

بررسی ملاک‌های تشخیص چروک در فرآیند هیدروفرمینگ لوله

سهیل نوایی نژاد، عبد الرحمن جامی الاحمدی*

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ آذر ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۶ فروردین ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۹ شهریور ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

هیدروفرمینگ لوله
چروکیدگی
روش هندسی
معیار مرکز حجم

چکیده: فرآیند شکل دهی هیدروفرمینگ لوله به شدت به مسیر بارگذاری و یا نمودار فشار- جابه جایی محوری وابسته است. سه واماندگی متداول این فرآیند شامل؛ گلوبی منجر به پارگی، کماتش و چروکیدگی از به کارگیری نامناسب مسیر بار نتیجه می‌شوند. برای تعیین مسیر بارگذاری مناسب در جلوگیری از وقوع چروکیدگی، پیش‌گویی چروک به روش‌های مختلف تحلیلی، عددی انجام می‌شود. معیارهای رایج پیش‌گویی واماندگی چروک در شبیه‌سازی اجزا محدود، یکی معیار مشتق اول چروک است که از تغییرات شیب منحنی لوله، وقوع پدیده چروک را پیش‌گویی می‌کند. دوم، معیار طول به سطح است که به منظور تشخیص چروک زنده و چروک مرده پیشنهاد شده است که برخلاف معیار قبلی علاوه بر اطلاعات لوله، به اطلاعات شکل قالب نیز نیاز می‌باشد. در این مقاله روش هندسی جدیدی به نام معیار مرکز حجم پیشنهاد شده است. براساس این معیار در قطعه چروک شده مراکز حجم قطعه فاقد چروک با قطعه چروک شده برابر نمی‌باشد. به منظور راستی آزمایی معیار معرفی شده، نتایج حاصل از چروکیدگی لوله در بادکردگی آزاد معیار جدید با نتایج معیارهای هندسی مورد استفاده رایج، و هم‌چنین لوله هیدروفرم شده به شکل پیچیده‌تر با نتایج پژوهش منتشر شده‌ای، مقایسه شده‌اند. لذا در مسیرهای بار یکسان، در شبیه‌سازی اجزا محدود نتایج این معیار به خوبی وقوع و شدت چروک را پیش‌گویی می‌کند.

۱- مقدمه

هیدروفرمینگ لوله^۱ یک روش پیشرفته برای تولید قطعات لوله‌ای با شکل‌های پیچیده است که تولید آن در روش‌های سنتی امکان پذیر نبوده و یا این که نیاز به چند مرحله تولید و فرآیندهای تکمیلی نظیر جوشکاری، خواهد بود. در این روش لوله در اثر فشار داخلی و همزمان تحت اثر نیروی محوری متورم می‌شود تا در تماس با سطح داخلی قالب قرار گرفته و محصول نهایی با شکل مشخص شکل می‌گیرد. شکل ۱ فرآیند هیدروفرمینگ لوله را نشان می‌دهد. به دلیل نیاز به قطعات با وزن سبک، استحکام بالا، صلبیت بالا و نیاز به تولید با هزینه‌های کم این روش کاربرد وسیعی در صنایع اتومبیل‌سازی برای تولید قطعاتی از قبیل میل بادامک، قاب رادیاتور، میل‌لنگ و... پیدا کرده است. شکل ۲ کاربرد این روش را در تولید قطعات بدنه خودرو نشان می‌دهد [۱، ۲].

حالت‌های اصلی واماندگی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است؛ شامل گلوبی و پارگی^۲، چروکیدگی^۳ و کماتش^۴ می‌باشند.

در این فرآیند اگر نیروهای فشاری محوری که در دو انتهای لوله اعمال

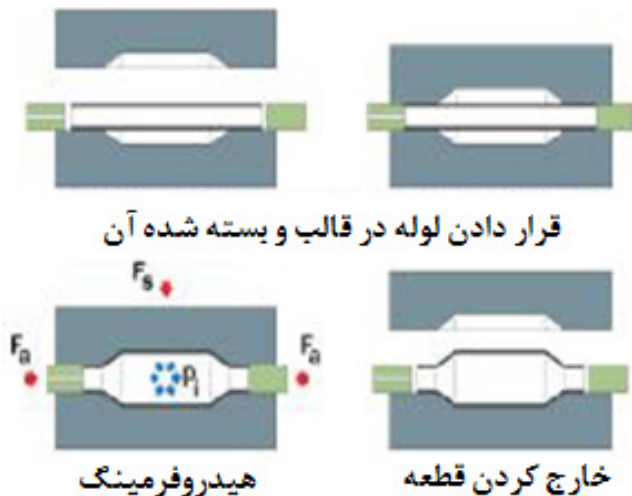


Fig. 1. Tube Hydroforming Process [2].

شکل ۱: فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۲]

می‌شوند بیش از اندازه باشند، انباشتگی زیاد ماده را در وسط سطح لوله در پی خواهد داشت که نتیجه آن عیب چروکیدگی خواهد بود [۳].

