

مشخصه‌یابی خواص مواد یک لوله با استفاده از تست فشار جانبی

گایان راتناویرا^{۱،۲}، یون دورانت^{۱،۲}، دانگ روآن^۲، شیگکی کینوشیتا^۲

۱ مرکز تحقیقات تعاونی CAST، IRIS، دانشگاه صنعتی سوئینبرن، هائورن، VIC ۳۱۲۲، استرالیا

۲ دانشکده مهندسی و علوم صنعتی، دانشگاه صنعتی سوئینبرن، هائورن، VIC ۳۱۲۲، استرالیا

دریافت شده در ۹ سپتامبر ۲۰۱۱، پذیرش در ۳۰ اکتبر ۲۰۱۱

چکیده

خصوصیات ماده یک عامل ضروری در تجزیه و تحلیل المان محدود (FEA) است، زیرا دقت خروجی‌های شبیه‌سازی به کیفیت داده‌های مواد ورودی بستگی دارد. تست‌های مرسوم مانند تست کشش تک محوره و تست فشار تک محوره دارای اشکالات و محدودیت‌هایی در مشخصه‌یابی مواد لوله‌ای شکل هستند. در این مقاله، یک روش بهبودیافته برای تعیین خواص یک لوله بر اساس تست فشار جانبی گزارش شده است.

خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم و مدول الاستیک از داده‌های آزمایشگاهی فشار جانبی به دست آمد. ضریب کار سختی ماده و توان کار سختی با استفاده از تحلیل المان محدود معکوس (IFEA) به دست آمد. روش پیشنهادی برای تعیین خواص مواد یک لوله آلومینیومی 6060T5 استفاده شد و با نتایج گزارش شده از تست‌های کشش تک محوره مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند برای پیش بینی آسان و دقیق خواص مواد لوله‌ای شکل بر اساس تست فشار جانبی استفاده شود.

کلمات کلیدی: تحلیل المان محدود، فشار جانبی، خواص مواد، ساختارهای لوله‌ای شکل

۱. مقدمه

امروزه پیش‌بینی تغییر شکل ساختاری در تصادفات به شدت بر تحلیل المان محدود (FEA) متکی است. FEA به دلیل انعطاف‌پذیری و دقتی که دارد، یک ابزار رایج برای شبیه‌سازی تغییر شکل ساختاری تحت بارهای خارجی به شمار می‌رود. به عنوان مثال، به منظور کاهش هزینه‌ی آزمایش‌های گران‌قیمت تکراری، در صنعت خودروسازی برای تجزیه و تحلیل تصادف مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدای از عوامل دیگر مانند اندازه‌ی مش‌بندی و شرایط مرزی، دقت شبیه‌سازی به کیفیت ورودی خواص مواد بستگی دارد. بنابراین، شناسایی خواص صحیح مواد برای دستیابی به خروجی شبیه‌سازی قابل اعتماد ضروری است.

سازه‌های لوله‌ای شکل با هدف افزایش جذب انرژی و کاهش وزن، معمولاً به عنوان اجزای در معرض تصادف خودرو مانند قوطی‌های تصادف^۱، میله‌های سپر و تیرک‌های تقویتی درب خودرو استفاده می‌شوند [۴-۱]. تست کشش تک محوره‌ی نمونه‌های دمبلی‌شکل^۲، رایج‌ترین و استانداردترین روش تست مورد استفاده برای تعیین خواص مواد است. با این حال، استخراج نمونه‌های تست استاندارد از لوله‌های با قطر کم (۷۵-۱۵ میلی‌متر) به دلیل انحنای لوله‌ها دشوار است. یک راه برای حل این مشکل، استفاده از لوله‌ای با قطر بزرگ‌تر از جنس همان ماده و با ضخامت جداره‌ی یکسان برای استخراج نمونه‌های تست استاندارد با انحنای جزئی است. روش دیگر این است که تست کشش مقطع کامل را با استفاده از یک مقطع از لوله با اندازه کامل انجام دهیم تا خواص مواد لوله را بدست آوریم [۵]. با این وجود، خواص مواد تعیین شده از این تست‌ها به جهت طولی (محوری) لوله محدود می‌شود. تعیین خواص مواد لوله در جهت عرضی (هوپ) برای شبیه‌سازی تغییر شکل در خمش ضروری است، زیرا تغییر شکل سازه در هر دو جهت طولی و عرضی صورت می‌گیرد.

