

تخریب خمشی جاذب‌های انرژی جدار نازک و ارائه مدل ساده‌شده عددی*

(یادداشت پژوهشی)

احمد رحمتی علایی^(۱) محسن غضنفری^(۲) مجید شهری^(۳)

چکیده سیستم‌های جذب انرژی ضربه در صنایع مختلف به‌ویژه در صنایع خودروسازی و ریلی به‌عنوان راه‌حلی برای کم کردن اثر ضربه وارد به سرنشینان و بالا بردن ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مقاله بر روی رفتار تخریب خمشی جاذب‌های انرژی جدار نازک با مقاطع دایروی و مربعی تمرکز می‌کند. تئوری به‌کار گرفته‌شده در آن تعادل انرژی کل است. مود متداول تخریب خمشی جهت استخراج روابط، مد نظر می‌باشد. به همین منظور روابط به‌دست آمده با نتایج منتشرشده برای مقاومت خمشی سازه‌های لوله‌ای جدار نازک شامل مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه شده‌اند. در ادامه با استفاده از رابطه مقاومت خمشی استخراج‌شده، مدل‌های ساده‌شده برای لوله‌های دایروی و مربعی معرفی می‌گردند. مزیت اصلی مدل‌های ساده‌شده به‌عنوان یک تکنیک مدل‌سازی بحرانی، کاهش چشمگیر در زمان محاسبات رایانه در مراحل اولیه طراحی یا ارائه نتایج نزدیک به مدل اصلی است. بدین منظور با شبیه‌سازی ضربه محوری لوله دارای خم با کمک نرم‌افزار المان محدود دینامیکی غیرخطی LS-DYNA، نتایج به‌دست آمده مقایسه گردیده‌اند، تا دقت مدل ساده‌شده و همچنین رابطه مقاومت خمشی استخراج‌شده صحت‌سنجی گردد.

واژه‌های کلیدی جاذب انرژی، دایروی-مربعی، ضربه، تخریب خمشی، مدل ساده‌شده.

Bending Collapse of Thin Walled Energy Absorber and Presenting Numerical Simplified Model

A. Rahmati M. Ghazanfari M. Shahravi

Abstract Impact energy absorption systems in various industries such as automotive and railway have a particular importance to minimize the impact on passengers and enhance vehicle safety. This paper focuses on the bending collapse behavior of thin-walled energy absorber with circular and square cross sections. The theory that is applied is global energy equilibrium and the prevalent bending collapse mode for obtaining the relationship is considered. On the same basis, obtained relations are compared with the published results for the bending strength of tubular structures which were derived from experimental and analytical studies. Subsequently by using the derived bending strength formula, simplified models for circular and square tubes is introduced. The main advantage of these simplified models as a critical modeling technique is dramatically reducing the time of computer simulation in early design stages with the results close to the original model. For this purpose, by axial crash simulation of curved tube by using nonlinear dynamic finite element software LS-DYNA, the results are compared to verify the efficiency of the proposed simplified model and the accuracy of the derived relationship for tube's bending strength.

Key Words Energy absorber, Circular-square, Crash, Bending collapse, Simplified model.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۴/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۰/۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک (ماشین‌های ریلی)، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک (ماشین‌های ریلی)، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

(۳) نویسنده مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران. m_shahravi@iust.ac.ir

مقدمه

سازه های جدار نازک به طور گسترده در صنایع متعدد مهندسی به ویژه صنعت خودرو و ریلی به عنوان جاذب های انرژی استفاده می شوند. از جمله این کاربردها می توان به جذب انرژی ضربه ناشی از حوادث رانندگی اشاره کرد. لوله های جدار نازک به خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا، طول لهیدگی زیاد و نسبت جذب انرژی به وزن بالا به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم های جذب انرژی کاربرد روزافزونی پیدا کرده اند. تاکنون مطالعات انجام شده برای افزایش کارایی جذب انرژی، ایمنی و قابلیت اطمینان آن ها در برابر رفتار ضربه مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. این مقاله نیز بر روی یک جاذب انرژی S شکل که می توان آن را به عنوان شکل ساده ای از انتهای جلوی سر شاسی خودرو در نظر گرفت، تمرکز می کند. در اینجا با استفاده از روش تعادل انرژی، روابط بین نیروها و کاهش طول محوری در فشردگی و هم چنین رابطه ممان اعمال شده و زاویه چرخش در ضربه خمشی به دست آمده است. لازم به ذکر است مطالعات قبلی معادلات ریاضی متعددی را برای شرح و پیش بینی ارتباط انواع سازه های جدار نازک توسعه داده اند. این معادلات در پیش بینی رفتار ضربه این گونه از سازه ها اهمیت بسیاری دارند. ایده این تحقیق نیز بر این اصل تأکید می کند که معادلات مربوط می توانند جهت معرفی مدل های ساده شده برای سازه های جدار نازک استفاده شوند و هم چنین قابلیت جایگزینی با مدل های دقیق در تحلیل های ضربه را دارا هستند. مزیت اصلی مدل های ساده شده کاهش زمان تحلیل در رایانه با ارائه نتایج نزدیک به مدل اصلی است.

