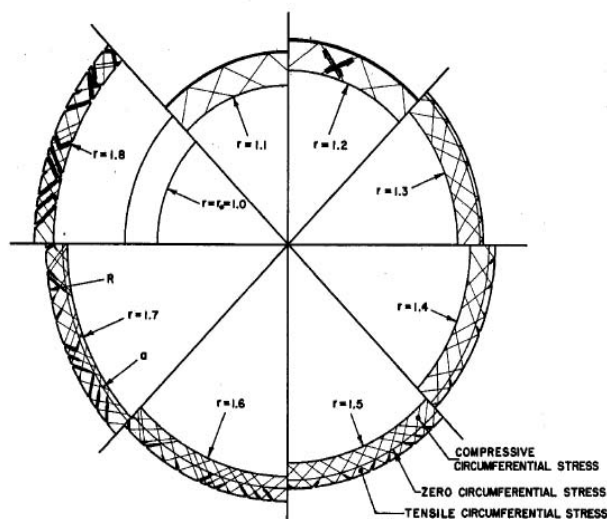
(۱۱)

$$\sigma_{\theta} = \sigma_y - P_a + \left[\sigma_y + \rho \left(r_i \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i^2 \right) \right] \ln \frac{r_o - y}{r_i} + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{r_i^2}{(r_o - y)^2} - 1 \right) v_i^2$$

در شکل (۲) پوسته منبسط شده همانند تابعی از زمان نشان داده شده است. هنگامی که $\sigma_r < 0$ و $\sigma_{\theta} < 0$ باشد، ناحیه‌ی تنش فشاری وجود دارد. به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که همزمان با انبساط پوسته منطقه تحت تنش محیطی فشاری به تدریج کوچک شده و با گسترش منطقه‌ی تحت تنش محیطی کششی از خارج به سمت داخل، رشد ترک در ناحیه کششی صورت می‌گیرد، تا وقتی که منطقه‌ی تحت فشار، حذف شده و کل ضخامت تحت تنش کششی قرار گرفته و در نهایت ترک‌ها تا شعاع داخل پیش می‌روند. با قرار دادن $y = h$ (ضخامت پوسته) در رابطه (۱۱) خواهد شد:

$$P_a = \sigma_y \quad (۱۲)$$

این عبارت، مقدار فشار مورد نیاز جهت شکست پوسته را بیان می‌کند.



شکل ۲- مکانیزم شکست در پوسته‌ی استوانه‌ای تحت بار انفجاری [۱].

می‌توان رابطه بین شعاعهای داخلی و خارجی در حالت اولیه و ثانویه را به صورت زیر نوشت:

$$\bar{r}^2 - r_i^2 = r_o^2 - r_{i0}^2 \quad (۲)$$

به طوری که زیرنویس صفر به حجم‌های اولیه در زمان صفر اشاره دارد و r_i بیانگر شعاع داخلی لحظه‌ای می‌باشد. مشتق معادله (۲) بصورت زیر می‌باشد:

$$2\bar{r} \frac{\partial \bar{r}}{\partial t} - 2r_i \frac{\partial r_i}{\partial t} = 0 \Rightarrow \bar{r} \frac{\partial \bar{r}}{\partial t} = r_i \frac{\partial r_i}{\partial t} \quad (۳)$$

و با مشتق‌گیری مجدد از رابطه‌ی (۳) به معادله زیر می‌رسیم:

$$\left(\frac{\partial \bar{r}}{\partial t} \right)^2 - \left(\frac{\partial r_i}{\partial t} \right)^2 + \bar{r} \frac{\partial^2 \bar{r}}{\partial t^2} - r_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial t^2} = 0 \quad (۴)$$

از طرفی:

$$\frac{\partial r_i}{\partial t} = v_i \quad (۵)$$

آنگاه رابطه (۴) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \bar{r}}{\partial t^2} = \frac{r_i}{\bar{r}} \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{1}{\bar{r}} v_i^2 - \frac{r_i^2}{\bar{r}^3} v_i^2 \quad (۶)$$

اگر از معیار تسلیم ترسکا استفاده شود ($\sigma_{\theta} - \sigma_r = \sigma_y$)، معادله‌ی (۱) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_y}{r} + \rho \left(\frac{r_i}{r} \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{1}{r} v_i^2 - \frac{r_i^2}{r^3} v_i^2 \right) \quad (۷)$$

که σ_y تنش تسلیم پوسته می‌باشد. سپس σ_r بعد از انتگرال‌گیری محاسبه می‌شود:

$$\sigma_r = \left[\sigma_y + \rho \left(r_i \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i^2 \right) \right] \ln \bar{r} + \frac{1}{2} \rho \frac{r_i^2}{r} v_i^2 + C \quad (۸)$$

پس از اعمال شرایط مرزی (هنگامی که $r = r_i$ است، $\sigma_r = -P_a$ می‌باشد)، می‌توان σ_r را به دست آورد:

(۹)

$$\sigma_r + P_a = \left[\sigma_y + \rho \left(r_i \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i^2 \right) \right] \ln \frac{\bar{r}}{r_i} + \left(\frac{1}{2} \rho \left(\frac{r_i^2}{r} - 1 \right) v_i^2 \right)$$

در معیار ترسکا σ_{θ} خواهد شد:

ترکیبی از چیدمان شیار مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا بتوان علاوه بر بررسی اثرات چیدمان‌های مختلف شیار، ترکیبی مناسب برای کنترل بهتر ترکشها ارائه نمود.

۳. شبیه سازی عددی شکست استوانه‌ی شیاردار

برای تحلیل عددی مسایل دینامیکی همچون انفجار از روش حل صریح^۳ استفاده می‌شود. در تکنیک‌های حل صریح از دو روش لاگرانژی و اویلری بهره می‌گیرند. در روش لاگرانژی شبکه بندی همراه ماده حرکت کرده و دچار تغییر فرم می‌گردد، لذا در مسایلی که تغییر فرمهای بسیار شدید وجود دارد، حل ناپایدار و واگرا می‌گردد. مشکل دیگر این روش مسأله پیچ خوردگی^۴ المان‌هاست که بدلیل تغییر فرم زیاد آنها روی می‌دهد. این پیچ خوردگی المانها نیز سبب خطای شدید و واگرایی حل می‌شود. لذا از این روش بیشتر در بررسی مسایل سازه‌ای با تغییر فرمهای نه چندان زیاد استفاده می‌شود.