^۱ Crash can

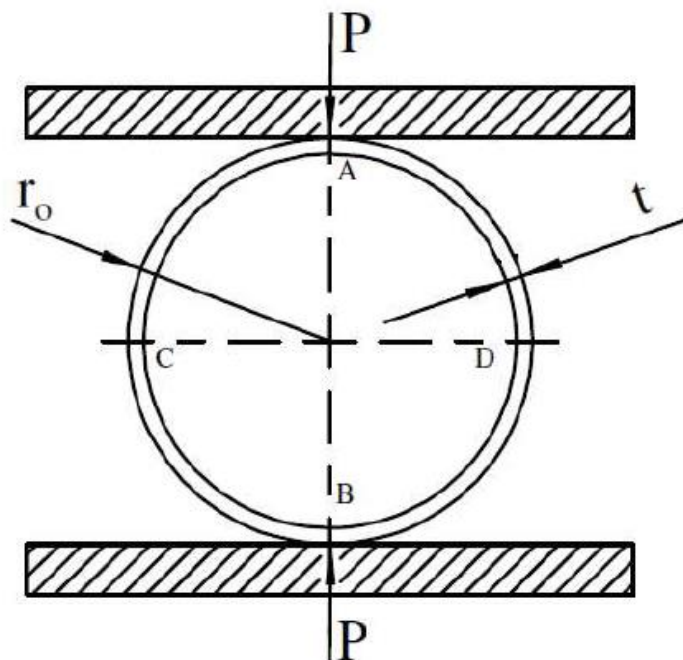
^۲ Dog bone

وانگ و همکاران [۶] یک تست کشش هوپ حلقه‌ای برای تعیین خواص مواد در جهت حلقه ایجاد کرده‌اند. آن‌ها از دو بلوک D در داخل نمونه‌ی حلقه‌ای استفاده کردند که باعث ازدیاد طول نمونه‌ها صرفاً در جهت حلقه می‌شد. با این حال، نتایج متأثر از اصطکاک و محدود به لوله‌های جدار نازک بودند. ردی و رید [۷-۹] یک مدل تحلیلی برای لوله تحت فشار جانبی معرفی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که تنش تسلیم، مدول الاستیک و کرنش شکست یک لوله را می‌توان از داده‌های تست فشار جانبی به دست آورد. با استفاده از بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی اثر اصطکاک، ردی و رید [۸] و لیو [۱۰] گزارش کردند که اصطکاک هیچ تأثیری بر رفتار تغییر شکل-بار در طول تست فشار جانبی لوله‌ها ندارد. این امر به تماس محدود و عدم لغزش بین دستگاه بارگذاری و لوله در طول تست فشار جانبی نسبت داده شد.

با این حال، ویژگی‌های ماده به دست آمده از مدل تحلیلی ردی و رید [۷-۹] در قالب منحنی‌های تنش-کرنش، که همراه با سایر خصوصیات ماده به عنوان ورودی FEA مورد نیاز است، نبود. با توجه به مطالب فوق، نیاز زیادی به روش‌های جدیدی وجود دارد که بتوانند ویژگی‌های مواد یک لوله را در عین غلبه بر معایب فوق مشخص کنند. نعمت آلا [۱۱] با استفاده از داده‌های تست فشار جانبی آواله و همکاران [۱۲]، یک روش معکوس را برای بازتولید منحنی تنش-کرنش حلقه‌ای برای یک لوله معرفی کردند، اما مقادیر دلخواه را برای مدول پلاستیک و ثابت بی‌بعد در نظر گرفتند و از یک تکنیک عددی غیرخطی برای محاسبه توان کار سختی n استفاده کردند، که شامل تکرارهای طولانی و محاسبات پیچیده بود. خو و همکاران [۱۳] یک روش معکوس تطبیقی را برای پیش‌بینی ضریب و توان کار سختی مواد لوله‌ای معرفی کردند. آن‌ها نشان دادند که پارامترهای مواد برای فولاد ضد زنگ 304L را می‌توان با خطای کمتر از ۲ درصد به دست آورد. متأسفانه، آن‌ها اشاره‌ای نکردند که چگونه خواص دیگری مانند تنش تسلیم، مدول الاستیک و کرنش شکست را برای شبیه‌سازی المان محدود خود به دست آوردند. هدف از این مطالعه ساده کردن روش معرفی شده توسط نعمت آلا [۱۱] برای تعیین خواص مواد یک لوله از طریق تحلیل المان محدود معکوس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فشار جانبی است.

۲. پیش‌بینی تنش تسلیم و مدول الاستیک از تست فشار جانبی

یک لوله دایره‌ای به صورت جانبی بین دو صفحه مسطح، موازی و صلب فشرده شد. هنگامی که صفحه بالایی به سمت پایین حرکت می‌کند، تماس بین دو صفحه و لوله در نقاط A و B شروع می‌شود، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. با افزایش بار، نواحی تماس با صفحه بارگیری صاف می‌شوند و لوله به صورت دو قوس دایره‌ای تا حد الاستیک تغییر شکل می‌دهد. هنگامی که بار به حد الاستیک می‌رسد، دو لولای پلاستیک در نقاط C و D ایجاد می‌شود. با ادامه افزایش بار، قطر عمودی لوله کاهش می‌یابد در حالی که خمش پلاستیک در مقطع CD رخ می‌دهد. یک منحنی بار-تغییر شکل در طول آزمایش فشار جانبی در شکل ۲ نشان داده شده است.