لیو و دی [1] مشخصات خمشی تیرهای جدار نازک با مقطع کانالی شکل C را توسعه دادند. هم چنین ککمن [4]، ویرزبکی و همکارانش [5-6] معادلاتی را توسعه دادند که مقاومت خمشی و محوری تیرهای جدار نازک را با مقطع قوطی شکل پیش بینی می نماید.

علاوه بر این سازه ها، لوله های دایروی جدار نازک سازه های مهمی هستند که به طور گسترده در صنایع خودروسازی در طراحی وسایل سبک وزن استفاده می شوند. تاکنون ضربه محوری لوله های دایروی جدار نازک به طور کامل بررسی و به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی با تئوری های مناسب شرح داده شده اند.

آبراموویچ و همکارانش [7] رفتار ضربه محوری لوله های دایروی را بررسی نمودند که شامل اثر سرعت ضربه و مشخصه های جذب انرژی این لوله ها هست. در کار آن ها معادلات مهمی استخراج گردید که بر پایه روش های عددی و تأیید شده با آزمایش هستند. علاوه بر این مورد، ژنگ و همکارانش [8] پاسخ ممان-زاویه را برای سازه های لوله ای از طریق بررسی های تحلیلی و آزمایشگاهی به دست آوردند.

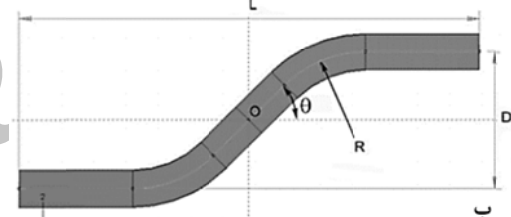
در این مقاله، مکانیزم تخریب خمشی لوله جدار نازک بررسی شده است و بر پایه آن پاسخ ممان-زاویه از طریق روش تعادل انرژی استخراج گردیده است. در ادامه، یافته های این تحقیق با نتایج ژنگ برای صحت سنجی مقایسه شده اند. لازم به ذکر است مدل ساده شده نیز یک تکنیک مدل سازی بحرانی است که می تواند به طور مستقیم در مراحل اولیه طراحی برای ارزیابی تحلیل های ضربه و شبیه سازی مورد استفاده قرار گیرد.

مدل ساده شده، یک مدل اجزای محدود می باشد که شامل المان های تیر و فنر است که در قیاس با مدل دقیق به کار و زمان کمتری برای تحلیل نیاز دارد. ضمناً می تواند به عنوان پاسخ مناسب برای شبیه سازی سریع و کارآمد کامپیوتری در نظر گرفته شود [1]. در این مدل از رابطه ممان-زاویه به دست آمده از روش تعادل انرژی استفاده شده است تا در آن المان های فنر غیرخطی تعریف گردد و رفتار ضربه برای خطوط پلاستیک محوری شبیه سازی شود [10]. نتایج مقایسه تطابق مناسبی را بین مدل ساده شده و مدل دقیق نشان می دهد، لذا صحت رابطه ممان-زاویه استخراج شده

برای لوله جدار نازک تأیید می‌گردد.

جاذب انرژی S شکل

شکل (۱-الف) نمایی از شاسی یک خودرو را نشان می‌دهد. بسیاری از قطعات شاسی و بدنه خودروها از سازه‌های جدار نازک فولادی تشکیل شده‌اند. مطابق شکل (۱-ب) سازه جدار نازک S شکل را می‌توان به عنوان یک نمونه ساده شده از نرده پایین جلوی شاسی خودرو در نظر گرفت [2, 11].



شکل ۱ جاذب انرژی S شکل (الف) شاسی خودرو (ب) مدل ساده شده برای نرده پایین و جلوی شاسی خودرو

شکل تغییر یافته برای مدل لوله‌های دایروی جدار نازک بعد از تست ضربه محوری و خمش سه نقطه تأیید می‌گردد (شکل ۳).

در حین استخراج روابط، فرض شده است که کل کار انجام شده به وسیله نیروهای خارجی توسط سازه جذب گردد و به کار خارجی تبدیل شود. بر اساس روش کار مجازی، انرژی درونی در طول ۶ خط گذرنده محوری توزیع می‌گردد (خطوط ۱ تا ۶ در شکل ۲) که برابر با حاصل ضرب ممان خمشی بر واحد طول (M_0) در اندازه هر کدام از خطوط محوری است.

بر پایه فرض‌های بالا رابطه ممان $M(\theta)$ می‌تواند طبق فرمول‌های زیر محاسبه شود. از روابط هندسی نشان داده شده در شکل (۲) می‌توان دریافت:

$$\delta = 2H(1 - \cos\alpha) \quad (1)$$

که δ کاهش طول محوری مربوط به تابندگی پلاستیک، H نصف طول تابندگی و α زاویه تابندگی است. بر پایه تعادل انرژی در حین ضربه، نرخ انرژی درونی جذب شده با مکانیزم تخریب بایستی برابر با نرخ کار انجام شده توسط نیروهای خارجی باشد. بنابراین:

$$E_{ext} = E_{int} \Rightarrow \dot{E}_{ext} = \dot{E}_{int} \quad (2)$$

بر پایه قانون کار مجازی، نرخ کار نیروی خارجی می‌تواند به صورت حاصل ضرب نیروی لحظه‌ای و سرعت نسبی متناظر با مکانیزم کوتاه‌شدگی محوری بیان شود. بنابراین کار در واحد زمان برای نیروی خارجی برابر خواهد بود با:

$$\dot{E}_{ext} = P\dot{\delta} = 2PH \sin\alpha \dot{\alpha} \quad (3)$$

مکانیزم تخریب خمشی

در این بخش روابط ممان-زاویه برای لوله‌های جدار نازک با به کارگیری روش تعادل انرژی کل استخراج می‌شود. مود تخریب متداول این لوله‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. این مود از نتایج شبیه‌سازی عددی لوله استوانه‌ای با تکیه‌گاه ساده در معرض تخریب خمش سه نقطه‌ای پیش‌بینی و نیز از طریق آزمایش‌های خمش تأیید شده است [9]. لازم به ذکر است اگرچه در این شکل مود تخریب خمش سه نقطه مد نظر است اما هم‌چنان می‌تواند با مود تخریب ضربه محوری تطبیق داده شود [9] و این فرض با مقایسه

همان طور که در شکل مشاهده می شود طول خطوط محوری ۱ و ۲ برابر با نصف محیط دایره یعنی (πR) و طول خطوط ۳ تا ۶، $\sqrt{\frac{(\pi R)^2}{4} + H^2}$ محاسبه می شود. بنابراین نرخ چرخش خط محوری ۱ برابر با نرخ خمش H (یعنی α) است. از شکل مشابه نتیجه می گردد که نرخ چرخش خط محوری ۲ برابر با $\dot{\theta}$ است. خطوط محوری ۳ تا ۶ نیز با زاویه متفاوتی نسبت به خطوط ۱ و ۲ چرخش دارند. در روابط ذیل این چرخش با زاویه $\dot{\gamma}$ نشان داده شده است. (شکل ۴) مطابق جدول (۱) نرخ انرژی توزیع شده در طول خطوط محوری برابر است با:

$$\dot{E}_1 = M_0 \pi R \dot{\alpha} \quad (5)$$

$$\dot{E}_2 = M_0 \pi R \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\dot{E}_3 = M_0 \sqrt{\frac{(\pi R)^2}{4} + H^2} \dot{\gamma} \quad (7)$$

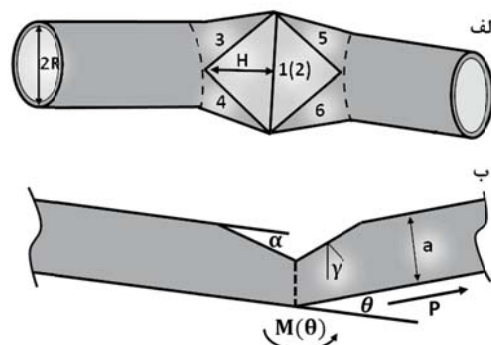
جدول ۱ خطوط محوری در مود تخریب لوله جدار نازک

خط محوری	نرخ زاویه چرخش	اندازه
خط ۱	$\dot{\alpha}$	πR
خط ۲	$\dot{\theta}$	πR
خط ۳	$\dot{\gamma}$	$\sqrt{\frac{(\pi R)^2}{4} + H^2}$
الی ۶		

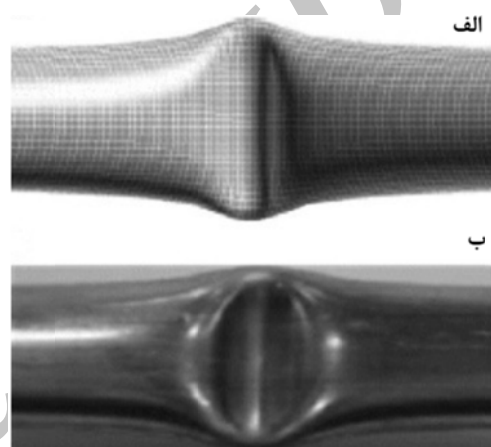
از شکل (۵) استنباط می شود که:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\frac{\delta}{2}}{a} = \frac{H(1-\cos(\alpha))}{a}$$

سطح مقطع مربعی برای سطح مقطع دایروی است. از بررسی های قبلی در مرجع [8] در مورد سازه های جدار نازک می توان دریافت که مشخصه های حل برای مقاطع مربعی و دایروی بسیار شبیه هم هستند. بنابراین هر لوله دایروی می تواند با استفاده از لوله مربعی معادل، تقریب زده شود. مطابق مرجع [8] عرض معادل لوله



شکل ۲ مکانیزم تخریب لوله دایروی (الف) نمای صفحه ای (ب) نمای برش خورده، نیروی لحظه ای P و ممان $M(\theta)$



شکل ۳ مود تخریب از شبیه سازی کامپیوتری (الف) ضربه محوری (ب) خمش سه نقطه ای [3]