کوماتش در فرآیند هیدروفرمینگ لوله روی لوله با طول بلند و زمانی که نسبت قطر به ضخامت کم باشد، اتفاق می‌افتد. درحالی که چروک خوردگی روی لوله با طول‌های بلند و زمانی که نسبت قطر به ضخامت بالا باشد، دیده شده است [۴]. چروک خوردگی را می‌توان به صورت یک کماتش موضعی تعریف کرد. این حالت ناپایداری در مراحل اولیه و میانی فرم‌دهی و زمانی که

- 1 Tube hydroforming
- 2 Necking and Bursting
- 3 Wrinkling
- 4 Buckling

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jaami-a@um.ac.ir

گرفته است:

تیموشنکو [۹، ۱۰] با فرض کردن شرایط ایده‌آل (یکنواخت و همسان گرد بودن ماده، یکنواختی بارگذاری، صاف و بدون برآمدگی بودن لبه‌های لوله) معادله‌ای برای پیش‌بینی تنش فشاری محوری بحرانی را که سبب ایجاد ناپایداری به صورت چروک در قطعات لوله‌ای شکل می‌گردد، به دست آورد. با توجه به در نظر گرفتن شرایط ایده‌آل تفاوت زیادی بین نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج معادله تحلیلی وجود دارد.

کاک و آلتان^۴ [۱۱] به منظور تحلیل تنش فشاری محوری بحرانی برای پدیده چروکیدگی در هیدروفورمینگ لوله مدول تانژانت را جایگزین مدول الاستیک در معادله تیموشنکو کردند و دریافتند با استفاده از این مدل می‌توان شرایط اولیه برای انجام شبیه‌سازی اجزا محدود را پیش‌بینی کرد و سبب کاهش زمان استفاده از کامپیوتر می‌شود.

شیجیان یوان^۵ و همکارانش [۱۲] تنش بحرانی برای چروکیدگی تقارن محوری در هیدروفورمینگ لوله را از طریق جدا کردن آن به فاز الاستیک و چروک، به دست آوردند و نشان دادند که مدل تحلیلی جدید ارائه شده با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مطابقت خوبی دارد. آنان دریافتند که تنش بحرانی چروک برای لوله‌های طولی‌تر با افزایش نسبت تنش ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد؛ اما برای لوله‌های کوتاه‌تر همواره افزایش پیدا می‌کند یا به عبارتی دیگر، تنش بحرانی چروک برای لوله‌های طولی با افزایش فشار داخلی، کاهش اما برای لوله‌های بلند ابتدا کاهش و سپس افزایش خواهد یافت. آنان دریافتند با افزایش نسبت ضخامت به قطر تنش‌های بحرانی چروک بزرگ‌تری مشاهده خواهد شد.

در طراحی و تولید قطعات هیدروفورمینگ به منظور تولید قطعات سالم و بی‌عیب باید شرایط منجر به عیوب را شناخت در این راستا به دلیل قابلیت پیشگویی، حذف آزمایش‌های آزمون و خطا، کاهش هزینه‌ها و زمان طراحی قطعات روش‌های عددی همچون روش اجزا محدود^۶ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از جمله روش‌های تعیین چروکیدگی به وسیله روش‌های اجزا محدود می‌توان به روش‌های هندسی اشاره کرد.

شاخص اول معیار هندسی شیب^۷ که از طریق تغییرات شیب منحنی لوله که از محاسبه مختصات هر یک از گره‌هایی که توسط صفحه‌های گذرا از محور لوله قطع می‌شود، به منظور تعیین قله‌ها و دره‌ها در لوله برای تعیین چروکیدگی به کار می‌رود. در این معیار قطعه چروک شده دارای تغییر علامت شیب در راستای طول منحنی ایجاد شده توسط صفحه گذرا از محور لوله می‌باشد. اگرچه این معیار ساده‌ای می‌باشد ولی توانایی تشخیص منحنی چروک را در حالتی که منحنی قالب پیچیده باشد، دارا نیست [۱۳، ۱۴].

از آنجا که معیار هندسی شیب قابلیت تشخیص نوع چروکیدگی را دارا

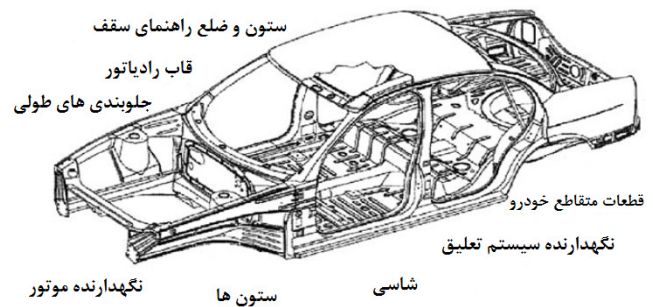


Fig. 2. Tube hydroforming products in automotive body applications [1].

