

## بررسی اثر انحناء گوشه های لوله جدارنازک جاذب انرژی با مقطع شبه مربعی در برخورد محوری

سیدعبدالمجید یوسف ثانی<sup>۱</sup>، سیدعلی مقامی<sup>۲</sup>، جلیل رضایی پزند<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، sam.y sani.mech@gmail.com

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، s.a.maghani@gmail.com

<sup>۳</sup>استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، jrezaeep@um.ac.ir

### چکیده

در این مقاله، به کمک نرم افزار اجزای محدود LS-DYNA برخورد محوری لوله های جدارنازک فلزی شبیه سازی گردیده و افزون بر این، برای مقادیر ضخامت، محیط و طول برابر، اثر افزایش انحناء گوشه های مقطع مربعی بر میزان جذب انرژی ویژه جرمی، مقدار نیروی میانگین و مقدار تغییرشکل بیشینه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش میزان انحناء گوشه ها در شکل مقطع شبه مربعی و نزدیک شدن به شکل مقطع دایره ای در این لوله ها، شکل بهینه ای وجود دارد که در آن، مقادیر جذب انرژی ویژه جرمی و نیروی میانگین، بیشترین و مقدار تغییرشکل بیشینه، کمترین است.

**واژه های کلیدی:** برخورد محوری، لوله های جدارنازک، تغییرشکل بیشینه، نیروی میانگین، جذب انرژی ویژه جرمی.

### مقدمه

روزانه در سراسر دنیا گزارش موارد متعددی از تصادفات جاده ای هولناک که منجر به خسارات جبران ناپذیر جانی و مالی می گردند به گوش می رسد. محافظت از جان کاربران وسایل نقلیه مهم ترین دغدغه طراحان و پژوهشگران است. قابلیت جذب انرژی ضربه، از مهمترین جنبه های مطالعه مقاومت ساختاری در برابر ضربه است و هدف اصلی از مقاوم سازی یک وسیله نقلیه، پراکنده نمودن انرژی برخورد در محدوده های طراحی شده برای سرنشینان است.

انرژی برخورد در وسایل نقلیه از طریق تغییرشکل پلاستیک اجزای سازه ای خاصی که در مکان های پیش بینی شده ای تعبیه شده اند، جذب می گردد. لوله های جدارنازک جاذب انرژی، با تغییرشکل پلاستیک خود این وظیفه را با بازدهی بالایی انجام می دهند. این قبیل لوله ها از نسبت استقامت به وزن بالا، قیمت پایین و قابلیت جذب انرژی بسیار خوبی برخوردار هستند. مطابق پژوهش های قبلی، به دو روش می توان کارایی این گونه لوله ها را افزایش داد: با استفاده از مواد پیشرفته با خواص مکانیکی بالا و یا با طراحی بهینه شکل و ابعاد مقطع و نیز ضخامت دیواره.

مطالعه و بررسی رفتار مقاومت در برابر ضربه سازه ها و اجزای آن ها مورد توجه پژوهشگران است. Guoxing [۱] در کتاب خود به مدلی تئوری از Andrews اشاره می کند که بر مبنای آن، انرژی جذب شده به دو قسمت الاستیک و پلاستیک تقسیم می شود. Abramowicz و Jonse [۲، ۳ و ۴] آزمایش های متعددی پیرامون

برخورد لوله های جدارنازک در ابعاد و اندازه های مختلف برای مقاطع دایره ای و مربع شکل انجام دادند. Otubushin [۵] نیز در زمینه شبیه سازی یکی از نمونه های آزمایش آن ها در نرم افزار DYN3D تلاش نمود و با خطای ۹/۵٪ به نتایجی مشابه آزمایشات آن ها دست یافت.