در روش اویلری برخلاف روش لاگرانژی شبکه بندی ثابت است و فقط مواد حرکت می‌کنند. به دلیل حرکت مواد در بین شبکه‌ها، تعریف شرایط مرزی بر روی مرزها، یکی از مشکلات عمده این روش می‌باشد. از طرفی برای بررسی پارامترها نیاز به شبکه بندی اضافی برای عبور مواد می‌باشد که خود باعث افزایش تعداد المانها و افزایش مدت زمان اجرای برنامه می‌شود. البته این روش به دلیل عدم حرکت شبکه بندی، معضلات روش لاگرانژی را ندارد، لذا برای مسایل سیالاتی مناسب می‌باشد. از ترکیب این دو روش، روش‌های دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد که تا حدودی معایب دو روش لاگرانژی و اویلری را برطرف کرده است: یکی روش لاگرانژی- اویلری دلخواه (ALE)^۵ و دیگری لاگرانژی- اویلری کوپل شده (CLE)^۶. در روش ALE شبکه بندی انعطاف پذیر بوده و می‌تواند حرکت کند و یا ثابت بماند. در روش CLE دو نوع شبکه بندی لاگرانژی و اویلری وجود دارد، به این ترتیب که موادی که رفتار سیال گونه دارند با شبکه بندی اویلری مدل می‌شوند و موادی که تغییر شکل متوسط و رفتار جامد گونه‌ای دارند، با شبکه بندی لاگرانژی مدل می‌شوند. سپس بین این دو شبکه بندی اندرکنشی در نظر می‌گیرند. یکی از محاسن این روش این است که نیاز به تعریف تماس نیست و با استفاده از این روش می‌توان تماس بین مواد را مدل کرد.

فرض اینکه محصولات انفجار از انبساط ایزونتروپیک^۱ پیروی می‌کنند، می‌توان فشار محصولات انفجار را در حالت ثانویه، محاسبه کرد [۱]:

$$P_a = P_e \left(r_i / r_{i0} \right)^{-2\gamma} \quad (13)$$

P_e فشار مؤثر حاصل از انفجار بر روی سطح داخلی در حالت اولیه می‌باشد. P_a فشار عمل‌کننده بر سطح داخلی پوسته بوده و γ نمای انبساط ایزونتروپیک گاز می‌باشد. ثابت ایزونتروپیک و فشار مؤثر P_e برای TNT به ترتیب، $3/4$ و 28 GPa است [۱]. با ترکیب دو رابطه (۱۲) و (۱۳) می‌توان شعاع داخلی پوسته را در لحظه‌ی شکست نوشت:

$$\left. \begin{aligned} P_a &= \sigma_y \\ P_a &= P_e \left(r_i / r_{i0} \right)^{-2\gamma} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r_{if} = r_{i0} \left(\frac{P_e}{\sigma_y} \right)^{1/2\gamma} \quad (14)$$

حال با استفاده از رابطه‌ی ۲ می‌توان شعاع خارجی در لحظه شکست را نیز به دست آورد:

$$r_{of} = \sqrt{r_{if}^2 + r_0^2 - r_i^2} \quad (15)$$

رابطه دیگری که در شکست پوسته‌ها بسیار کارآمد و کاربردی است، رابطه‌ی سرعت گارنی^۲ می‌باشد. گارنی در سال ۱۹۴۳ رابطه‌ای تجربی برای سرعت ترکشها ارائه کرد [۸]:

$$V_0 = \sqrt{2E} \left\{ \frac{C}{M} / \left[\left(1 + \frac{D_e}{2L} \right) \left(1 + \frac{C}{2M} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (16)$$

در این رابطه V_0 سرعت ترکش، $\sqrt{2E}$ ثابت گارنی، C جرم ماده منفجره، M جرم پوسته، D_e قطر ماده منفجره و L طول پوسته می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد، تنش محیطی (و در پی آن کرنش محیطی) نقش اساسی در شکست استوانه ایجاد می‌کند. لذا در شکست طبیعی استوانه ترکشها اغلب میله‌ای شکل (سوزنی شکل) هستند [۱]. از طرفی چنانچه کوچکترین شیار در راستای محور استوانه وجود داشته باشد، رشد ترک در محل شیار بوده و ترکشها به شکل میله‌های بلند در می‌آیند [۵]. در ادامه

3- Explicit Method
4- Tangling
5- Arbitrary Lagrangian-Eulerian
6- Coupled Lagrangian - Eulerian

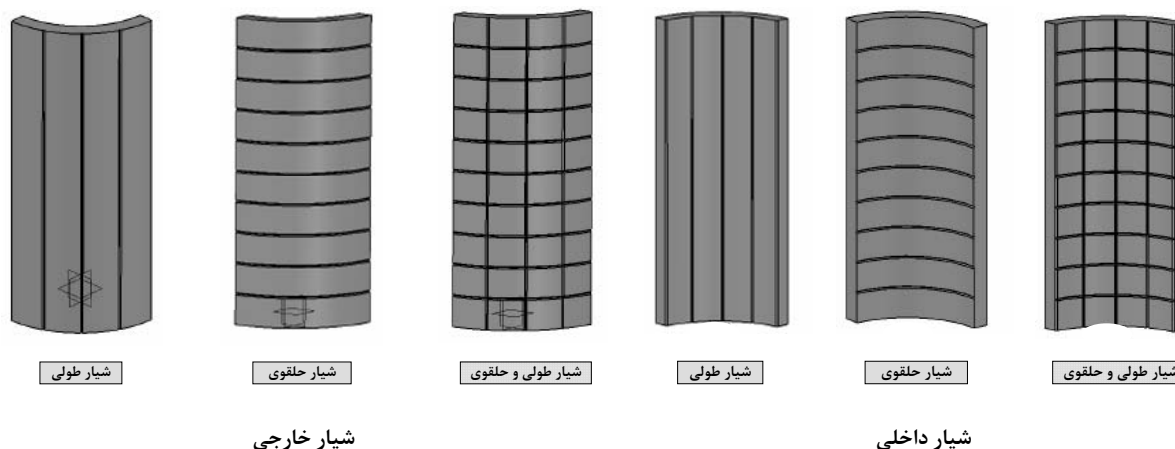
1- Isentropic
2- Gurney

اثرات شیار ۶ چیدمان مختلف در نظر گرفته شده است تا اثر هر چیدمان بررسی شود. چیدمان‌ها نیز در ۵ عمق متفاوت لحاظ شده‌اند تا اثرات عمق نیز بررسی گردد. در جدول (۱) چیدمان‌های شیار آورده شده است. شکل (۳) نمایش شماتیکی از چیدمان‌های شیارهای ایجاد شده در استوانه‌ها را نشان می‌دهد. استوانه‌های مورد تحلیل، دارای قطر داخلی ۱۲۳ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۴۸ میلی‌متر و طول ۲۶۰ میلی‌متر بوده و از جنس فولاد C60 می‌باشد. همچنین جنس خرج به کار رفته در این تحقیق TNT می‌باشد. در چیدمان‌ها تعداد شیارهای حلقوی ۱۰ ردیف (هرکدام به فاصله ۲۴/۱ میلی‌متر تقریباً دو برابر ضخامت پوسته) و تعداد شیارهای طولی ۱۶ ردیف می‌باشد. در ادامه روش شبیه‌سازی شرح داده خواهد شد.

برای تحلیل انفجار در استوانه با توجه به تغییر شکل‌های بسیار زیاد ماده منفجره و وجود المان‌های کوچک (بمنظور شبکه بندی منظم‌تر) نمی‌توان از روش لاگرانژی استفاده کرد، چرا که دچار ناپایداری در حل می‌شود. لذا شبیه سازی ماده منفجره به صورت شبکه بندی اولبری انجام شده است. با توجه به تغییر شکل‌های نه چندان زیاد المان‌های پوسته استوانه‌ای، می‌توان آنرا به صورت شبکه بندی لاگرانژی تعریف کرد. بنابراین برای شبیه سازی از روش اولبری-لاگرانژی کویل شده در نرم افزار LS-DYNA استفاده شده است. در ابتدا استوانه‌ای با شعاع داخلی ۶۱/۵ mm، شعاع خارجی ۷۴ mm و طول ۲۵۰ mm از جنس فولاد C60 که داخل آن با TNT پر شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بتوان صحت نتایج را بررسی نمود. سپس برای بررسی

جدول ۱- چیدمان‌های مختلف در نظر گرفته شده برای شیارهای طولی و حلقوی.