شکل ۲: کاربرد محصولات هیدروفورمینگ در بدنه خودرو [۱]

بارگذاری محوری به حد بحرانی برسد، اتفاق می‌افتد. هرچند علت هر دو حالت چروک‌خوردگی و کمانش افزایش بار محوری است؛ ولی بسته به هندسه قطعه، یکی از این دو مورد اتفاق می‌افتد.

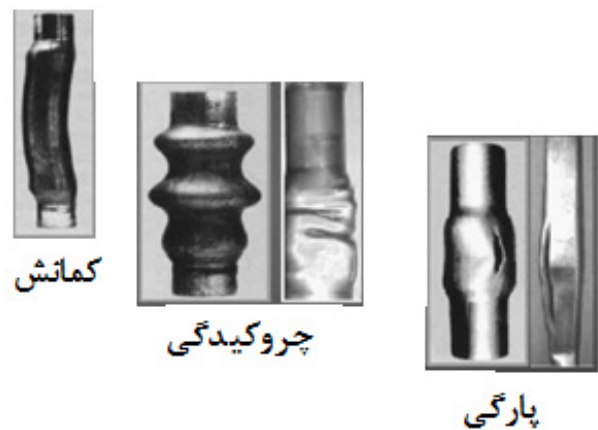


Fig. 3. Various failure modes in tube hydroforming [5].

شکل ۳: انواع عیوب در هیدروفورمینگ لوله [۵]

بک و میاگاوا^۱ [۶] لوله‌ای از جنس آلومینیوم را مورد آزمایش قرار دادند و دریافتند که مقدار تنش فشاری محوری بحرانی برای شروع پدیده چروکیدگی پلاستیک با افزایش تنش کششی محیطی، کاهش می‌یابد.

فوجی‌زاوا^۲ [۷] لوله‌ای از جنس فولاد ضد زنگ را به طور تجربی مورد مطالعه قرار داد و دریافت که تنش فشاری محوری بحرانی با افزایش فشار داخلی، افزایش می‌یابد.

باردی و کایری‌کایدز^۳ [۸] لوله‌ای از جنس فولاد ضد زنگ را مورد آزمایش قرار دادند. آنها تنش فشاری بحرانی را به منظور کاهش میزان افزایش فشار داخلی گزارش کردند و دریافتند که با افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله (D/t) میزان تنش بحرانی برای شروع چروکیدگی کاهش می‌یابد.

علاوه بر آزمایش‌های انجام شده کارهای تحلیلی متعددی نیز صورت

4 Koc and Altan

5 Shijian Yuan

6 Finite element method

7 geometric slope criterion

1 Back and Miyagawa

2 Fuchizawa

3 Bardi and Kyriakides

فشار داخلی در مرحله کالیبراسیون صاف می‌گردند و یک قطعه بدون عیب تولید می‌گردد) و چروک مرده^۶ (چروک‌هایی که پس از مرحله کالیبراسیون نیز همچنان باقی مانده و حذف نخواهند شد در نتیجه قطعه‌ای معیوب تولید خواهد شد) نمی‌باشد.

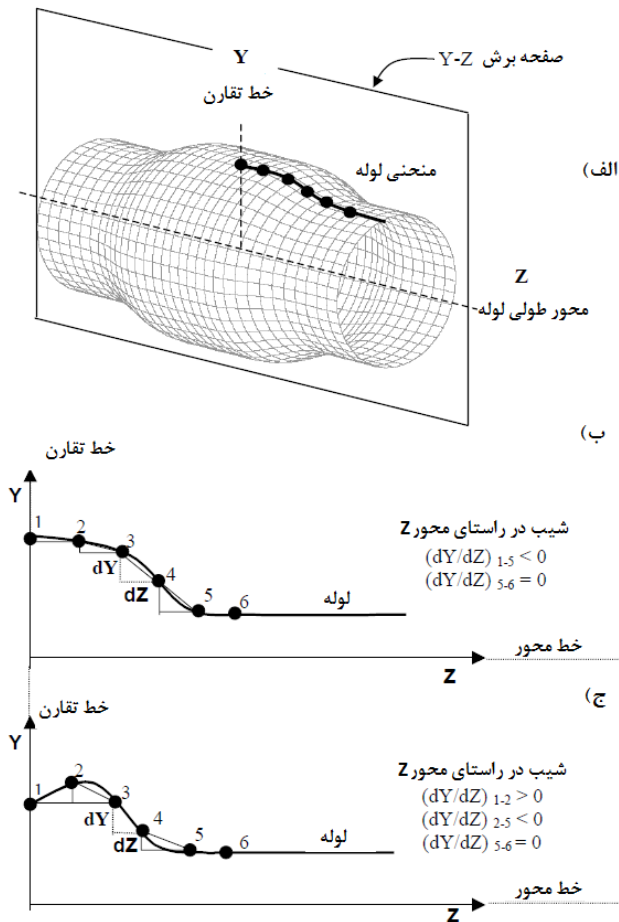


Fig. 4. a) Prescribed line on the bulge forming tube mesh, b) prescribed line seen on wrinkle-free part, c) prescribed line seen on wrinkled part [15].