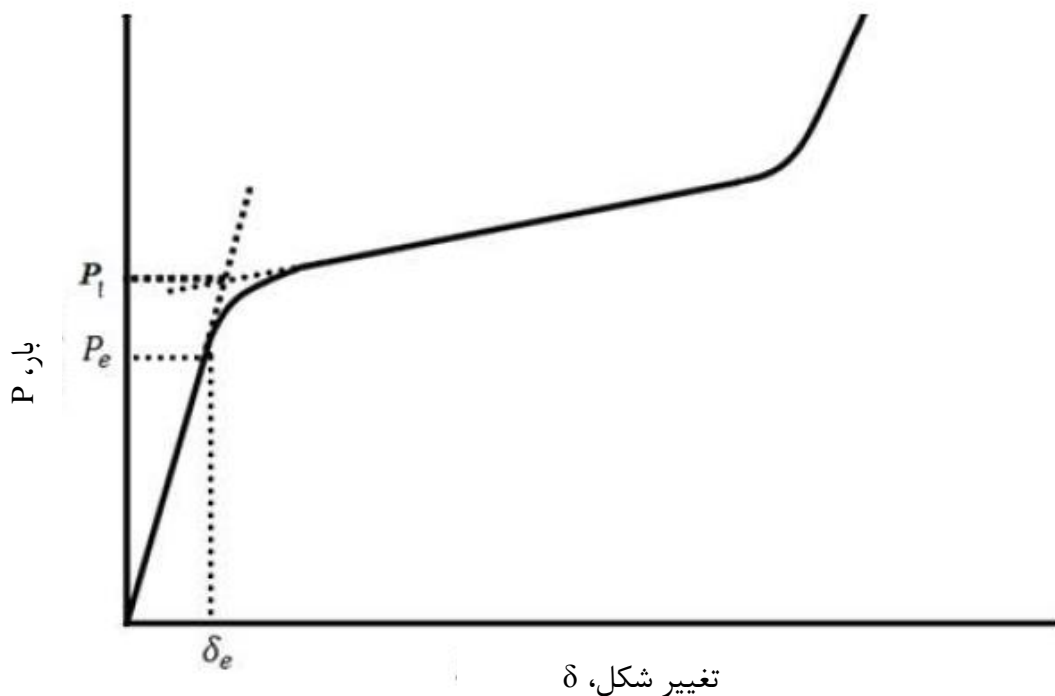


شکل ۱. شماتیک فشار جانبی لوله.

ردی و رید [۹] رابطه تحلیلی (معادله ۱) بین تنش تسلیم σ_y و بار حدی P_1 (یعنی باری که در آن تغییر شکل پلاستیک بزرگ شروع می‌شود) را برای یک لوله تحت فشار جانبی به شکل زیر برقرار کردند:

$$\sigma_y = \frac{\alpha P_1 r_o}{t^2 l} \quad (1)$$

که در آن، $\alpha = 1$ اگر $l \leq xt (1 \leq x \leq 5)$ و $\alpha = 0.866$ اگر $l > 2r_o$. بار حدی P_1 را می‌توان با ادامه دادن بخش‌های الاستیک و پلاستیک منحنی بار-تغییر شکل و تلاقی دادن آن‌ها بدست آورد، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. منحنی بار-تغییر شکل حین تست فشار جانبی [۱۱].

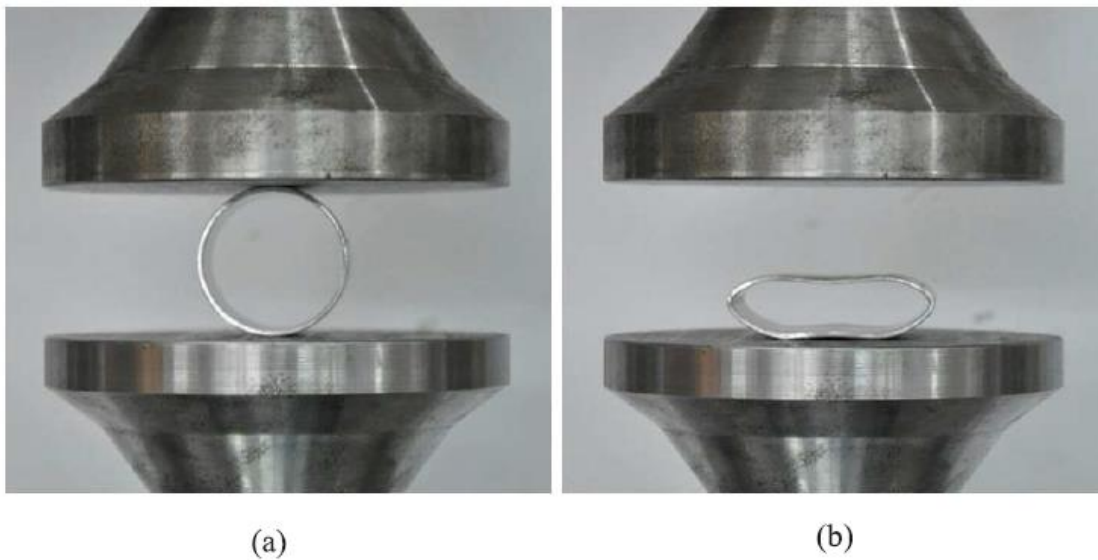
درانتز و هاگ [۱۴] از (معادله ۲) برای یافتن تغییر شکل الاستیک یک لوله در فشار جانبی استفاده کردند. این معادله را می‌توان برای به دست آوردن مدول الاستیسیته E یک لوله با استفاده از بار الاستیک P_e و تغییر شکل الاستیک δ_e از منحنی‌های بار - تغییر شکل به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$E = \frac{12P_e r_o^3 \beta}{\delta_e t^3 l} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) \quad (2)$$

که در آن، برای شرایط تنش صفحه‌ای $\beta = 1.0$ و برای شرایط کرنش صفحه‌ای $\beta = 1 - \nu^2$.

۳. نتایج و ستاپ آزمایشگاهی

تست‌های فشار جانبی شبه‌استاتیک بر اساس استانداردهای AS 2505.3-2004 [۱۵] و ISO 8492 [۱۶] انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تست جهانی MTS (مدل ۸۱۹) انجام شد. صفحه بالایی (شکل ۳) با سرعت ثابت ۰/۰۵ میلی‌متر بر ثانیه تا حداکثر جابجایی‌های ۲۰ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر به ترتیب برای لوله‌های با قطر خارجی (OD) ۳۲ میلی‌متر، ۴۰ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر حرکت داده شد. داده‌های نیروی واکنش و جابجایی با سرعت نمونه‌برداری ۱۰ هرتز ثبت شد. خلاصه‌ای از هندسه و خواص لوله تعیین شده از (معادلات ۱-۲) در جدول ۱ آورده شده است.