۸	۶/۵	۵	۳	۱/۵	شیار طولی به عمق (mm)	شیار داخلی
۸	۶/۵	۵	۳	۱/۵	شیار حلقوی به عمق (mm)	
۸	۶/۵	۵	۳	۱/۵	شیار طولی به عمق ۱/۵ mm، به همراه شیار حلقوی به عمق (mm)	
۸	۶/۵	۵	۳	۱/۵	شیار طولی به عمق (mm)	شیار خارجی
۸	۶/۵	۵	۳	۱/۵	شیار حلقوی به عمق (mm)	
۸	۶/۵	۵	۳	۱/۵	شیار طولی به عمق ۱/۵ mm، به همراه شیار حلقوی به عمق (mm)	



شکل ۳- شکل شماتیکی از چیدمان‌های شیار.

۳-۱- مدل مادی و معادلات حالت

برای مدل سازی رفتار مواد منفجره از مدل های مادی سوزش استفاده می شود [۹]. همچنین برای مواد منفجره از معادله حالت جونز- ویلکنز- لی^۳ (رابطه ۲۰) استفاده می شود [۹]:

(۲۰)

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

که ω , A , B , R_1 و R_2 پارامترهای ورودی هستند که توسط کاربر تعریف می شوند. این معادله حالت معمولاً برای تعیین فشار محصولات شدید انفجاری که برای شتاب دادن به فلزات بکار می روند، استفاده می شود. در جدول (۳) ضرایب مربوط به مدل مادی و معادله حالت برای مواد منفجره TNT آورده شده است:

جدول ۲- ضرایب مدل مادی و معادله حالت برای فولاد C60 [۱۱].

	A(Mbar)	B(Mbar)	n	c	m
Johnson-Cook Mat	۰/۲۴۵	۰/۸۵۲	۰/۳۴	۰/۰۲۲	۱
	C (m/s)	S ₁	S ₂	S ₃	γ
Gruniesen EOS	۳۶۰۰	S ₁	۰	۰	۱/۷

جدول ۳- ضرایب مدل مادی و معادله حالت برای ماده منفجره TNT [۱۲].

	ρ (g/cm ³)	D(cm/ μ s)	P _{CJ} (MBar)		
High Explosive Burn Mat	۱/۶۳	۶۹۳۰	۰/۲۱		
	A(Mba)	B(Mba)	R1	R2	ω
JWL EOS	۳/۷۳	۰/۰۳۷	۴/۱۵	۰/۹۵	۰/۳

در بررسی پدیده های گوناگون برای مدل سازی رفتار مواد تحت بارگذاری های مختلف نیاز به مدلهای مادی مناسب می باشد. همچنین در برخی از پدیده های هیدرودینامیکی با توجه به مدل مادی برای ارتباط دادن حجم با فشار بایستی معادلات حالت نیز تعریف شود. در مورد تحلیل پوسته های استوانه ای، از آنجا که پوسته فلزی تحت اثر نرخ کرنش بالا قرار دارد، یک مدل مادی مناسب جهت مدلسازی رفتار آن مدل جانسون-کوک^۱ می باشد. مدل جانسون-کوک تنش سیلان ماده را به صورت تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و دما بیان می کند [۹]:

$$\sigma = \left[A + B \bar{\epsilon}^n \right] \left[l + C \ln \epsilon^* \right] \left[l - T^* M \right] \quad (۱۷)$$

که در آن A , B , C , n , m ثابتهای مادی هستند و $\bar{\epsilon}^n$ کرنش پلاستیک مؤثر، ϵ^* نرخ کرنش بدون بعد و T^* دمای بدون بعد متناظر است. همچنین برای ارتباط دادن حجم و فشار در مواد جامدی که تحت اثر بار انفجاری هستند معادله حالت گرونایزن^۲ (رابطه ۱۸) استفاده می شود [۱۰]:

(۱۸)

$$P = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

در معادله فوق S_1 , S_2 و S_3 اولین، دومین و سومین ضرایب شیب منحنی $U_s - U_p$ (U_s سرعت موج شوک و U_p سرعت ذره می باشد)، انرژی داخلی، V حجم وابسته، a ضریب تصحیح حجمی، γ_0 ضریب گرونایزن و C سرعت صوت حجمی می باشد. مقدار μ نیز برابر است با:

$$\mu = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) - 1 \quad (۱۹)$$

که ρ چگالی جاری و ρ_0 چگالی اولیه می باشد. در جدول (۲) ضرایب مربوط به مدل مادی و معادله حالت برای فولاد C60 آورده شده است:

3- Jones-Wilkense-Lee

1- Johnson-Cook
2- Gruniesen

۳-۲- شرایط مرزی

به سبب وجود تقارن در دو محور و به منظور کاهش حجم محاسبات، از یک چهارم مدل برای تحلیل استفاده شده است. با توجه به استفاده از شبکه بندی اوپلری محیط هوا نیز بایستی در مدلسازی و تحلیل در نظر گرفته شود. در شکل (۴) مدل هندسی استوانه به همراه ماده منفجره و هوا، نقطه انفجار و شرایط مرزی نشان داده شده است. در حالتی که استوانه شیاردار مورد بررسی قرار گرفته است، شرایط مرزی و نقطه شروع انفجار همانند حالت بدون شیار می‌باشد. شکل (۵) مدل مش خورده ای از یک نوع چیدمان شیار را نشان می‌دهد.

پس از اعمال تعریف مدل‌های مادی، معادلات حالت، شرایط مرزی و نقطه شروع انفجار (همانند شکل ۴)، تحلیل برای مدت زمان ۲۰۰ μs پس از شروع انفجار انجام شده است. تعداد المان‌ها برای حالت استوانه بدون شیار در حدود ۲۴۹۹۰۰ المان و برای استوانه شیاردار تعداد المان‌ها برای چیدمان‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. مدت زمان اجرای تحلیل در سیستمی با مشخصات CPU:Quad 2.4GHz,Ram:2GB بسته به تعداد المان‌ها بین ۳ تا ۲۰ ساعت بطول انجامیده است. در ادامه نتایج مشاهده و بررسی خواهد شد.