شکل ۴: الف) منحنی لوله در فرایند بادکردگی آزاد از مدل لوله المان بندی شده ب) منحنی لوله بدون حضور چروک ج) منحنی لوله با چروک [۱۵]

۲-۲- معیار طول به سطح^۷

این معیار به منظور تشخیص میان چروک زنده و چروک مرده پایه‌ریزی شده است. با توجه به شکل ۵ برخلاف معیار مشتق اول چروک، در این معیار اطلاعات قالب علاوه بر لوله نیز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به پنجره کنترلی^۸، صفحه برش مار بر خط مرکز با لوله منحنی به طول L_i و با قالب منحنی به طول L_r را تولید می‌کند. باید توجه داشت که در این معیار پنجره کنترلی باید به قدر کافی بزرگ باشد تا تمامی مناطق شکل‌دهی (منطقه

نمی‌باشد؛ معیار جدید طول به سطح^۱ معرفی شده است. در این معیار وقتی طول منحنی لوله برابر طول منحنی قالب شود قطعه به طور کامل فرم‌دهی شده است و فاقد چروکیدگی می‌باشد؛ اما وقتی که منحنی طول لوله بزرگتر از طول منحنی قالب گردد، قطعه نهایی دارای تعدادی چروک می‌باشد؛ به طوری که هرچه طول منحنی لوله بزرگتر باشد چروک‌های بزرگتری ایجاد شده است. این معیار علی‌رغم سادگی و قابلیت تشخیص چروک تنها برای قطعات دارای تقارن محوری کاربرد دارد؛ زیرا برای حالت غیر تقارن محوری اطلاعات هندسی تنها توسط یک صفحه برش کافی نیست [۱۵].

از دیگر معیارهای هندسی تشخیص چروکیدگی در روش اجزا محدود می‌توان به معیار نسبت سطح به حجم سیال^۲ که به صورت نسبت سطح قطعه تغییر شکل یافته به حجمش تعریف می‌گردد، اشاره کرد؛ به طوری که در یک حجم داخلی برابر، قطعه چروک شده دارای سطح خارجی بیشتری نسبت به قطعه بدون چروک است. اگرچه این معیار نسبتاً ساده می‌باشد و برای تمامی اشکال هندسی عمومیت دارد ولی حجم محاسبات آن زیاد است [۱۶].

در این مقاله قصد این است که با معرفی معیار هندسی جدید، چروکیدگی در فرایند هیدروفرمینگ لوله بررسی و به منظور تأیید درستی آن با معیارهای هندسی معرفی شده قبلی و آزمایش‌های تجربی مقایسه شود.

۲-۲- ملاک‌های هندسی تشخیص چروک

۲-۱- معیار مشتق اول چروک^۳

شکل ۴ چگونگی تشخیص چروک را با در نظر گرفتن نحوه تغییرات شیب^۴ منحنی لوله نمایش می‌دهد. شیب منحنی توسط نقاط گره‌ای روی خط نمایش داده شده در شکل مذکور محاسبه می‌گردد. شیب (dY/dZ) به آسانی از طریق معادله (۱) که بیانگر مختصات دو گره همجوار می‌باشد، تعیین می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات شیب قطعه دارای چروک از مثبت به منفی تغییر علامت می‌دهد، در حالی که در قطعه فاقد چروکیدگی تغییرات شیب ثابت است.

$$\frac{dY_i}{dX_i} = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \quad (1)$$

در معادله بالا بازه i از مقدار ۱ تا n که تعداد نقاط گره‌ای برابر $n+1$ می‌باشد.

استفاده از این معیار به عنوان معیار تشخیص چروک وقتی که شکل قطعه پیچیده می‌شود به دلیل عدم توانایی در تشخیص شکل منحنی قالب از شکل هندسی چروک توسط این معیار، امکان پذیر نمی‌باشد. همچنین این معیار قادر به تشخیص تفاوت بین چروک زنده^۵ (چروک‌هایی که با افزایش

- 1 Length to Area Wrinkle Criterion
- 2 The ratio tube surface to fluid volume
- 3 First derivative wrinkle criterion
- 4 Slope variation
- 5 Alive wrinkle

- 6 Dead wrinkle
- 7 Length to area wrinkle criterion
- 8 Control window

انبساط و منطقه راهنما^۲) را شامل شود.