Al Galib و همکارانش [۶] در مقاله ای به بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی همزمان برخورد محوری لوله های آلومینیومی پرداختند. Tai و همکارانش [۷] شبیه سازی های متعددی برای مواد گوناگون همچون فولادهای معمولی و فولادهای با مقاومت بالا که کاربرد گسترده ای در صنایع خودروسازی دارند، انجام داده اند. برخی از پژوهشگران، شبیه سازی برخورد لوله را با ایجاد یک آغازگر کماتش<sup>۱</sup> بررسی نموده اند [۵، ۸، ۹ و ۱۰]. در بعضی مقالات، این عمل با هدف ایجاد نقص در ساختار هندسی برای نزدیک نمودن نتایج شبیه سازی عددی به نتایج واقعی انجام گرفته و در برخی با هدف هدایت نحوه چین خوردگی لوله به سمت الگویی منظم [۸، ۹ و ۱۰]. افزون بر این، برخورد مقاطع جدارنازک از جنس آلومینیوم که با فوم آلومینیوم برای افزایش قابلیت جذب انرژی پر شده اند نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۹].

هدف اصلی پژوهش حاضر، انتخاب بهترین شکل هندسی برای مقطع لوله های جدارنازکی است که تحت بار محوری دینامیکی ناشی از برخورد قرار می گیرند.

### مدل هندسی

برای ایجاد تغییر در انحناء گوشه های شکل مقطع مربعی به کمک یک تابع، شکل هندسی شبه مربعی با میزان انحناء مشخص در گوشه ها ایجاد می شود. با افزایش میزان انحناء در گوشه ها، از شکل مربع دور شده و به شکل دایره نزدیک می شویم. به این منظور از تابع نگاشت دو ضابطه ای [۱۱] استفاده شده است:

$$\begin{cases} x = \lambda(\cos\theta + w\cos(n\theta)) \\ y = -\lambda(c\sin\theta - w\sin(n\theta)) \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه، پارامتر  $\lambda$  که یک عدد حقیقی و مثبت است، اندازه بریدگی<sup>۲</sup> را کنترل می کند و عدد صحیح  $n$  برابر با تعداد اضلاع شکل منتهای یک می باشد (برای مربع مقدار  $n$  برابر ۳ است). پارامتر  $c$

۱. Buckling Initiator

۲. Cutout Size

جدول ۲: خواص مکانیکی فولاد معمولی [۷]

$\sigma_0$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)
۳۲۵	۷۸۲۰	۲۰۷/۲

همچنین برای اعمال اثر نرخ کرنش برای فولاد معمولی از معادله Cowper-Symonds استفاده شده است:

$$\dot{\epsilon} = D(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1)^p, \quad \sigma'_0 \geq \sigma_0 \quad (2)$$

در این معادله  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش،  $\sigma'_0$  استحکام دینامیکی مینا و  $\sigma_0$  استحکام استاتیکی مینا بوده و مقادیر  $D = 40$  و  $p = 5$  به عنوان پارامترهای ورودی معادله در نرم‌افزار برای فولاد معمولی مورد استفاده قرار گرفته است.

### مدل اجزای محدود و شرایط مرزی

جسم صلب با جرم و سرعت اولیه مشخص در غیاب نیروی گرانش، با لوله برخورد کرده و انرژی جنبشی آن با تغییرشکل پلاستیک لوله جذب می‌شود. لبه پایینی لوله به صورت کامل مقید شده و جسم صلب کاملاً محوری و بدون لغزش با لوله برخورد می‌کند.

برای مدل کردن لوله جدارنازک از المان پوسته ۴ گره‌ای Bleyschko-Tsay با ۵ نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت استفاده شده و اندازه المان نیز با توجه به هندسه و بررسی حساسیت به اندازه المان و نیز توصیه مقاله [۷]، برابر ۲ mm در نظر گرفته شده است.

در فرآیند انجام شده در این پژوهش برای شبیه‌سازی برخورد لوله جدار نازک، دیوار صلبی به جرم (m) ۲۵ kg و سرعت اولیه (V<sub>0</sub>) ۱۰ m/s به صورت محوری به لوله برخورد می‌کند.