نیروی P همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است نیروی ضربه ایجاد شده حاصل از برخورد لوله جدار نازک با دیوار صلب است که در قسمت بعد به صورت عبارتی از شعاع متوسط لوله، ضخامت t و زاویه خمش لحظه ای θ معرفی می گردد. از شکل (۲) مشاهده می گردد که تاشدگی در این شش خط محوری رخ می دهد، لذا فرض می شود در حین ضربه، انرژی درونی در طول ۶ خط محوری (۱ تا ۶) توزیع گردد و هم چنین به دلیل مکانیزم متقارن، انرژی درونی به طور مساوی بین خطوط ۱ تا ۶ تقسیم می گردد. بنابراین نرخ کل انرژی جذب شده برابر است با:

$$\dot{E}_{int} = \sum_{i=1}^6 \dot{E}_i = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + 4\dot{E}_3 \quad (8)$$

فرض زاویه کوچک α نیروی لحظه‌ای P می‌تواند طبق رابطه زیر محاسبه شود:

$$P = M_0 \left(\frac{\pi R}{2H\alpha} + \frac{\pi}{1.63} + \sqrt{\left(\frac{\pi^2 R^2}{4} + H^2 \right)} \left(\frac{H}{1.63R\alpha} \right) \right) \quad (11)$$

طبق بررسی‌های ژنگ [8]:

$$H = 1.84R(t/2R)^{0.5} \quad (12)$$

که t ضخامت لوله است. رابطه (۱۲) یک پاسخ تحلیلی برای قسمت تاشده لوله دایروی است که با مینیمم کردن انرژی جذب شده نسبت به H به دست آمده است. این معادله براساس مدل پلاستیک و رابطه ضخامت لوله ($\frac{R}{t} < 30$) توسعه داده شده که در محدوده پلاستیک تغییر شکل داده است. با جای‌گذاری رابطه (۱۲) و θ در رابطه (۱۱) رابطه بین نیروی لحظه‌ای P و زاویه θ به دست می‌آید:

$$P = M_0 \left(\frac{1.08 \left(\frac{R}{t} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{\sqrt{\theta}} \right) + 1.93 + \sqrt{(0.75R + 0.51t) \left(\frac{t^{1/4}}{R^{3/4}} \right) \left(\frac{1}{\theta} \right)}}{1.63R} \right) \quad (13)$$

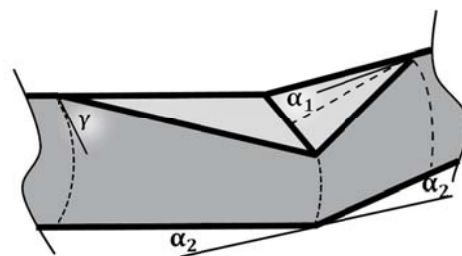
از رابطه (۱۱) و (۱۳) مشاهده می‌شود که نیروی لحظه‌ای P در حین تخریب خمش تابعی از زاویه خمش (θ) است. سرانجام $M(\theta)$ یعنی ممان خمشی که از نیروی P به دست می‌آید، می‌تواند به سادگی از رابطه (۱۴) برابر با حاصل ضرب نیرو در بازو مشخص گردد.

$$M(\theta) = Pa = P(1.63R) = M_0 \left(\frac{1.76 \left(\frac{R^{5/4}}{t^{1/4}} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\theta}} \right) + 3.15 + \sqrt{(2R + 1.36t) (Rt)^{1/4} \left(\frac{1}{\theta} \right)}}{1.63} \right) \quad (14)$$

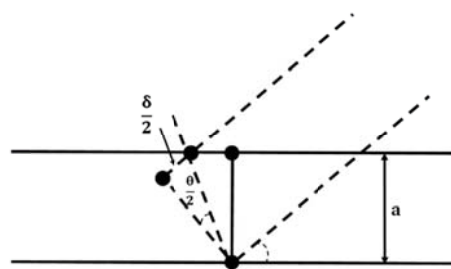
نمودار رابطه (۱۴) در شکل (۶) رسم شده است. از این شکل می‌توان دریافت که بایستی رابطه $M(\theta)$

مربعی با روش تحلیلی، $1/63 R$ محاسبه و تأیید شده است که با این مقدار ممان اول سطح مقطع دایروی و مربعی یکسان است. برای مقادیر کوچک زوایای α و θ رابطه زیر می‌تواند با استفاده از بسط تیلور نوشته شود:

$$\left(\frac{\theta}{2} \right) = \frac{\delta}{a} = \frac{H(1-\cos(\alpha))}{a} = \frac{H(1-\left(1-\frac{\alpha^2}{2}\right))}{a} \Rightarrow \theta = \frac{H}{a} \alpha^2 \Rightarrow \alpha = \left(\frac{a\theta}{H} \right)^{0.5} \quad (8)$$



شکل ۴ زاویه پرخش γ برای خطوط محوری ۳ تا ۶



شکل ۵ رابطه بین α و θ

زاویه γ با رابطه $\tan(\gamma) = \left(\frac{\tan(\theta/2)}{\sin(\alpha)} \right)$ به α و θ مرتبط می‌شود.

$$\gamma = \frac{(\theta/2)}{\alpha} = \frac{1}{2} \frac{H}{a} \alpha \Rightarrow \gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{H\theta}{a} \right)^{0.5} \quad (9)$$