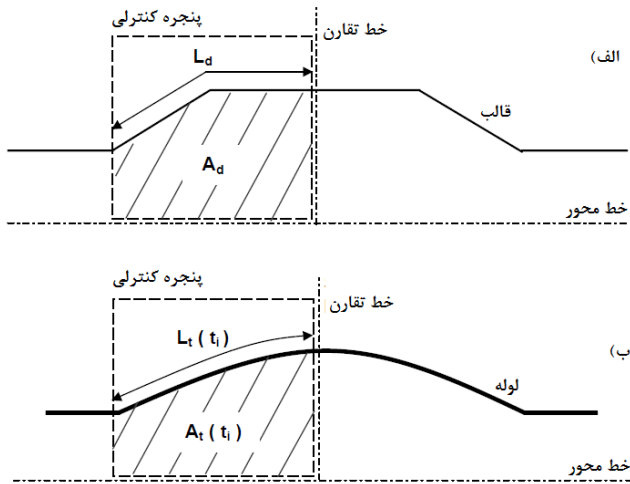


Fig. 7. Parameters used in length to area wrinkle criterion [15]

شکل ۷: نمایش پارامترهای مورد استفاده در معیار طول به سطح [۱۵]

با استفاده از معادله (۲) طول منحنی لوله و معادله (۳) مساحت محصور لوله، بی بعد می‌شوند.

$$\bar{L}(t_i) = \frac{L_t(t_i) - L_t(t_0)}{L_d - L_t(t_0)} \quad (2)$$

$$\bar{A}(t_i) = \frac{A_t(t_i) - A_t(t_0)}{A_d - A_t(t_0)} \quad (3)$$

در معادله بالا $\bar{L}(t_i)$ و $\bar{A}(t_i)$ به ترتیب طول و سطح بی بعد شده لوله در لحظه t_i از فرآیند می‌باشند.

با توجه به مقادیر به دست آمده از معادلات بالا، اگر:

$\bar{A} = 0$ قطعه در شروع انجام فرآیند است و هنوز هیچ گونه تغییر شکلی رخ نداده است.

$0 < \bar{A} < 1$ قطعه در حین انجام فرآیند می‌باشد.

$\bar{A} = 1$ قطعه کامل و با موفقیت شکل گرفته است.

و از تحلیل \bar{L} به عنوان شاخص تعیین نوع چروک، اگر:

$\bar{L} = 0$ قطعه در شروع انجام فرآیند می‌باشد و هنوز هیچ گونه تغییر شکلی اتفاق نیفتاده است.

$0 < \bar{L} < 1$ قطعه در حین انجام فرآیند می‌باشد.

$\bar{L} = 1$ در حالتی که $\bar{A} = 1$ باشد قطعه به طور کامل و صحیح شکل گرفته است.

$\bar{L} > 1$ قطعه ممکن است دارای چروک مرده باشد.

۲-۳- معیار جدید مرکز حجم

۲-۳-۱- معیار مرکز حجم

در این بخش معیار جدیدی معرفی می‌شود که در آن مرکز حجم لوله در هر لحظه از فرآیند به عنوان شاخص چروکیدگی شناخته می‌شود. در یک فرآیند هیدروفورمینگ لوله، در یک قطعه با حجم مشخص، مرکز حجم قطعه

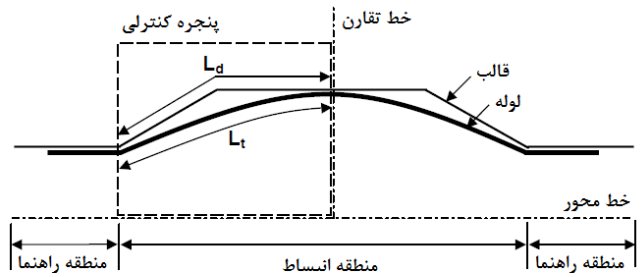


Fig. 5. Definitions of tube and die profile arch lengths [15].

شکل ۵: نمایش طول منحنی لوله و قالب در حین فرآیند [۱۵]

این معیار مبتنی بر این است که وقتی طول منحنی لوله برابر طول منحنی قالب شود قطعه به طور کامل شکل دهی شده است و فاقد چروکیدگی می‌باشد (شکل ۶ الف). در صورتی که طول منحنی لوله بزرگتر از طول منحنی قالب گردد قطعه نهایی دارای یک یا تعدادی چروک خواهد بود (شکل ۶ ب)).

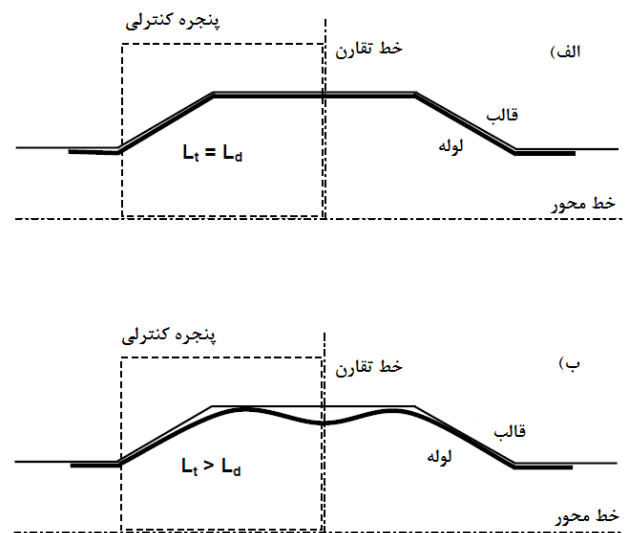


Fig. 6. Final part condition: a) without wrinkle, and b) with dead wrinkles [15].