برای تعیین شرایط تماس، از دو نوع الگوریتم برای جلوگیری از نفوذ المان‌های در تماس با هم در داخل یکدیگر استفاده شده است. یکی از این الگوریتم‌ها، CCNTS<sup>v</sup> می‌باشد که برای جلوگیری از فرورفتن محل برخورد لوله و جسم صلب در محل تماس تعریف شده و دیگری CASS<sup>a</sup> است که برای جلوگیری از فرورفتن لبه‌های چین‌خوردگی در داخل یکدیگر تعریف گردیده است.

ضریب اصطکاک در محل تماس لوله و جسم صلب برای جلوگیری از هرگونه لغزش برابر یک در نظر گرفته شده و سطوح چین‌خوردگی نیز با ضریب اصطکاک ۰/۱ با هم در تماس هستند.

برای هدایت الگوی چین‌خوردگی و نیز کاستن از مقدار نیروی بیشینه از یک آغازگر کمانش به صورت فرورفتگی یک ردیف المان در محیط لوله به مقدار ۰/۳ mm و در فاصله ۱۰ mm از لبه بالایی آن استفاده شده است. مدل برخورد جسم صلب با لوله و همچنین ابعاد آغازگر کمانش در شکل (۱) دیده می‌شود.

نسبت منظره‌ای بریدگی<sup>۳</sup> را مشخص می‌نماید (برای منتظم بودن شکل‌ها مقدار C برابر یک در نظر گرفته می‌شود). پارامتر W نیز ضریب گردشوندگی<sup>۴</sup> بوده و شعاع انحنا گوشه‌ها را تغییر می‌دهد.

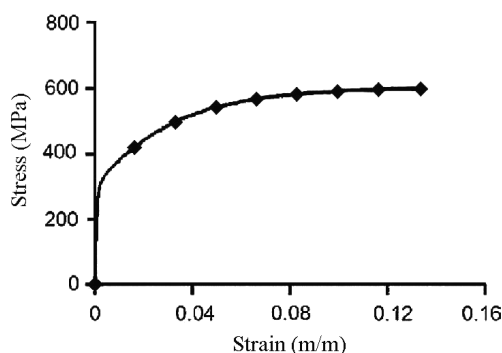
برای ممکن ساختن مقایسه صحیح بین نمونه‌ها باید محیط همه شکل‌های مدل شده برای مقطع لوله‌ها مساوی بوده و برابر با محیط دایره‌ای به قطر ۳۰ mm باشد. افزون بر این، ضخامت و طول همه نمونه‌ها نیز مساوی بوده و به ترتیب برابر ۰/۸ mm و ۹۰ mm در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: داده‌های مربوط به مدل‌سازی هندسی برای رابطه (۱)

n	c	w	$\lambda$	Shape
۳	۱	۰	۱۵	
۳	۱	۰/۰۱۲۵	۱۴/۹۹۵	
۳	۱	۰/۰۲۵	۱۴/۹۷۹	
۳	۱	۰/۰۳۷۵	۱۴/۹۵۳	
۳	۱	۰/۰۵	۱۴/۹۱۶	
۳	۱	۰/۰۶۲۵	۱۴/۸۶۹	
۳	۱	۰/۰۷۵	۱۴/۸۱۲	
۳	۱	۰/۱	۱۴/۶۶۸	
۳	۱	۰/۱۲۵	۱۴/۴۸۶	
۳	۱	۰/۱۵	۱۴/۲۶۸	

### مدل ماده و خواص مکانیکی آن

برای تعیین خواص فولاد معمولی برای نرم‌افزار، از مدل ماده شماره ۲۴ کتابخانه مواد نرم‌افزار LS-DYNA که مدلی مبتنی بر تعریف تکه-تکه خطی خواص ماده در ناحیه پلاستیک<sup>۵</sup> می‌باشد، استفاده گردیده است. این مدل، قابلیت نشان دادن هم‌زمان همه ویژگی‌های منطقه پلاستیک در ماده و نرخ کرنش را داراست. منحنی تنش-کرنش فولاد معمولی در نمودار (۱) و خواص مکانیکی آن در جدول (۲) آورده شده است.