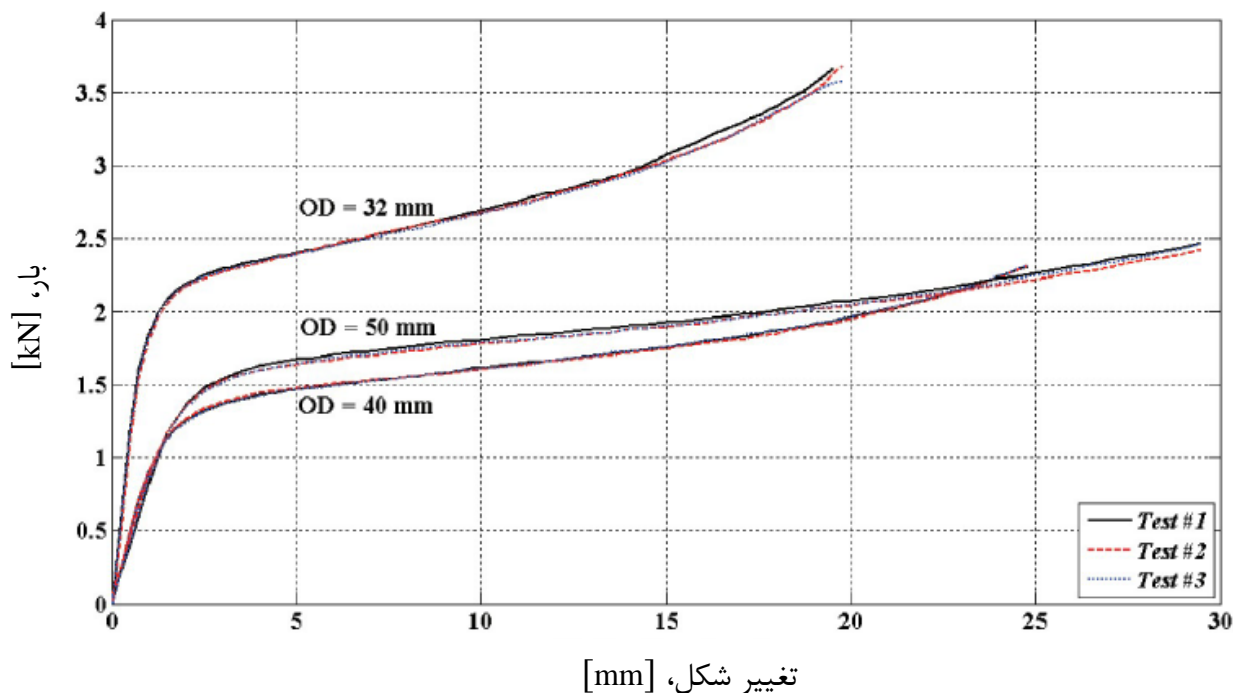


شکل ۳. ستاپ آزمایشگاهی فشار جانبی: (الف) شروع تست؛ (ب) اتمام تست.

جدول ۱. خلاصه‌ای از ابعاد و خواص لوله (از تست فشار جانبی)

| ماده | طول لوله (mm) | ضخامت جداره (mm) | قطر بیرونی (mm) | تنش تسلیم σ_y | مدول الاستیسیته E |
|--------------|------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|
| AA 6060T5 | ۵۰ ± ۰/۱ | ۱/۶ ± ۰/۰۲ | ۳۲ ± ۰/۱ | ۲۱۶ | ۶۳ |
| | | ۱/۶ ± ۰/۰۲ | ۴۰ ± ۰/۱ | ۱۷۸ | ۵۸ |
| | | ۱/۸ ± ۰/۰۲ | ۵۰ ± ۰/۱ | ۲۰۱ | ۷۰ |

منحنی‌های بار-تغییر شکل تست فشار جانبی به دست آمد و نتایج سه تست برای هر قطر تکرارپذیری خوبی را نشان داد، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است.

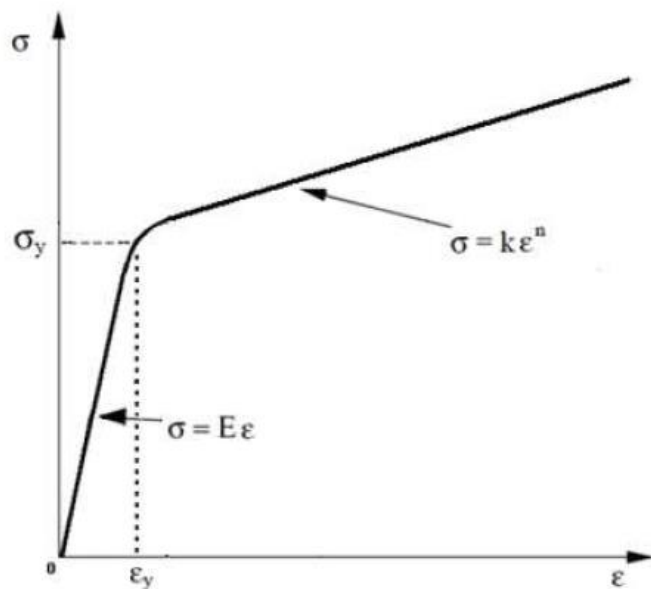


شکل ۴. منحنی‌های آزمایشگاهی بار-تغییر شکل برای تست‌های فشار جانبی لوله‌های آلومینیومی AA 6060T5 با قطرهای مختلف.