شکل ۶: قطعه نهایی: الف) فاقد چروک ب) دارای چروک [۱۵]

به منظور تعیین نوع و شدت چروک متغیرهای زیر با توجه به شکل ۷ تعریف می‌شوند:

A_d : سطح محصور بین قالب و خط مرکزی در پنجره کنترلی

$A_t(t_i)$: سطح محصور بین منحنی لوله و خط مرکزی در پنجره کنترلی

و زمان t_i از فرآیند

$L_t(t_i)$: طول منحنی لوله در صفحه برش در پنجره کنترلی در زمان t_i

از فرآیند

- 1 Expansion zone
- 2 Guiding zone

به صورت بی‌بعد محاسبه می‌شوند. در شکل ۱۰ که به دلیل وجود تقارن یک‌چهارم لوله باد کرده مدل شده است با مرکز حجم آن نشان داده شده است.

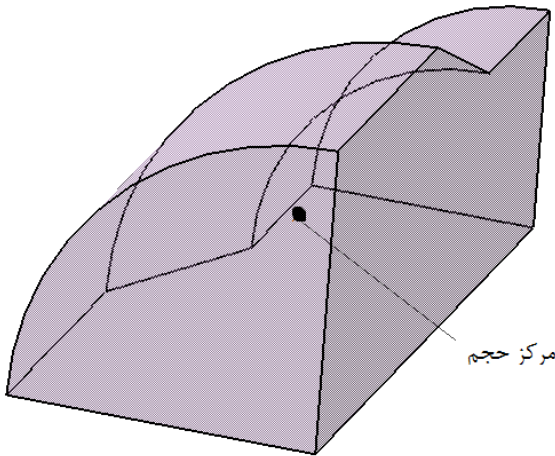


Fig. 10. A quarter of an assumed solid tube and its centroid
شکل ۱۰: نمایی از 1/4 لوله توپر فرض شده و مرکز حجم آن

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{X_v - X_{v_0}}{X_d - X_{v_0}} \\ \bar{y} &= \frac{Y_v - Y_{v_0}}{Y_d - Y_{v_0}} \\ \bar{z} &= \frac{Z_v - Z_{v_0}}{Z_d - Z_{v_0}} \end{aligned} \quad (۴)$$

که در معادلات بالا :

x_d, y_d, z_d مختصات مرکز حجم قالب به ترتیب در راستای x, y و z ،
 x_v, y_v, z_v مختصات مرکز حجم لوله به ترتیب در راستای x, y و z
در حجم v
 $x_{v_0}, y_{v_0}, z_{v_0}$ مختصات مرکز حجم لوله به ترتیب در راستای x, y و z
در حجم v_0 (زمان $t=0$) می‌باشند.
آنگاه بر طبق معادله (۴)، می‌توان نوشت:

$$\Delta_v = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2} \quad (۵)$$

به منظور استفاده از تغییرات حجم برای شناسایی و نشان دادن چروکیدگی لازم است تغییرات آن با یک تغییر شکل بدون چروک مقایسه شود. در بیشتر موارد، یک راه حل عملی به منظور ایجاد تغییر شکل فاقد چروک انجام تحلیل روش اجزا محدود ایده‌آل در وضعیت خود تغذیه‌ای^۱ تحت شرایط زیر می‌باشد:

- عدم وجود اصطکاک بین سطوح تماس قالب و لوله.
- عدم اعمال هرگونه شرایط مرزی لازم و یا طبیعی در لبه‌های لوله.

فاقد چروک با قطعه چروک شده برابر نمی‌باشد. در اینجا نحوه تعیین این شاخص چروکیدگی، عوامل موثر در محاسبات و فرضیات در نظر گرفته شده تشریح می‌گردند. فرض اصلی این مدل مبتنی بر این است که مرکز حجم، تابع افزایشی و به صورت یکنواختی از حجم است و حجم نیز تابع افزایشی یکنواختی از بیشترین ارتفاع بادکردگی می‌باشد. مفهوم ارتفاع بادکردگی در شکل ۸ نشان داده شده است.