از جای‌گذاری رابطه (۹) و (۸) در روابط (۷-۴) رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\dot{E}_{int} = M_0 \dot{\alpha} \left(\pi R + \frac{2\pi a H}{1.63} + \sqrt{\left(\frac{\pi^2 R^2}{4} + H^2 \right)} \left(\frac{H}{1.63R} \right) \right) \quad (10)$$

جای‌گذاری رابطه (۱۰) و (۳) در رابطه (۲) و با

داده های آزمایشگاهی نیز صحت سنجی شده اند.

$$M(\theta) = 4t^2 M_0 \left(-\frac{4}{3} + 2.6117 \left(\frac{R}{t} \right)^{11/12} \left(\frac{1}{\sqrt{\theta}} \right) \right) \quad (15)$$

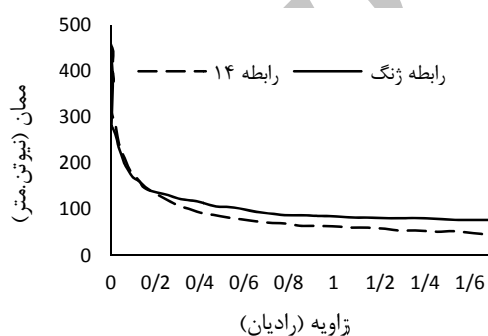
در معادلات (۱۵ و ۱۴)، M_0 ممان پلاستیک بر واحد طول دیواره مقطع است که برابر با $(\sigma_0 t^2 / 4)$ است. ابعاد مدل لوله منحنی شکل دایروی جدار نازک به کار گرفته شده، $D=50\text{mm}$ و $t=1.5\text{mm}$ می باشد. منحنی های ممان-زاویه برای معادلات (۱۵ و ۱۴) در شکل (۶) رسم شده اند. از این شکل می توان دریافت که رابطه $M(\theta)$ تطابق مناسبی با پاسخ ژنگ [8] دارد.

مدل ساده شده عددی

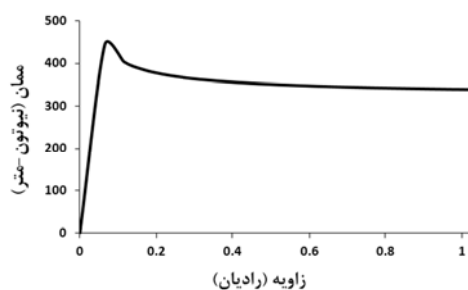
اکنون معادله (۱۴) برای مدل ساده به کار گرفته می شود و از آن برای تحلیل های ضربه استفاده خواهد شد. در شبیه سازی های پیشرو مدل لوله جدار نازک با یک سرعت اولیه به دیوار صلب برخورد می کند و تخریب حاصل می شود. از مرجع [1] می توان دریافت هنگامی که تیر جدار نازک بدون خم با دیوار صلب برخورد می کند، کمانش محوری رخ می دهد و هیچ گونه تخریب خمشی ظاهر نمی گردد. با این وجود هنگامی که تیر جدار نازک دارای خم با دیوار برخورد کند دچار خمش خواهد شد و تخریب خمشی بر روی خطوط محوری پلاستیک متمرکز می شود. بنابراین در اینجا مدل لوله جدار نازک دارای خم با مقطع دایروی و مربعی برای تحلیل ضربه استفاده می شود تا تخریب خمشی را نشان دهد.

بایستی تأکید گردد که اگرچه معادله (۱۴) برای لوله های بدون خم استخراج شده است، ولی با این وجود هم چنان می تواند برای لوله های دارای خم نیز استفاده شود؛ زیرا لوله های دارای خم در ضربه محوری و بدون خم در خم سه نقطه ای، مکانیزم تخریب

برای زوایای بیشتر از 0.2 رادیان استفاده گردد، چرا که با ترسیم رابطه (۱۴) و بزرگ نمایی در شکل (۷) مشخص می شود که در زوایای کمتر از 0.2 رادیان نمودار ممان، صعودی است. بایستی تأکید گردد، در بخش بعدی رابطه (۱۴) به منظور مدل سازی فنر پیچشی غیرخطی در مدل ساده شده لوله جدار نازک که مهم ترین قسمت مدل ساده شده برای تغییر شکل های پلاستیک است، مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



شکل ۶ رابطه ۱۴ (ممان-زاویه) برای لوله جدار نازک

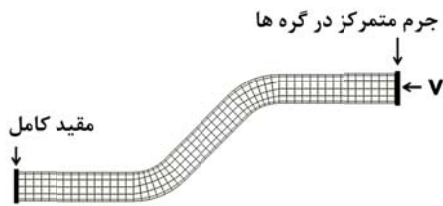


شکل ۷ نمودار ممان-زاویه خمش ورودی

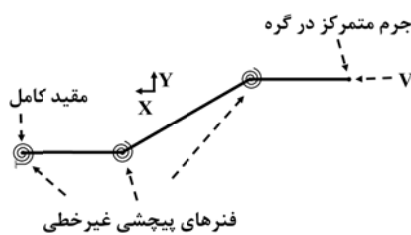
به نرم افزار LS-DYNA

اعتبار سنجی

در این قسمت رابطه ممان-زاویه استخراج شده (رابطه ۱۴) برای لوله دایروی با مقایسه رابطه ممان-زاویه منتشر شده در مرجع [8] برای سازه های لوله ای تأیید شده است. ژنگ [8] یک حل تحلیلی (معادله ۱۵) برای خمش سازه های لوله ای براساس تئوری خطوط محوری پلاستیک استخراج نموده است که با