نمودار ۱: نمودار تنش-کرنش فولاد معمولی [۷]

Bleyschko-Tsay 4-Node Shell Element ۶

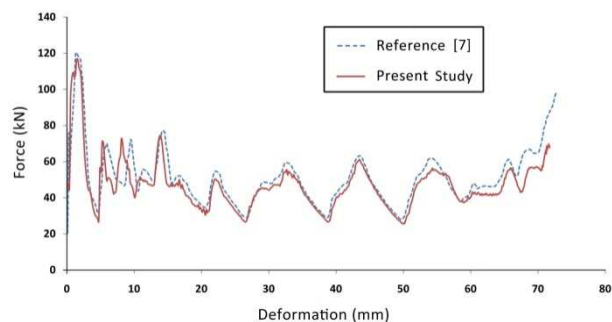
CONTACT\_CONSTRAINT\_NODES\_TO\_SURFACE ۷

CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE ۸

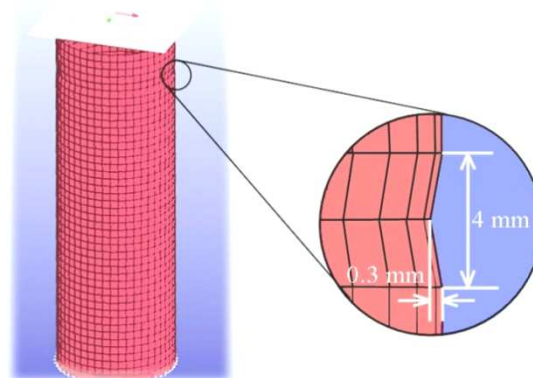
Aspect Ratio of The Cutout ۳

Bluntness Factor ۴

Piecewise Linear Plasticity ۵



نمودار ۲: اعتبارسنجی نتایج با نتایج مرجع [۷]



شکل ۱: مدل برخورد جسم صلب با لوله و ابعاد آغازگر کمانش

شکل نهایی و چین خوردگی های نمونه های مدل سازی شده در شکل (۲) مشاهده می شود.

### روابط مورد استفاده

پارامترهای لازم برای مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی برخورد، که باید به کمک نمودار نیرو- تغییرشکل نمونه استخراج گردند، عبارتند از: تغییرشکل بیشینه، نیروی برخورد میانگین و میزان جذب انرژی ویژه جرمی  $MSEA^9$  (که با سطح زیر نمودار متناسب است).

یکی از خروجی های تحلیل برخورد، انرژی جذب شده ویژه جرمی است که مقدار آن به کمک رابطه (۳) به دست می آید:

$$MSEA = \frac{E}{\Delta M} = \frac{E}{\rho \Delta V} = \frac{E}{\rho A \Delta L} \quad (3)$$

در این رابطه،  $MSEA$  بیانگر مقدار جذب انرژی ویژه جرمی بوده و  $E$  انرژی جنبشی اولیه جسم صلب برابر  $\frac{1}{2} m_0 v_0^2$  است و  $\Delta M$  نیز جرمی از لوله است که دچار تغییرشکل شده و متناسب با طول تغییرشکل یافته یا به عبارتی مقدار تغییرشکل بیشینه ( $\Delta L$ ) است.