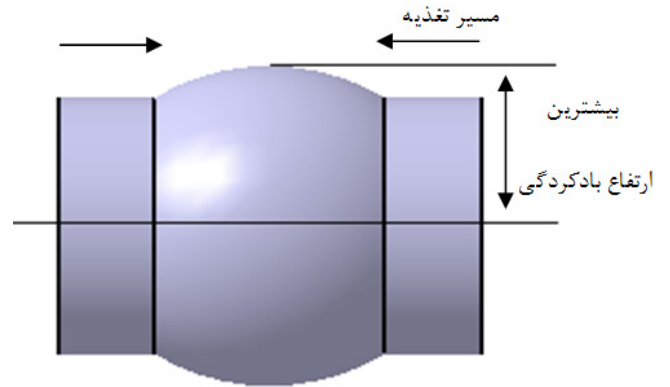


Fig. 8. Tube Hydroforming
شکل ۸: نمایی هیدروفرمینگ لوله

این دو فرض در نظر گرفته شده، وقتی درست است که تغییرات حجم (ΔV) در یک پنجره کنترلی مطابق شکل ۹ محاسبه گردد، زیرا با در نظر گرفتن منطقه راهنما در بعضی فرآیندهای هیدروفرمینگ (فرآیند هیدروفرمینگ لوله T شکل و...) حجم در طی گام‌های زمانی مختلف گاهی کاهش خواهد یافت.

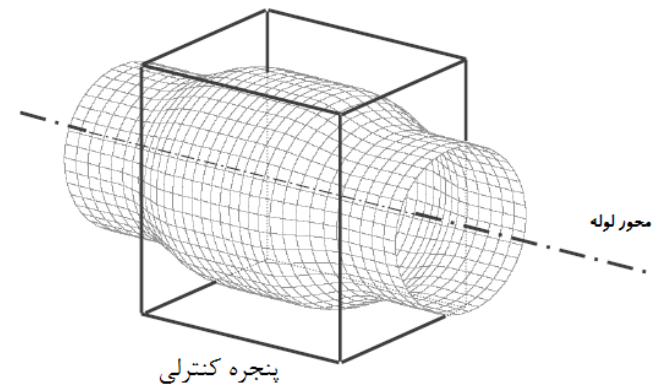


Fig. 9. A view of the control box for investigating volume and its related center of volume at any time of the forming process [15]

شکل ۹: نمایی از پنجره کنترلی در نظر گرفته شده برای بررسی حجم و مرکز حجم در هر لحظه از فرآیند [۱۵]

۲-۳-۲- نحوه محاسبه پارامترهای معیار پیشنهادی

در این معیار با انجام شبیه‌سازی و در نظر گرفتن لوله به صورت توپر در گام‌های زمانی مختلف حجم لوله استخراج و با استفاده از معادلات (۴) مراکز حجم در راستای محورهای اصلی از لوله برای حجم‌های تعیین شده

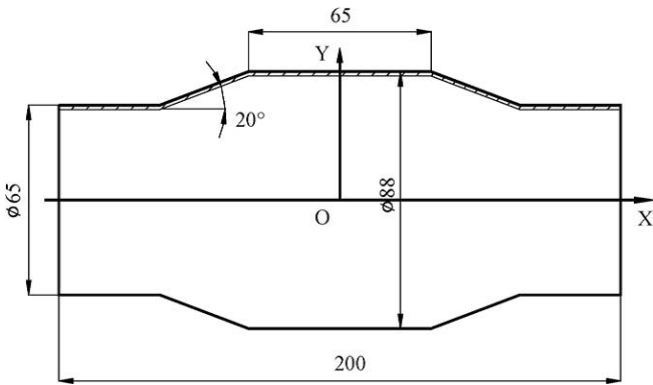


Fig. 11. Shape and dimensions of the simulated part in FEA [17].
شکل ۱۱: شکل و ابعاد قطعه شبیه‌سازی شده [۱۷]

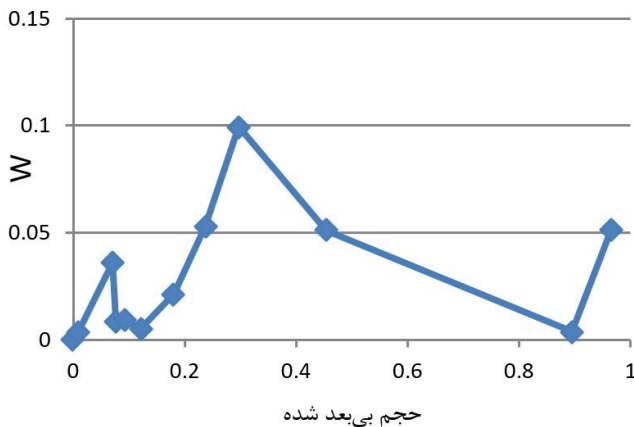


Fig. 12. The variations of wrinkle indicator as a function of volume during forming process due to the newly introduced geometric criterion
شکل ۱۲: تغییرات شاخص چروکیدگی معیار جدید معرفی شده در طی انجام فرآیند

همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود تغییرات شاخص چروکیدگی نسبت به حجم بی‌بعد شده در ۱۲ نقطه که حجم‌های دو فرآیند تغذیه محوری و خود تغذیه با یکدیگر برابر شده‌اند، نمایش داده شده است. هرچه مقدار انحراف w از صفر بیشتر باشد شدت چروک مشاهده شده هم بیشتر می‌باشد. از مقایسه با شکل ۱۳ و نتایج به دست آمده از انجام شبیه‌سازی اجزا محدود توسط نرم‌افزار آباکوس^۳ (شکل ۱۴)، دریافته می‌شود که معیار معرفی شده با آزمایش‌های تجربی مطابقت خوبی دارد.