شکل ۸ مدل دقیق برای مقطع دایروی و مربعی



شکل ۹ مدل ساده شده برای مقاطع دایروی و مربعی

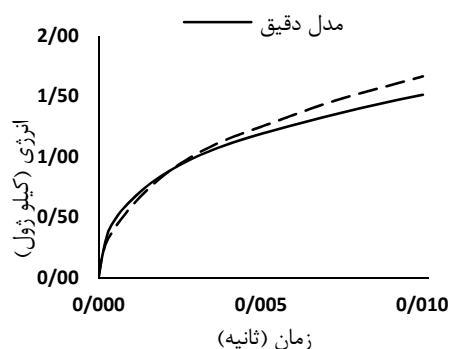
نتایج

در شبیه سازی با هیدروکد LS-DYNA، مدل ها با یک دیوار صلب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه در مدت زمان ۰/۰۱ ثانیه برخورد می کنند. نتایج حاصل شده از هر دو مدل در شکل های (۱۹-۱۰) و جدول (۳) مقایسه شده اند. جدول (۳) نشان می دهد که نتایج دینامیکی به دست آمده از مدل ساده شده با مدل دقیق، درصد اختلاف کمی در پارامترهای جابه جایی، نیروی ضربه و انرژی جذب شده دارند و تطابق خوبی مشاهده می شود. لازم به ذکر است مقدار پارامتر جابه جایی، بسیار نزدیک به مدل دقیق (نزدیک به صفر) به دلیل استفاده از المان های تیر زیاد و هم چنین با درجه تابع شکل بالاتر به دست آمده است و این خود تأییدی بر صحت مدل ساده شده می باشد. در ادامه مقایسه ای بین مدل ساده شده و دقیق برای دو مقطع متفاوت مربعی و دایروی انجام شده است. نتایج مربوط به آن در نمودار میزان جذب انرژی سازه (شکل ۲۰ و ۱۵) آمده است. همان طور که ملاحظه می گردد بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به مقطع مربعی برای هر دو مدل ساده و

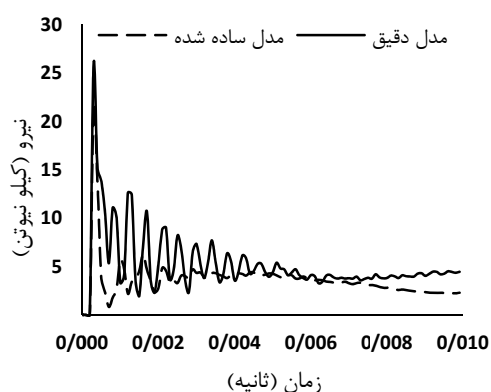
یکسانی از خود نشان می دهند [1, 3, 10]. شکل (۸) مدل دقیق شامل المان های پوسته ای و شکل (۹) مدل ساده شده را نشان می دهد که از روش مدل سازی لیو در مرجع [1] ایجاد شده است. در این مدل از المان های قنر چرخشی غیرخطی براساس رابطه (۱۴) برای مدل سازی خطوط محوری پلاستیک استفاده می شود. اساس این مدل ساده شده بر فنر پیچشی غیرخطی استوار است که در نقاط حساس مدل قرار می گیرد، پس برای تعریف المان فنر چرخشی غیرخطی در LS-DYNA، داده های ممان-زاویه مطابق شکل (۷) و رابطه تحلیلی (۱۴) به کار گرفته شده است. در مدل ساده شده گره پایانی تیر دارای خم، با ثابت نگه داشتن ۶ درجه آزادی به طور کامل مقید و تنها درجه آزادی، جابه جایی طولی برای گره ابتدایی آزاد شده است که در آنجا سرعت اولیه لحاظ گردیده است. به علاوه چون لوله دارای خم در صفحه دو بعدی تعریف شده است، قیدهای دیگری نیز بایستی به منظور جلوگیری از حرکت خارج از صفحه در نظر گرفته شود. ضمناً دو گره مشابه هم در مکان های المان فنری تعریف می شود. کلیه درجات آزادی آن ها به جز درجه آزادی چرخشی کوپل شده اند. جدول (۲) جزئیات شرایط ضربه و اطلاعات مدل های نرم افزاری را بیان می کند.