۴. تحلیل المان محدود معکوس (IFEA)

تحلیل المان محدود معکوس برای برآزش خروجی‌های FEA با داده‌های تجربی به منظور پیش‌بینی منحنی تنش- کرنش مواد لوله‌ای شکل تحت فشار جانبی استفاده شد. داده‌های تجربی بار-تغییر شکل و هندسه‌ی لوله برای محاسبه تنش تسلیم σ_y و مدول الاستیسیته E مواد لوله‌ای شکل با استفاده از (معادلات ۱-۲) استفاده شد.

رابطه بین σ_y ، E ، k و n با استفاده از قانون هوک (معادله ۳) و قانون توان (معادله ۴) به دست آمد. شکل ۵ رابطه بین دو مدل را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد، که در آن قانون توان برای قسمت کار سخت شدن و قانون هوک تا حد الاستیک ماده اعمال می‌شود.



شکل ۵. قانون هوک و قانون توان برای یک ماده ایزوتروپیک.

قانون هوک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

قانون توان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (4)$$

در نقطه‌ی تسلیم داریم:

$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (5)$$

$$\sigma_y = k\varepsilon_y^n \quad (6)$$

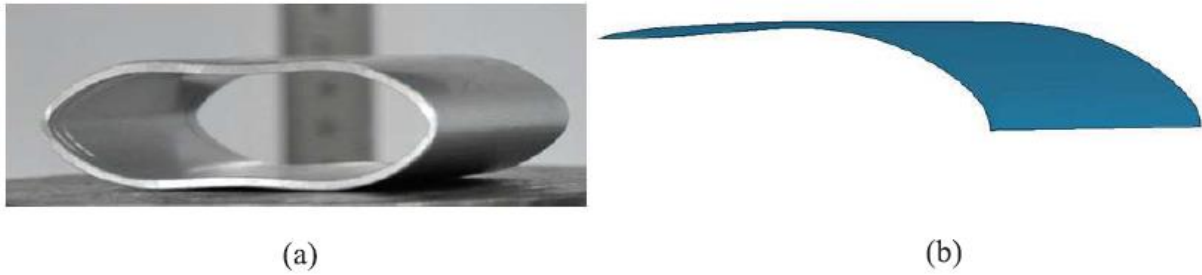
از (معادله ۵) داریم $\epsilon_y = \sigma_y/E$ و با جای گذاری در (معادله ۶) خواهیم داشت:

$$k = \frac{E^n}{\sigma_y^{n-1}} \quad (7)$$

توان کار سختی n ابتدا بین ۰ و ۱ تنظیم شد زیرا ضریب کار سختی اکثر فلزات بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد. مقدار متناظر برای k از (معادله ۷) محاسبه شد. ثابت‌های پیش‌بینی شده n و k به همراه مدول الاستیسیته E ماده به مدل المان محدود وارد شدند. منحنی بار-تغییر شکل تولید شده از خروجی‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شد. فرآیند فوق به طور مکرر با افزایش مقدار n به میزان ۰/۰۰۱ تکرار شد تا زمانی که خروجی شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مطابقت خوبی پیدا کرد. پارامترهای مواد زمانی بهینه در نظر گرفته شدند که تفاوت بین داده‌های تجربی و خروجی FEA کمتر از ۱٪ شود.