همان‌طور که اشاره شد، برای ماده منفجره از شبکه بندی اوپلری استفاده شده است، لذا برای حرکت ماده منفجره در مرز آن نیاز به ماده‌ای دیگر می‌باشد. به همین منظور از ماده هوا استفاده شده است. برای هوا مدل مادی خنثی^۱ و معادله حالت چندجمله‌ای خطی در نظر گرفته شده است [۹]:

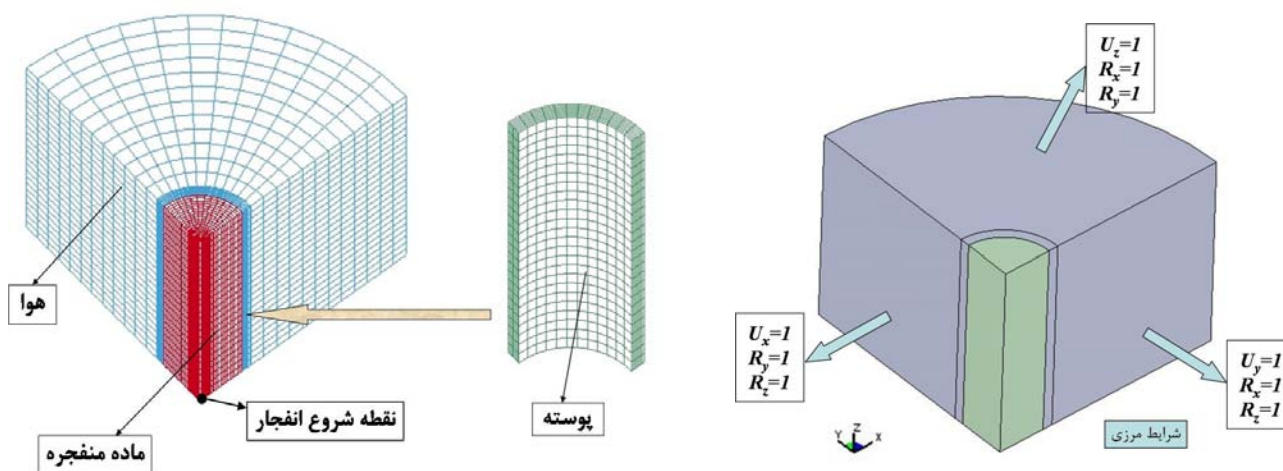
(۲۱)

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

در این رابطه C_0 تا C_6 پارامترهای ورودی هستند و μ همانند رابطه (۱۹) تعیین می‌شود. در جدول (۴) ضرایب مربوط به هوا آورده شده است:

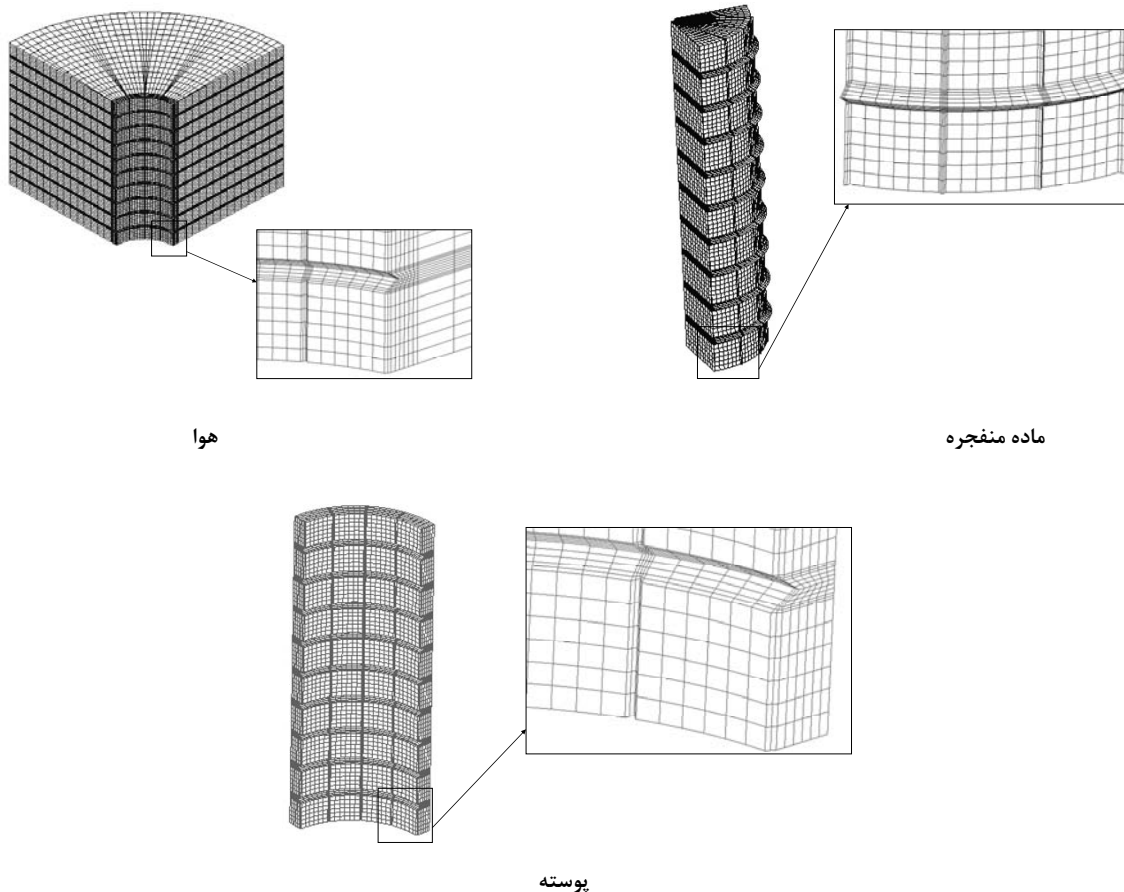
جدول ۴- ضرایب مدل مادی و معادله حالت برای هوا [۱۳].

NULL Mat	$\rho(\text{g/cm}^3)$				
	۰/۰۰۱۲۹				
Linear Polynomial EOS	C_0	C_1, C_2, C_3	C_4, C_5	C_6	E_0
	-۱e-۶	۰	۰/۴	۰	۲/۵e-۶



شکل ۴- هندسه و شبکه بندی مدل، نقطه شروع انفجار و شرایط مرزی

1- Null



شکل ۵- هندسه و شبکه بندی یک نمونه استوانه شیاردار .