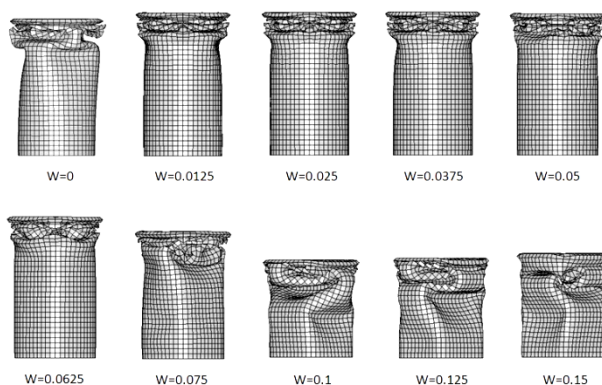
یکی دیگر از مهم ترین پارامترهای خروجی در تحلیل برخورد لوله های جدارنازک، نیروی میانگین (میزان جذب انرژی ویژه طولی) است که مقدار آن از رابطه (۴) به دست می آید:

$$P_{mean} = \frac{E}{\Delta L} \quad (4)$$

پارامتر خروجی دیگر مقدار تغییرشکل بیشینه  $\Delta L$  است که به طور مستقیم از نمودار نیرو- تغییرشکل به دست می آید.

### نتایج

برای اعتباردهی به پژوهش حاضر، نتایج به دست آمده از مدل سازی با نتایج یک پژوهش معتبر اعتبارسنجی گردیده است. به این منظور، نمونه شماره ۷ در مقاله [۷]، مدل سازی شده و اعتبار مدل حاضر با انحراف ۰/۹٪ نسبت به نتایج ارائه شده در مقاله [۷]، تأیید می گردد. اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر در مقایسه با نتایج مقاله [۷] در نمودار (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۲: چین خوردگی نمونه ها و شکل نهایی آن ها

در این بخش، نتایج حاصل از حل عددی برخورد لوله های جدارنازک جذب انرژی با تغییر در انحناء گوشه های شکل مقطع شبه مربعی بررسی می گردد. نتایج به دست آمده شامل مقدار تغییرشکل بیشینه، نیروی برخورد میانگین و میزان جذب انرژی ویژه جرمی برای نمونه های مدل سازی شده، به منظور مقایسه در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: نتایج به دست آمده از تحلیل برخورد

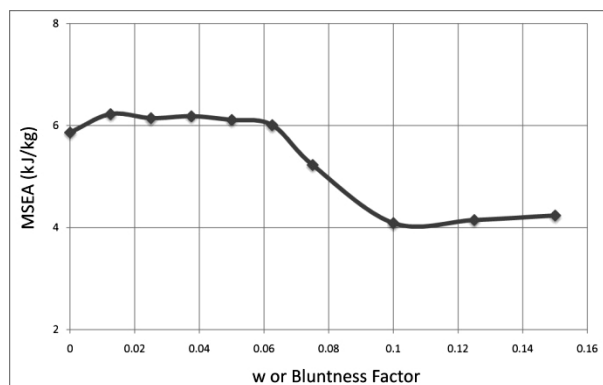
W	$\Delta L$ (mm)	$P_{mean}$ (kN)	MSEA (kJ/kg)
۰	۳۶/۲	۳۴/۵۸	۵/۸۶
۰/۰۱۲۵	۳۴/۱	۳۶/۷	۶/۲۳
۰/۰۲۵	۳۴/۵	۳۶/۲۴	۶/۱۵
۰/۰۳۷۵	۳۴/۳	۳۶/۴۵	۶/۱۸
۰/۰۵	۳۴/۷	۳۶/۰۳	۶/۱۱
۰/۰۶۲۵	۳۵/۳	۳۵/۴۳	۶/۰۱
۰/۰۷۵	۴۰/۵	۳۰/۸۳	۵/۲۳
۰/۱	۵۱/۸	۲۴/۱۱	۴/۰۹
۰/۱۲۵	۵۱/۱	۲۴/۴۶	۴/۱۵
۰/۱۵	۵۰	۲۴/۹۹	۴/۲۴

به عنوان نمونه در نمودار (۳) مقایسه مقدار جذب انرژی ویژه جرمی برای نمونه های مدل سازی شده نشان داده شده است.