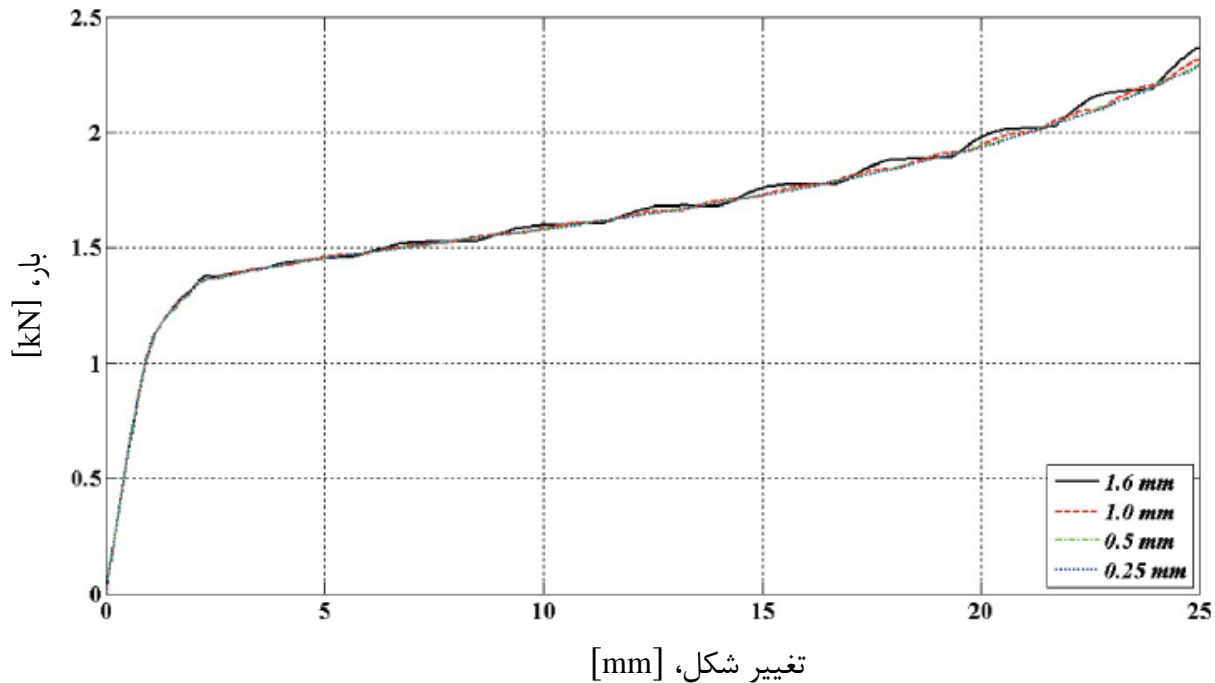
۵. نتایج و بحث

تحلیل المان محدود فشار جانبی لوله با استفاده از LS-DYNA [۱۷] انجام شد. با توجه به تقارن لوله، تنها یک چهارم لوله مدل‌سازی شد (شکل ۶). لوله با استفاده از المان‌های پوسته‌ای کاملاً یکپارچه با $IHQ = 6$ در کنترل ساعت‌شنی مدل‌سازی شد. برای مدل‌سازی مواد لوله‌ای شکل، از مدل پلاستیسیته‌ی همسانگرد قانون توان، MAT_018 استفاده شد. صفحه به دلیل مدول الاستیسیته بالا و تغییر شکل الاستیک ناچیز در مقایسه با لوله، به عنوان یک جسم صلب توسط MAT_020 مدل‌سازی شد. تماس SURFACE_TO_SURFACE بین لوله و صفحه استفاده شد و هیچ اصطکاکی بین آن‌ها تعریف نشد. حرکت شبه‌استاتیک صفحه با استفاده از دستور PRESCRIBED_MOTION_RIGID با فعال کردن حلال ضمنی در تحلیل ضمنی مدل‌سازی شد.



شکل ۶. مقایسه تغییر شکل لوله حین فشار جانبی: (a) تجربی (کل لوله)؛ (b) شبیه‌سازی FEA (یک چهارم لوله).

مطالعه‌ی مش‌بندی برای یافتن اندازه‌ی بهینه المان با هدف افزایش دقت شبیه‌سازی انجام شد. چهار اندازه‌ی مش‌بندی مختلف ۰/۲۵ میلی‌متر، ۰/۵ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر و ۱/۶ میلی‌متر برای شبیه‌سازی فشار جانبی لوله استفاده شد. اثرات اندازه مش‌بندی بر روی شبیه‌سازی منحنی‌های بار-تغییر شکل در شکل ۷ نشان داده شده است. نوسانات بار واکنش برای اندازه‌های مش ۱/۶ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر مشاهده شد، در حالی که سایر اندازه‌های مش‌بندی خروجی‌های مشابه و منحنی‌های صاف‌تری ایجاد کردند. زمان‌های محاسباتی برای هر اندازه مش‌بندی در جدول ۲ نشان داده شده است.



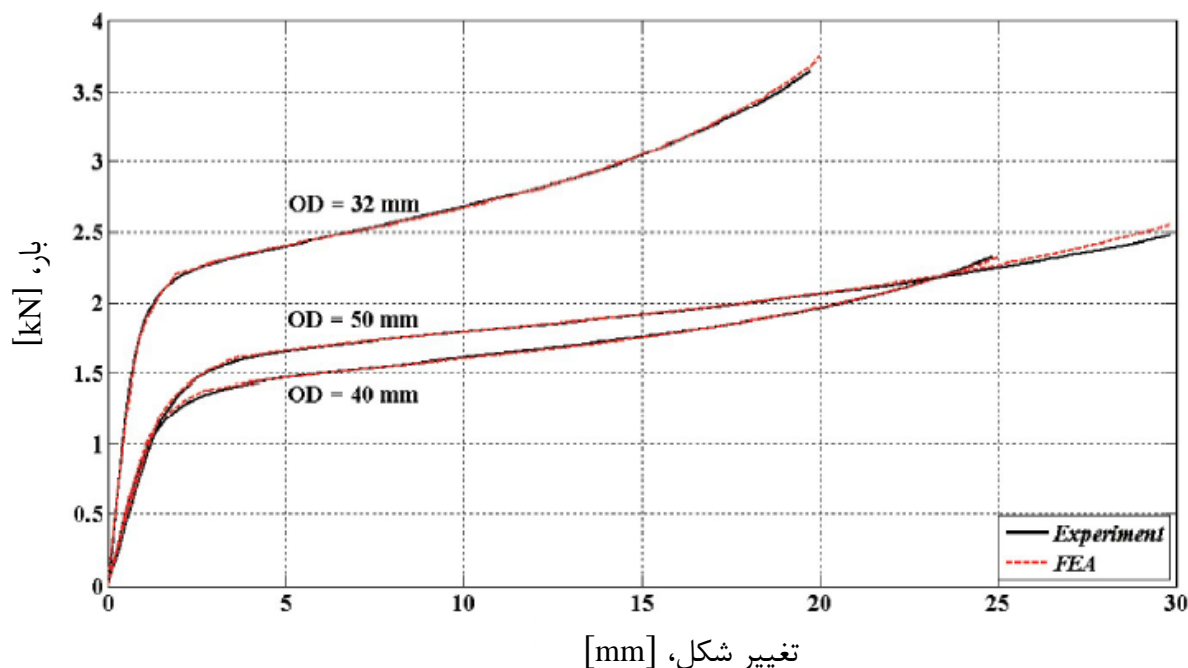
شکل ۷. اثر اندازه‌ی مش‌بندی بر خروجی FEA فشار جانبی لوله AA6060T5 به قطر ۴۰ mm.