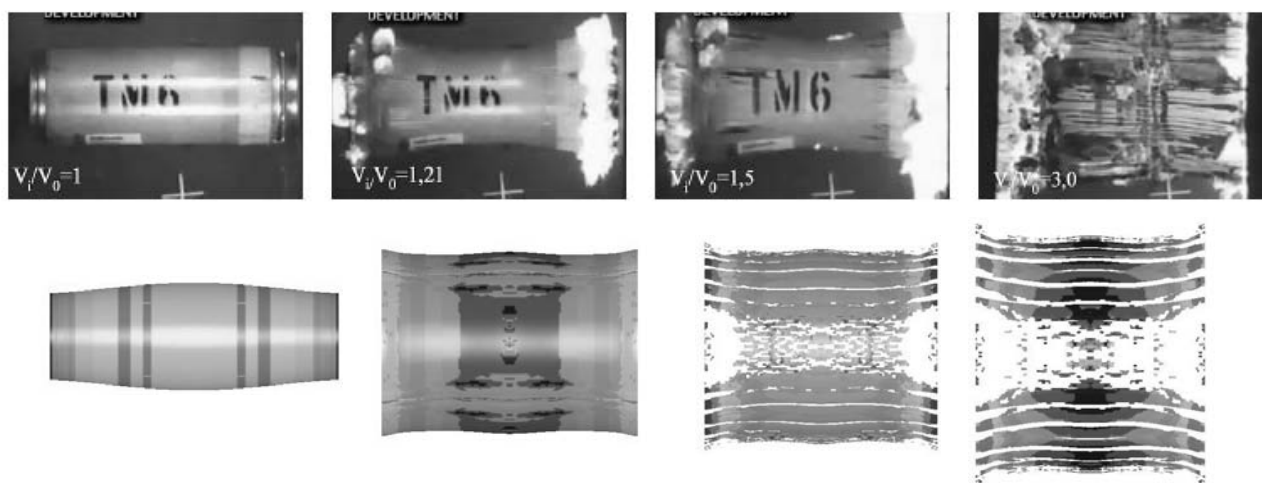
۴- مشاهده و بررسی نتایج

خطا کم می‌باشد و از این روش شبیه‌سازی که پیچیدگی‌های مخصوص به پدیده انفجار در آن وجود دارد، می‌توان برای بررسی اثرات شیار استفاده کرد. پس از بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی استوانه بدون شیار، در شکل‌های (۷) الی (۱۲) ترکش‌های حاصل از استوانه با چیدمان‌های گوناگون شیار به همراه کانتور سرعت ترکش‌ها نشان داده شده است. اثرات شیار بر روی سرعت ترکش‌ها علاوه بر نحوه شکست استوانه، از پارامترهای مهم این پژوهش می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۵) ذکر شده است، مقدار سرعت برای استوانه بدون شیار 1306 m/s بوده و میزان تغییرات آن برای چیدمان‌های شیار مورد توجه می‌باشد. در شکل (۱۳) نمودار سرعت ترکش‌ها بر حسب عمق شیار برای چیدمان‌های شیار که در جدول (۱)

در شکل (۶) مقایسه‌ای بین شکل ترکش‌ها در دو حالت آزمایش (مرجع [۱۴]) و شبیه‌سازی استوانه بدون شیار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نحوه شکست و شکل نهایی ترکش‌ها در دو حالت تقریباً یکسان می‌باشد که این امر مؤید صحت نتایج از لحاظ شکل ظاهری می‌باشد. همچنین در جدول (۵) نتایج حاصل از روابط گارنی و تیلور و نتایج حاصل از تحلیل آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج رابطه تیلور برای T_{if} و T_{of} ۲ درصد و در مقایسه رابطه گارنی نتایج شبیه‌سازی معادل $5/3$ درصد خطای نسبی دارد. بنابراین نتایج حاصل از تحلیل با نتایج تئوری تطابق خوبی داشته و مقدار

محاسبه سرعت ترکش‌ها در حالت شیاردار می‌توان از حالت بدون شیار استفاده کرد. این نکته در مورد هندسه‌های پیچیده کاربرد بسیار مهمی پیدا می‌کند.

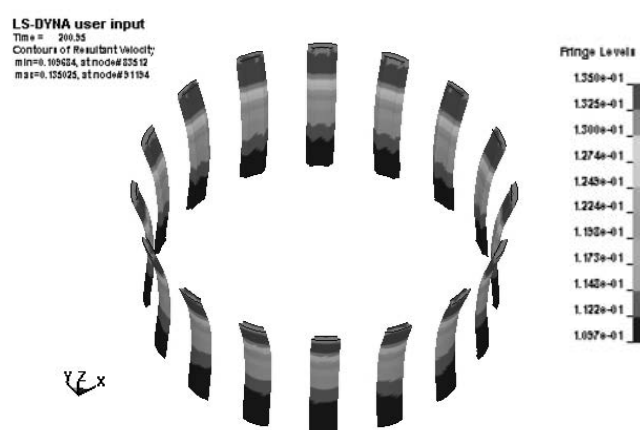
آورده شده‌اند، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، هر چند سرعت ترکش‌ها به چیدمان و عمق شیار بستگی دارد، اما این وابستگی چندان زیاد نبوده و می‌توان آن را در نظر نگرفت. بعبارت دیگر برای



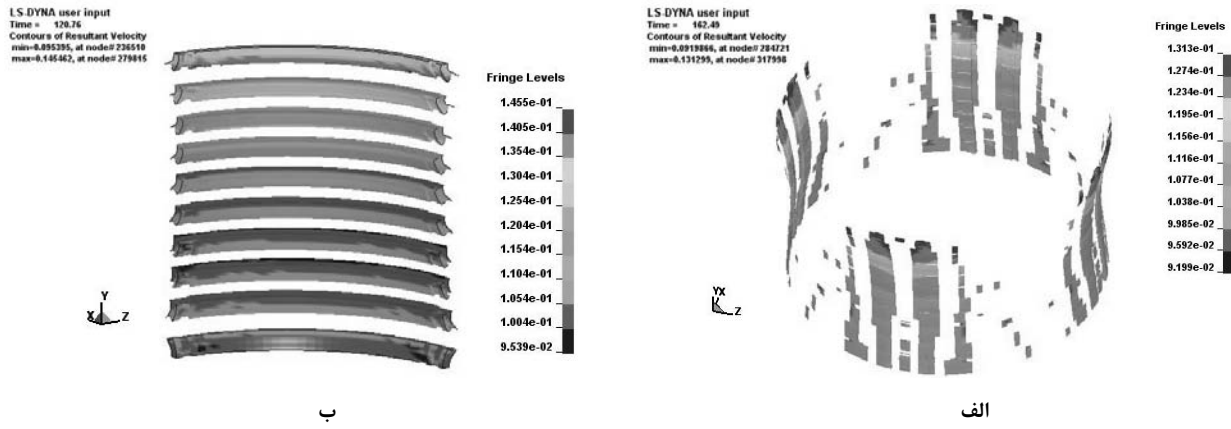
شکل ۶- مقایسه ترکش‌های حاصل از تست [۱۴] با نتایج حاصل از شبیه‌سازی.

جدول ۵- ابعاد و خواص مورد نیاز برای محاسبه شعاع شکست و سرعت ترکش‌ها [۱۵] و نتایج تئوری و شبیه‌سازی.