## مراجع

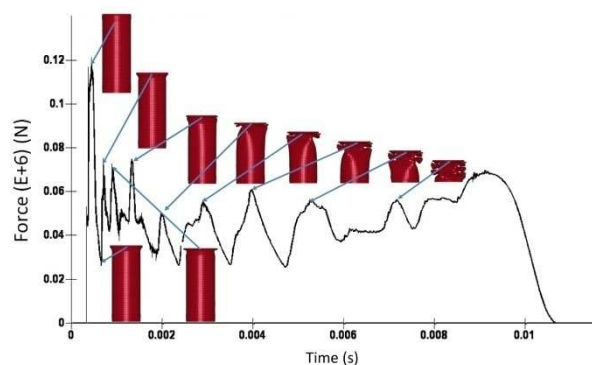
- [1] Guoxing Lu, T.Y., 2003. *Energy absorption of structures and materials*, Woodhead Publishing.
- [2] Abramowicz, W., and Jones, N., 1984. "Dynamic axial crushing of circular tubes", *International Journal of Impact Engineering* 2, pp. 263-281.
- [3] Abramowicz, W., and Jones, N., 1984. "Dynamic axial crushing of square tubes", *International Journal of Impact Engineering* 2, pp.179-208.
- [4] Abramowicz, W., and Jones, N., 1986. "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes", *International Journal of Impact Engineering* 4, pp. 243-270.
- [5] Otubushin, A., 1998. "Detailed validation of a non-linear finite element code using dynamic axial crushing of a square tube", *International Journal of Impact Engineering* 21, pp. 349-368.
- [6] Al Galib, D., and Limam, A., 2004. "Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes", *Thin-Walled Structures* 42, pp. 1103-1137.
- [7] Tai, Y.S., Huang, M.Y., and Hu, H.T., 2010. "Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 53, pp. 1-8.
- [8] Langseth, M., Hopperstad, O.S., and Berstad, T., 1999. "Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity", *International Journal of Impact Engineering* 22, pp. 829-854.
- [9] Hanssen, A.G., Langseth, M., and Hopperstad, O.S., 2000. "Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler", *International Journal of Impact Engineering* 24, pp. 347-383.
- [10] Shariati, M., Allahbakhsh, H.R., and Saemi, J., 2010. "An experimental and numerical crashworthiness investigation of crash columns assembled by spot-weld", *MECHANIKA Nr.2(82)*, pp. 21-25
- [11] Rezaepazhand, J., and Jafari, M., 2010. "Stress Concentration in metallic plates with special shaped cutout", *International Journal of Mechanical Sciences* 52, pp. 96-102.

[۱۲] یوسف ثانی، سیدعبدالمجید و مقامی، سیدعلی، ۱۳۸۹. "شبیه‌سازی برخورد محوری لوله های جاذب انرژی فلزی و تقویت شده با چندلایه کامپوزیتی"، پروژه کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد.



نمودار ۳: مقایسه مقدار جذب انرژی ویژه جرمی

در شکل (۳) نمونه ای از روند چین خوردن لوله در خلال برخورد محوری به همراه موقعیت زمانی هر مرحله مشاهده می شود. این نمونه، مدل لوله با مقطع دایره است که در آن مودهای مختلف کمانش قابل مشاهده است.



شکل ۳: روند چین خوردگی لوله در خلال برخورد محوری و جذب انرژی

همانگونه که از نتایج جدول (۳) و منحنی نمودار (۳) قابل مشاهده است، با وجود تصور این که بهترین شکل مقطع برای این لوله های جدارنازک باید شکل دایره باشد، دیده می شود که در بازه مقادیر ۰/۰۱۲۵ تا ۰/۰۶۲۵ برای ضریب گردشوندگی  $w$ ، مقدار جذب انرژی ویژه جرمی و در نتیجه نیروی میانگین از بقیه شکل ها از جمله شکل مقطع دایره بیشتر است و همچنین بین نمونه های مورد بررسی به ازای  $w = ۰/۰۱۲۵$  این مقدار بیشترین است. این موضوع بیانگر این است که بین شکل های مربع و دایره برای مقطع لوله جدارنازک، شکلی وجود دارد که دارای عملکرد بهتری حتی از شکل مقطع دایره ای است.