جدول ۲. زمان‌های محاسباتی برای مطالعات اندازه‌ی مش‌بندی

| اندازه‌ی مش‌بندی | زمان محاسباتی |
|------------------|---------------------|
| ۱/۶ mm | ۸ دقیقه و ۹ ثانیه |
| ۱ mm | ۵ دقیقه و ۵۸ ثانیه |
| ۰/۵ mm | ۱۳ دقیقه و ۲۴ ثانیه |
| ۰/۲۵ mm | ۴۰ دقیقه و ۴۷ ثانیه |

تجزیه و تحلی با استفاده از دستگاه HP Z400 با سیستم عامل ویندوز ۷، ۶۴ بیتی انجام شد. اندازه مش‌بندی ۰/۵ میلی‌متر به عنوان اندازه عنصر بهینه برای مطالعه فعلی انتخاب شد زیرا دقت کافی شبیه‌سازی را در زمان محاسباتی معقول ارائه می‌کرد.

داده‌های تجربی به دست آمده از تست فشار جانبی لوله‌های آلومینیومی AA 6060T5، نشان داده شده در شکل ۴ و جدول ۱، برای تأیید روش پیشنهادی استفاده شد. تنش تسلیم σ_y و مدول الاستیسیته E با استفاده از (معادلات ۱-۲) محاسبه شد. تجزیه و تحلیل المان محدود معکوس فشار جانبی تا زمانی انجام شد که منحنی بار-تغییر شکل شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی با داده‌های تجربی پیدا کند، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است. میانگین درصد اختلاف نهایی بین منحنی‌های تجربی و FEA برای لوله‌های با قطر بیرونی ۳۲ میلی‌متر، ۴۰ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۰/۷۵، ۰/۷۴ و ۰/۳۱ درصد بود. در جدول ۳، خواص مواد بهینه شده با خواص به دست آمده از تست کشش تک محوره توسط کینوشیتا و همکاران [۱۸] و تست فشار جانبی توسط شن و همکاران [۱۹] مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که خواص لوله‌ها در جهت عرضی با قطر لوله تغییر می‌کند، حتی اگر لوله‌ها از یک ماده ساخته شده باشند. ممکن است برخی ناهمسانگردی‌ها در رفتار تغییر شکل لوله، یا تفاوت در کار سختی و عملیات حرارتی مواد به دلیل ساخت لوله‌ها با قطرهای مختلف در نتایج مشاهده شود.



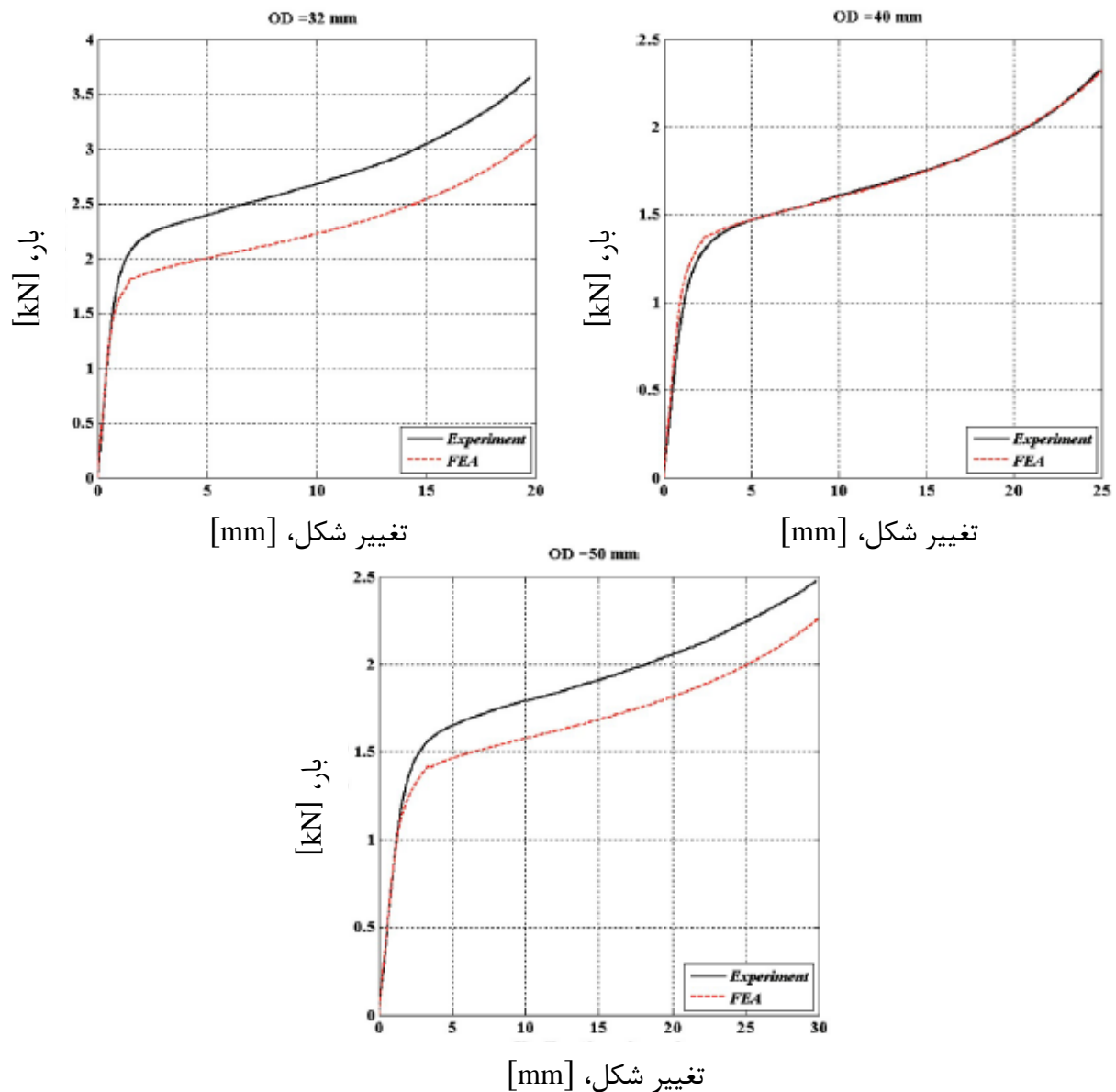
شکل ۸. مقایسه‌ی منحنی‌های بار-تغییر شکل تست فشار جانبی تجربی و پیش‌بینی‌شده توسط FEA برای لوله‌های AA 6060T5 با قطرهای مختلف.