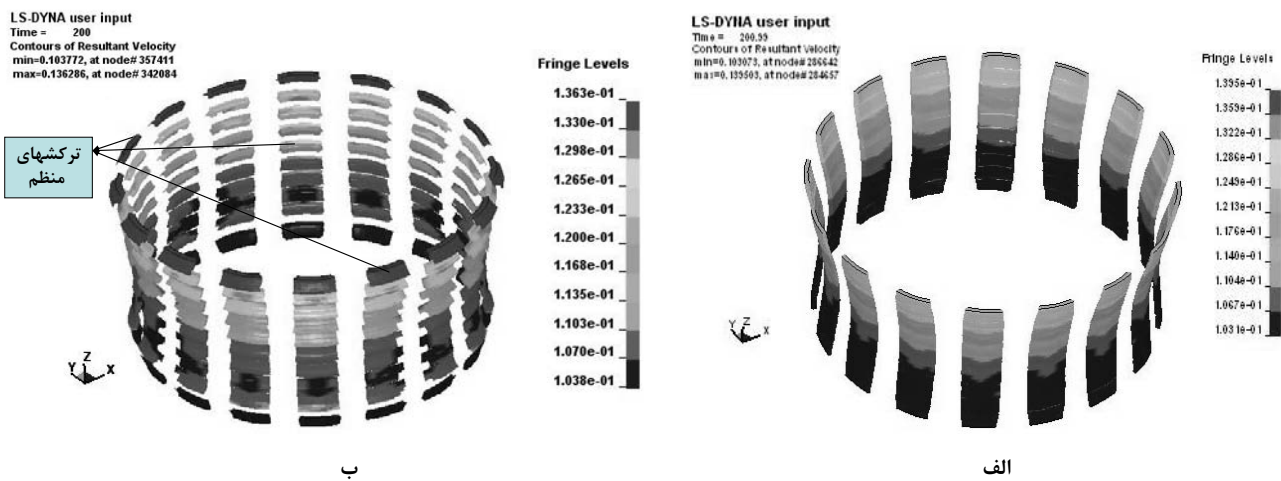
$r_i(m)$	0.0615	$\rho_c(kg/m^3)$	7800	$\rho_{HE}(kg/m^3)$	1630
$r_o(m)$	0.074	$\delta_y(MPa)$	245	γ	3
$L(m)$	0.25	$(m/s)\sqrt{2E}$	2370	$P_c(MPa)$	21000
نتایج تئوری و شبیه‌سازی					
$r_o(m)$ (Taylor)	0.140816	$r_i(m)$ (Taylor)	0.134667	$V(m/s)$ (Gurney)	1306.01
$r_o(m)$ (Simulation)	0.14219	$r_i(m)$ (Simulation)	0.13675	$V(m/s)$ (Simulation)	1375.1
Error	2%	Error	2%	Error	5.3%



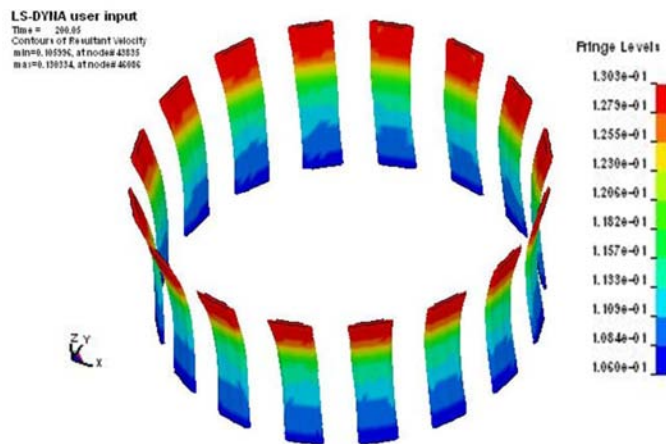
شکل ۷- ترکش‌های استوانه با شیار داخلی طولی همراه کانتور سرعت.



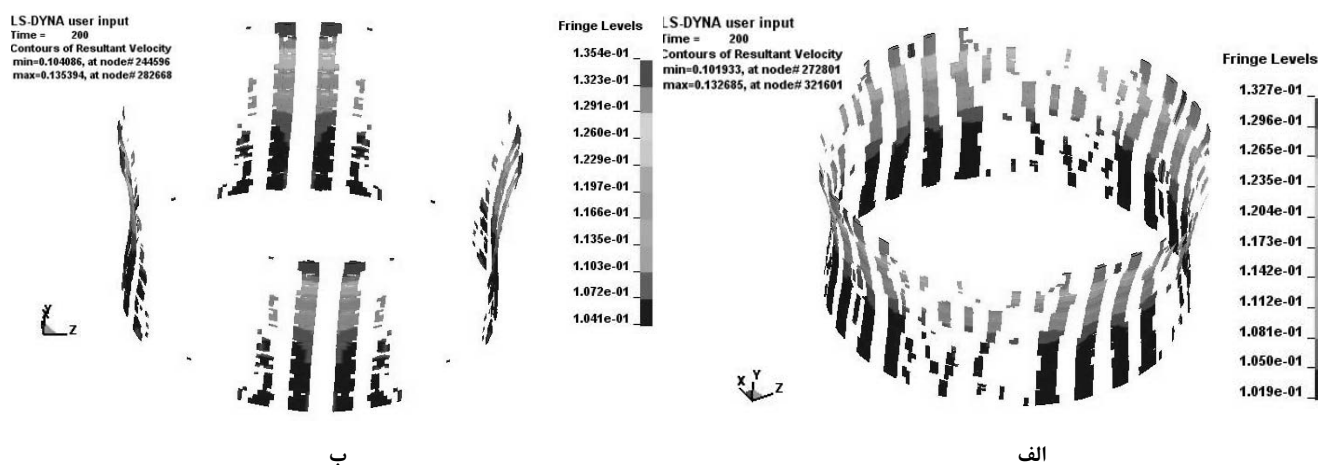
شکل ۸- ترکش‌های استوانه با شیار داخلی حلقوی به عمق الف) ۳mm، ب) ۶/۵ mm.



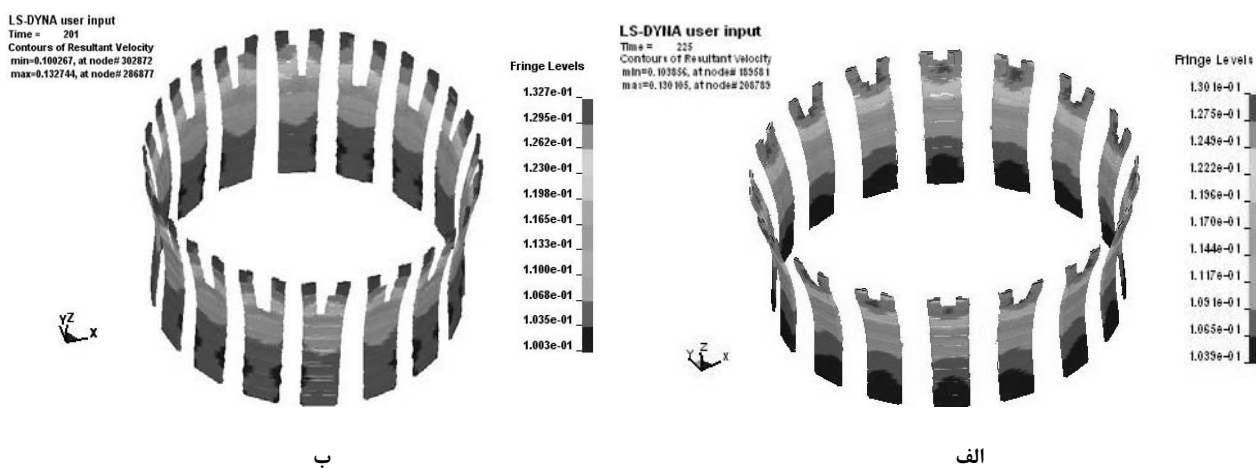
شکل ۹- ترکش‌های استوانه با شیار داخلی طولی به عمق ۱/۵ mm و شیار حلقوی به عمق الف) ۳mm، ب) ۶/۵ mm.



شکل ۱۰- ترکش‌های استوانه با شیار خارجی طولی.