جدول ۲ مشخصات مواد، هندسه و شرایط ضربه

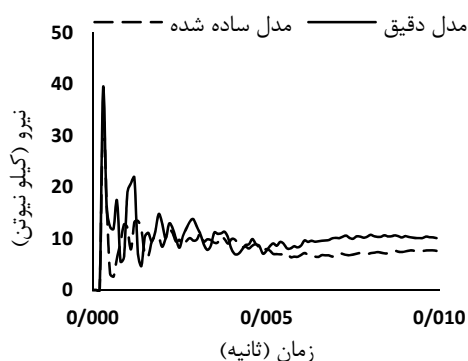
مدول یانگ	2.1 e11Pa
چگالی	7830 (Kg/m^3)
تنش تسلیم	2e8 Pa
مدول سخت شونده گی	6.3e8 Pa
ضریب پواسون	0.3
طول کل	1455 mm
قطر	50 mm
ضخامت	1.5 mm
جرم اضافه شده	400 Kg
سرعت اولیه	15m/s
زمان ضربه	0.01 sec



شکل ۱۲ انرژی جذب شده مدل دقیق و ساده شده مربعی



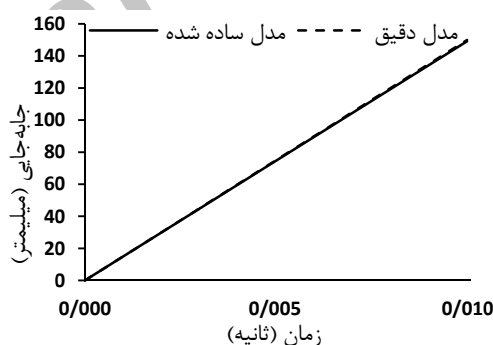
شکل ۱۳ نیروی ضربه برای مدل دقیق و ساده شده دایروی



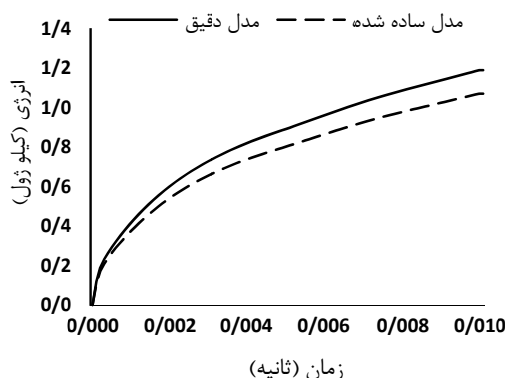
شکل ۱۴ نیروی ضربه برای مدل دقیق و ساده شده مربعی

اشکال (۱۶-۱۹) نیز فرم تغییر شکل یافته از مدل دقیق و ساده شده را نشان می دهند که تقریباً ساختار مشابهی بین آنها در هر دو مقطع مربعی و دایروی وجود دارد. در مجموع با بررسی نتایج و نزدیک بودن نتایج مدل ساده شده با مدل دقیق، صحت رابطه (۱۴) و نیز روش مدل سازی تأیید می شود.

دقیق است. از این طریق می توان بسته به اهمیت انرژی جذب شده یا نیروی وارد شده به سازه به انتخاب مقطع مناسب پرداخت. همان طور که از شکل های (۱۴-۱۱) مشخص است، اگر در طراحی میزان انرژی جذب شده مهم باشد بایستی از جاذب با مقطع مربعی و اگر نیروی وارد شده به سازه از اهمیت بیشتری برخوردار باشد بایستی از جاذب با مقطع دایروی استفاده شود. دلیل افزایش نیروی وارد به سازه با مقطع مربعی می تواند گوشه دار بودن سطح مقطع مربعی و به تبع آن ایجاد تمرکز تنش در سازه باشد. به عنوان مثال می توان به این موضوع اشاره کرد که جاذب های انرژی استفاده شده در قطار اکثراً از نوع دایروی و جاذب های انرژی استفاده شده در شاسی خودرو اکثراً مربعی می باشند.



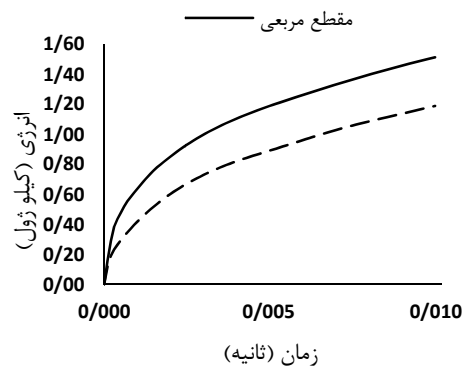
شکل ۱۰ جابه جایی کلی مدل های ساده شده و دقیق دایروی



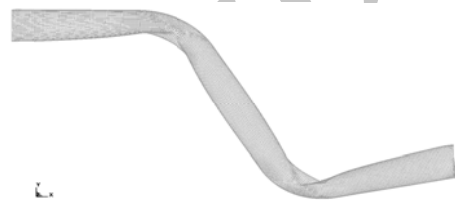
شکل ۱۱ انرژی جذب شده مدل دقیق و ساده شده دایروی

جدول ۳ مقایسه نتایج حاصل از مدل دقیق و ساده شده

برای مقاطع دایروی و مربعی						
مدل	مدل	درصد	مدل	مدل	درصد	
دقیق	ساده	اختلاف	دقیق	ساده	اختلاف	
دایره	مربع	(%)	دایره	مربع	(%)	
جابه جایی (mm)	۱۴۹	۱۴۸/۸	۰/۱۳	۱۴۹	۱۴۸/۹	۰/۰۶
نیروی ضربه (kN)	۲۵/۹	۲۱/۵	۱۶/۹	۳۹/۳	۳۴/۴	۱۲/۵
انرژی جذب شده (kJ)	۱/۱۹	۱/۰۷	۱۰	۱/۵۱	۱/۶۶	-۹/۹