جدول ۳. خواص مواد آلومینیوم AA 6060T5

| خواص ماده | استفاده از FEA از تست فشار جانبی | کینوشیتا و همکاران [۱۸] از تست کشش تک محوره | شن و همکاران [۱۹] از تست فشار جانبی |
|------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| | = OD ۵۰ mm | ۱۰۱/۶ mm = OD | ۵۰-۱۵۰ mm = OD |
| σ_y (MPa) | ۲۱۶ | - | ۱۷۰-۲۲۰ |
| E (GPa) | ۶۳ | ۶۷/۸۵ | ۶۹ |
| K (MPa) | ۳۴۰/۱۳ | ۲۸۲/۹ | - |
| n | ۰/۰۸ | ۰/۰۸۰۶۷ | - |

خواص مواد به دست آمده از تست کشش تک محوره برای لوله‌های AA 6060T5 با قطر خارجی ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱/۶ میلی‌متر توسط کینوشیتا و همکاران [۱۸] برای شبیه‌سازی فشار جانبی لوله‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر استفاده شد (شکل ۹). میانگین درصد اختلاف بین منحنی تجربی و منحنی FEA به

ترتیب برای لوله‌های با قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر، ۴۰ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر برابر با ۱۴/۸۴، ۱/۳۹ و ۱۰/۵۶ درصد بود. اختلاف کمتر برای لوله با قطر ۴۰ میلی‌متر ممکن است به دلیل ضریب k و توان n کار سختی مشابه باشد که در این مطالعه و مطالعه‌ی کینوشیتا و همکاران [۱۸] به دست آمده است.



شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی‌های بار-تغییر شکل تست فشار جانبی حاصل از داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده توسط FEA با

استفاده از خواص مواد ذکر شده در مطالعه‌ی کینوشیتا و همکاران [۱۸].

نتایج فوق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی روشی ساده و راحت برای به دست آوردن خواص مواد دقیق لوله‌ها در جهت عرضی است. علاوه بر این، خواص مواد به دست آمده از این روش می‌تواند برای شبیه‌سازی خمش لوله‌ها در جایی استفاده شود. که وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ شبیه به فشار جانبی است.

۶. نتیجه‌گیری

یک روش ساده برای مشخصه‌یابی آسان خواص مواد یک لوله معرفی شده است. این روش مبتنی بر تست‌های فشار جانبی و تحلیل المان محدود معکوس (IFEA) است. این روش برای پیش‌بینی خواص مواد بر روی لوله‌های آلومینیومی AA 6060T5 اعمال شد. مشخص شد که تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و قانون توان، که نمایانگر بخش کار سختی منحنی تنش-کرنش تعیین شده با روش پیشنهادی بودند، رفتار مواد را در جهت عرضی با دقت بیشتری توصیف می‌کنند، نسبت به زمانی که از داده‌های منابع به دست آمده توسط تست کشش تک محوره استفاده می‌کند. مقایسه خروجی‌های مدل تجربی و IFEA نشان داد که این روش می‌تواند به راحتی برای تعیین خواص عرضی مواد یک جزء لوله‌ای شکل، با استفاده از بخش‌های کوچک لوله و با دقت رضایت‌بخش استفاده شود. این روش همچنین می‌تواند بر اشکالاتی که در طول آزمایش کشش تک محوره، مانند نیاز به نمونه‌های دمبلی شکل مستقیم، و در طول آزمایش کشش حلقه، مانند اصطکاک بین دستگاه بارگیری و نمونه رخ می‌دهد، غلبه کند. مطالعات بیشتر در زمینه‌ی استفاده از این روش برای مواد و هندسه‌های مختلف لوله مورد انتظار است.

سپاسگزاری‌ها

حمایت از CAST CRC از طریق بورسیه تحصیلی کارشناسی ارشد تایید می‌شود. نویسندگان همچنین از کمک کادر فنی دانشکده مهندسی و علوم صنعتی تشکر می‌کنند.