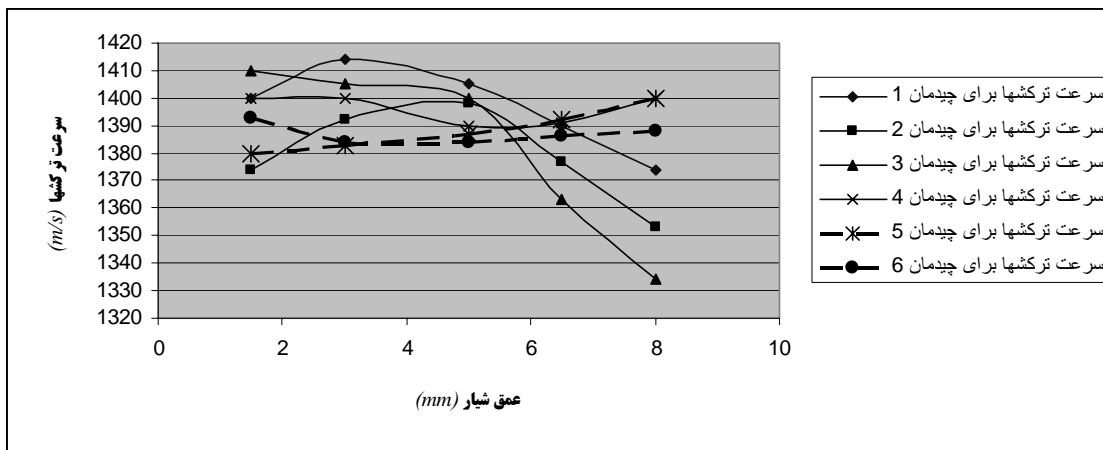
شکل ۱۱- ترکش‌های استوانه با شیار خارجی حلقوی به عمق الف) ۱/۵mm، ب) ۶/۵ mm.



شکل ۱۲- ترکش‌های استوانه با شیار خارجی طولی به عمق ۱/۵ mm و شیار حلقوی به عمق الف) ۱/۵mm، ب) ۶/۵ mm.

است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، هر چند سرعت ترکش‌ها به چیدمان و عمق شیار بستگی دارد، اما این وابستگی چندان زیاد نبوده و می‌توان آن را در نظر نگرفت. بعبارت دیگر برای محاسبه سرعت ترکش‌ها در حالت شیاردار می‌توان از حالت بدون شیار استفاده کرد. این نکته در مورد هندسه‌های پیچیده کاربرد بسیار مهمی پیدا می‌کند.

اثرات شیار بر روی سرعت ترکش‌ها علاوه بر نحوه شکست استوانه، از پارامترهای مهم این پژوهش می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۵) ذکر شده است، مقدار سرعت برای استوانه بدون شیار 1306 m/s بوده و میزان تغییرات آن برای چیدمان‌های شیار مورد توجه می‌باشد. در شکل (۱۳) نمودار سرعت ترکش‌ها بر حسب عمق شیار برای چیدمان‌های شیاری که در جدول (۱) آورده شده‌اند، نشان داده شده



شکل ۱۳- نمودار سرعت ترکش بر اساس عمق شیار برای چیدمان‌های مختلف شیار.

تقریباً ثابت بوده و با افزایش عمق شیار سرعت ترکش‌ها نیز پس از کمی افزایش اولیه، کاهش می‌یابد (شکل ۱۳ چیدمان ۲). علت ثابت بودن تقریبی جواب‌ها، همان شکست طولی استوانه می‌باشد. به عبارت دیگر شیارهای حلقوی به عمق ۱/۵ و ۳ میلی‌متر تأثیر چندانی در کنترل شکست ندارند و شکست در راستای طولی انجام می‌پذیرد.

(ج) شیار داخلی طولی-حلقوی: همان‌طور که اشاره شد، وجود شیار طولی باعث ایجاد تمرکز تنش در راستای محیطی شده و شکست در راستای طولی استوانه را تشدید می‌کند. از طرفی شیار حلقوی نیز باعث ایجاد تمرکز تنش در راستای طولی شده و راستای شکست را به سمت شعاعی سوق می‌دهد. با ترکیب این دو اثر می‌توان شکست را برای ایجاد ترکش‌های همسان کنترل کرد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده و نتایج نشان داده شده در شکل (۹) می‌توان گفت که با وجود شیار طولی به عمق ۱/۵ میلی‌متر، شیارهای حلقوی با عمق‌های بیش از حدود ۵ میلی‌متر می‌تواند باعث ایجاد ترکش‌های همسان شود. شیارهای حلقوی با عمق‌های کمتر از ۵ میلی‌متر نمی‌توانند تمرکز تنش لازم را برای شکست در راستای حلقوی ایجاد کنند.

(د) شیار خارجی طولی: پوسته استوانه‌ای دارای شیار خارجی هنگامی که تحت اثر بار انفجاری قرار می‌گیرد، دهانه شیار زودتر از لبه‌ها تحت اثر قرار می‌گیرد و شروع به پیشروی می‌کند. همین امر باعث بسته شدن دهانه شیار می‌شود. مشابه این رفتار را می‌توان در تشکیل جت در خرج گود مشاهده کرد. در شکل (۱۴) نمونه‌ای از بسته شدن دهانه شیار مشاهده می‌شود. هنگامی که شیار ایجاد شده طولی باشد، از طرفی بخاطر مطلب اشاره شده

از طرف دیگر، با توجه به تنش‌های محاسبه شده در روابط تیلور می‌توان گفت که تنش محیطی بیشترین مقدار را نسبت به تنش‌های دیگر دارد. بنابراین تنش محیطی در شکست نقش اساسی ایفا می‌کند. از طرفی ایجاد شیار به نوعی باعث تمرکز تنش در پوسته می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که:

(الف) شیار داخلی طولی: در این چیدمان شیار، شکست در راستای شیارها اتفاق می‌افتد، چرا که تمرکز تنش حاصل از ایجاد شیار موجب تقویت تنش محیطی شده و شکست استوانه در راستای طولی را تشدید می‌کند. این مطلب در ترکش‌های نشان داده شده در شکل (۷) نیز مشاهده می‌شود.

(ب) شیار داخلی حلقوی: شیار حلقوی باعث ایجاد تمرکز تنش در راستای طولی (محور استوانه) می‌شود. لذا برای شکست در راستای شیار باید ضریب تمرکز تنش به گونه‌ای باشد که بتواند بر تنش محیطی غلبه کند. با مشاهده شکل (۸-الف) می‌توان دریافت که اثر تمرکز تنش حاصل از شیارهای مربوطه نمی‌تواند بر تنش محیطی غلبه کند و شکست در راستای طولی اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر ترکش‌ها در استوانه با شیارهای حلقوی به عمق ۳ میلی‌متر میله‌ای شکل و کنترل نشده می‌باشند. اما با افزایش عمق شیار، پوسته در راستای حلقوی ضعیف‌تر شده و تنش‌های طولی با احتساب اثر تمرکز تنش، بر تنش محیطی غلبه کرده و شکست در راستای حلقوی اتفاق می‌افتد. این مطلب را می‌توان در شکل (۸-ب) به خوبی مشاهده کرد. به عبارت دیگر ترکش‌های استوانه با عمق شیار ۶/۵ میلی‌متر به صورت حلقوی می‌باشد. همچنین، سرعت ترکش‌ها در دو عمق شیار ۱/۵ و ۳ میلی‌متر،