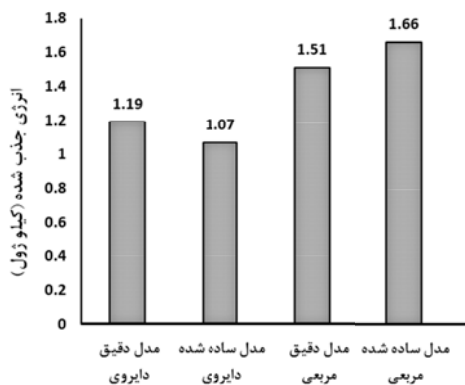
شکل ۱۵ انرژی جذب شده مدل های دقیق دایروی و مربعی



شکل ۱۶ مدل دقیق تغییر شکل یافته برای مقطع دایروی



شکل ۱۷ مدل دقیق تغییر شکل یافته برای مقطع مربعی



شکل ۲۰ مقایسه انرژی جذب شده

نتیجه گیری

این مقاله تخریب خمشی لوله های جدار نازک را به دلیل کاربرد فراوان در صنایع خودرو و ریلی با ارائه مدل ساده شده عددی بررسی می نماید. با شبیه سازی ضربه محوری و مقایسه نتایج و تئوری های منتشر شده صحت رابطه (۱۴) برای پیش بینی رفتار ضربه لوله های جدار نازک تأیید شده است که قابل کاربرد برای تخصیص المان های فنر چرخشی غیرخطی به مدل ساده شده می باشد. هم چنین مقایسه ای بین لوله های جدار نازک با مقاطع دایروی و مربعی صورت گرفته است تا بتوان از این مسیر برای بعضی از قطعات



شکل ۱۸ مدل ساده شده و تغییر شکل یافته برای مقطع دایروی



شکل ۱۹ مدل ساده شده و تغییر شکل یافته برای مقطع مربعی

نتایج در پارامترهای جابه‌جایی، نیروی ضربه و انرژی جذب شده ناچیز است، لذا از این تکنیک مدل‌سازی بحرانی که در مراحل اولیه طراحی برای ارزیابی تحلیل‌های ضربه و شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده می‌شود، می‌توان به‌منظور کاهش زمان محاسبات و صرفه‌جویی در منابع بهره برد.

شاسی خودرو با توجه به اهمیت انرژی جذب شده یا نیروی وارد به سازه انتخاب صحیحی صورت پذیرد. انتخاب نوع مقطع می‌تواند برای مثال در هنگام برخورد خودرو با موانع برای اتومبیل و سرنشینان بسیار مهم باشد. در انتها با مقایسه نتایج مربوط به مدل دقیق و مدل ساده شده مشاهده می‌گردد که درصد انحراف

مراجع

1. Liu YC, Day ML. "Simplified modelling of thin walled box section beam", *I.J. Crash*, Vol. 11, No. 3, pp. 263–272, (2006).
2. Hamza K, Saitou K, "Design optimization of vehicle structures for crashworthiness using equivalent mechanism approximations", *Journal of Mechanical Design*, pp. 127 / 485, (2005).
3. Liu, Y.C., "Development of simplified models for crashworthiness analysis", PhD thesis, Louisville, University of Louisville, (2005).
4. Wierzbicki, T., Recke, L., Abramowicz, W. and Gholami, T., "Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crush loading", *I. Compression. ComputStruct*, pp. 51(6):611–23. (1994).
5. Wierzbicki, T., Recke, L., Abramowicz, W., Gholami, T. and Huang, J., "Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crush loading"—*II. Bending. Comput. Struct.*, pp. 51(6): 623–41, (1994).
6. Kecman, D., "Bending collapse of rectangular and square section tubes", *Int. J. MechSci*, pp. 25 (9–10) 623–36, (1983).
7. Abramowicz, W., "Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams", *RozprInzEng Trans*, pp. 29(1):5–26, (1981).
8. Zheng, L. and Wierzbicki, T., "Quasi-static crushing of S-shaped aluminum front rail", *Int. J. crashworthiness*, pp. 9(2):155–73, (2004).
9. Mamalis, A., Manolakos, D., Loannidis M. and Kostazos, P., "Bending of cylindrical steel tubes: numerical modeling", *Int. J. Crashworthiness*, pp. 11(1):37–47, (2006).
10. Kim, HS, Kang, SY, Lee, IH, Park, SH. and Han, D.C. "Vehicle frontal crashworthiness analysis by simplified structure modeling using nonlinear spring and beam elements", *Int. J. crashworthiness*, pp. 2(1):107–17, (1996).

۱۱. خلخالی، ابوالفضل، درویزه، ابوالفضل، نریمان زاده، نادر و معصومی، ابوالفضل، «تحلیل تئوریک تغییر شکل‌های بزرگ در جاذب‌های انرژی S شکل»، هفدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، (۱۳۸۸).