ترکش‌های همسان اتخاذ می‌گردد. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، ایجاد شیار روی سطوح داخلی و خارجی می‌باشد. چیدمان، سطح مقطع، عمق و راستای شیار از جمله عوامل مؤثر در کنترل شکست می‌باشد. برای بررسی شکست استوانه در اثر بار انفجاری بهتر است تا حد ممکن از تست‌های میدانی کاسته شود. لذا بایستی بتوان از روش‌های عددی (شبیه‌سازی) به طور مناسبی استفاده کرد. در تحقیق انجام شده، شبیه‌سازی شکست استوانه تحت اثر بار انفجاری مورد توجه قرار گرفت و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایش (از لحاظ شکل ترکش) و نتایج تئوری (شعاع داخلی و خارجی شکست از رابطه‌ی تیلور و سرعت ترکشها از رابطه گارنی) مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که نتایج مطابقت خوبی با هم دارند. در نتیجه می‌توان از روش شبیه‌سازی بکار برده شده در سایر مسایل مربوط به ترکش‌زایی استفاده کرد. لذا در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی تأثیر راستا و عمق شیارها روی ترکش‌زایی بررسی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که:

- شیار خارجی علی‌الخصوص شیار حلقوی در کنترل شکست تأثیر چندانی ندارد؛

- شیار داخلی حلقوی بسته به عمق شیار می‌تواند تأثیر گذار باشد؛

- شیار داخلی طولی تأثیر بسزایی در کنترل شکست دارد؛

- نکته قابل توجه این است که عمق شیار در هر چیدمانی که باشد، تأثیر چندانی در سرعت ترکش‌ها ندارد و می‌توان سرعت آنها را با سرعت ترکش‌های استوانه بدون شیار (به دست آمده از رابطه گارنی) برابر در نظر گرفت.

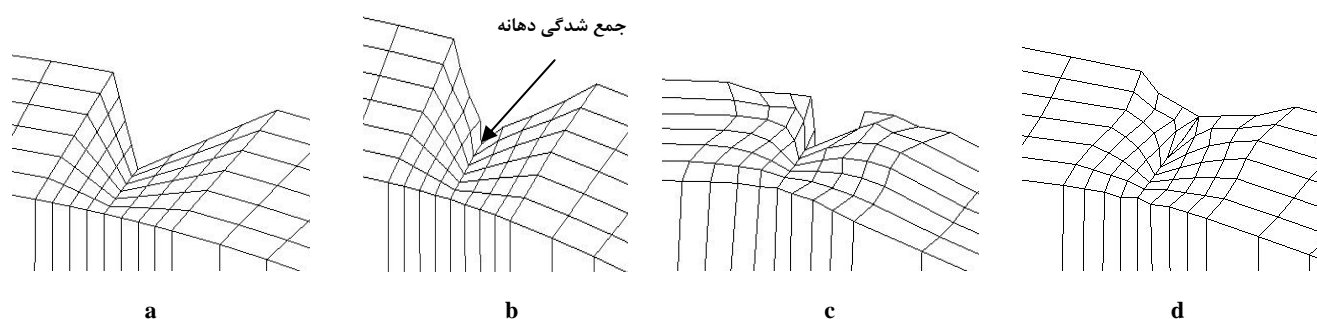
دهانه شیار شروع به جمع شدن می‌کند و از طرف دیگر انبساط شعاعی پوسته باعث باز شدگی دهانه می‌شود. در نهایت باز شدگی دهانه بر جمع شدن اولیه آن غلبه می‌کند و پوسته در راستای شیار شکسته می‌شود. این مطلب در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. سرعت ترکش‌ها نیز در این حالت تغییرات چندانی ندارند و می‌توان تغییرات را ناچیز گرفت (شکل ۱۳ چیدمان ۴).

ه) شیار خارجی حلقوی: در این چیدمان نیز پدیده بسته شدن دهانه شیار وجود دارد. با توجه به اینکه انبساط پوسته در راستای شعاعی می‌باشد و نه در راستای طولی، لذا باز شدگی دهانه شیار وجود نداشته و شکست در راستای طولی اتفاق می‌افتد. شکل (۱۱) نشان دهنده شکست طولی استوانه می‌باشد.

و) شیار خارجی طولی-حلقوی: تأثیرات ذکر شده در دو بخش قبلی، در این بخش نیز توأماً وجود دارد. پدیده بسته شدن دهانه شیار، در هر دو راستای شیار وجود دارد، لیکن به دلیل انبساط شعاعی دهانه شیار طولی باز شده و سبب شکست در راستای طولی می‌شود (شکل ۲۱). نزدیکی نتایج حاصل از تحلیل‌ها در این نوع چیدمان با تحلیل استوانه با شیار خارجی طولی به عمق ۱/۵ میلیمتر، به دلیل وجود شیار طولی به عمق ۱/۵ میلیمتر و عدم تأثیر شیارهای حلقوی است.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

هنگامی که استوانه تحت اثر بار انفجاری شکسته می‌شود، به ترکش‌هایی با ابعاد گوناگون تبدیل می‌گردد. لذا روش‌هایی جهت کنترل شکست و تولید



شکل ۱۴- بسته شدن و باز شدن دهانه‌ی شیار خارجی طولی.

- [1]. R. M. Lloyd. "Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design". AIAA, 1998.
- [2]. W. Johnson., "Impact Strength of Material", Edward Arnold ,1972.
- [3]. Hoggat CR., Rechet RF. "Fracture Behavior of Tubular Bombs". J Appl Phys, 39:1856-62, 1968.
- [4]. M. Sing, H. R. Suneja, M. S. Bola, S. Prakash. "Dynamic Tensile Deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates". International Journal Of Impact Engineering, Vol. 27 pp. 939-954, 2002.
- [۵] دشتیان گرامی ن، خدا رحمی ح، معصومی ع، " شکست پوسته های استوانه ای شیار دار تحت اثر انفجار خرج HE میانی"، سیزدهمین کنفرانس سالانه و نهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۳.
- [7]. J. Pearson, "The Shear-Control Method of Warhead Fragmentation". Naval Weapons Center, 1991.
- [8]. R. Gurney, "Fragmentation of bombs, shells and grenades". BRL report, p.635, 1947.
- [9]. G.R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatvres. and Pressures," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp.3148, 1985.
- [10]. J. Hallquist., "LS-DYNA 970 Theoretical Manual", Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [۱۱] ذبیحی، د. "بررسی اثرات انفصال بر شکست پوسته های جدار ضخیم تحت فشار داخلی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۴.
- [۱۲] مومنیان، ح. "شیمی مواد منفجره"، انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)، ۱۳۷۹.
- [13]. M. J. Mullin, B.J. Toole, "Simulation of Energy Absorbing Materials in Blast Loaded Structures". 8Th International Conference of LS-DYNA, 2004.
- [14]. B. Zecevic, J. Terzic, A. Catovic, Serdarevic-Kadic S. " Influence Parameters on High Explosive Projectile with Natural Fragmentation". Mechanical Engineering Faculty, Defense Technologies Department, Vilsonovo setaliste 9, 71000 , 2006.
- [15]. P. W. Copper, "Explosives Engineering". WILEY-VCH, Canada, 1997.