Fig. 13. Wrinkled part at the end of process [17]
شکل ۱۳: قطعه چروک شده در پایان فرآیند [۱۷]

- افزایش فشار به صورت خطی.

لازم به ذکر است که شبیه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ لوله در حالت خود تغذیه‌ای، موردی است که در عمل کمتر کاربرد دارد و در اینجا تنها به عنوان یک مرجع برای محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حال با استفاده از معادله (۴) در هر لحظه از فرآیند مراکز حجم برای حالت خود تغذیه‌ای نیز به دست می‌آید و سپس با قرار دادن هر یک از مقادیر حاصله در معادله (۶) تغییرات مرکز حجم لوله برای حالت خود تغذیه‌ای محاسبه می‌شود.

$$\Delta_v^{self} = \sqrt{(\bar{x}_{self}^2 + \bar{y}_{self}^2 + \bar{z}_{self}^2)} \quad (6)$$

حال با معرفی w به عنوان شاخص چروک، آن را به صورت معادله (۷) می‌توان نوشت.

$$w = \Delta_{[v]} - \Delta_{[v]}^{self} \quad (7)$$

مقدار w را می‌توان به صورت تابعی از حجم بی‌بعد شده که با استفاده از معادله (۸) به دست می‌آید ترسیم کرد. بالا بودن مقدار شاخص چروکیدگی بالا بودن احتمال ایجاد چروک را در شبیه‌سازی اجزا محدود گزارش می‌کند. درستی محاسبه w بستگی به پارامترهای عددی تنظیمی دارد. به این دلیل باید پارامترهای شبیه‌سازی نهایی به‌طور دقیق با پارامترهای شبیه‌سازی خود تغذیه‌ای شبیه یا برابر باشد که مهم‌ترین این موارد عبارتند از:

- اندازه مش‌ها، زیرا اندازه مش‌ها تأثیر مستقیمی در حجم و مرکز حجم خواهد داشت.
- یکسان بودن زمان شبیه‌سازی دو فرآیند، زیرا هر دو به روش حل صریح^۱ انجام می‌شوند.

$$\bar{v} = \frac{v_{t_i} - v_{t_0}}{v_d - v_{t_0}} \quad (8)$$

در معادله بالا:

$v(t_0)$ و $v(t_i)$ به ترتیب حجم در زمان t_0 و t_i از فرآیند و v_d حجم قالب می‌باشد.

۲-۳-۳- مثال عملی برای نمایش کارایی معیار معرفی شده

به منظور ارزیابی کارایی، این معیار تشخیص چروکیدگی با معیارهای تشخیص پیشین و داده‌های تجربی شیجیان یووان^۲ [۱۷] مقایسه شده است. شکل ۱۱، ابعاد و اندازه‌های قطعه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. لوله از جنس آلیاژ آلومینیوم 5A02 با قطر خارجی ۶۵ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فرض شده است که ماده از قانون سخت‌شوندگی نمایی $\sigma = K\varepsilon^n$ پیروی می‌کند. تنش تسلیم ماده از قانون سخت‌شوندگی نمایی $\sigma_{0.2} = 81/5 \text{ MPa}$ ، تنش نهایی $\sigma_u = 184/6 \text{ MPa}$ و ضریب کرنش سختی $n = 0/205$ می‌باشد.

- 1 Explicit
- 2 Shijian Yuan

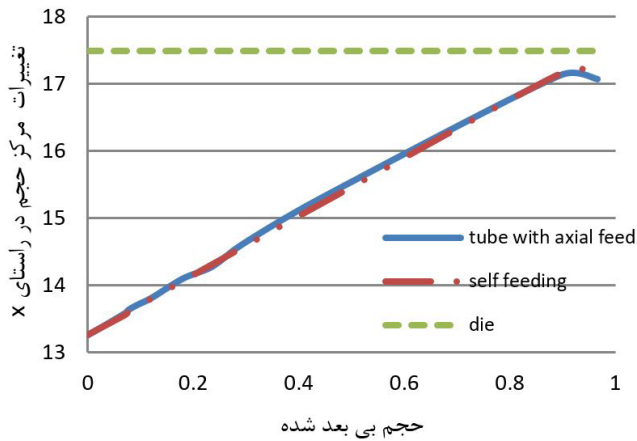


Fig. 17. Variation diagram of the center of volume coordinate in x direction versus normalized volume

شکل ۱۷: نمودار تغییرات مختصات مرکز حجم در راستای X

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در معیار شیب منحنی چنانچه تغییرات ناگهانی شیب از مقدار شیب مثبت به منفی یا بالعکس مشاهده شود، احتمالاً یک چروکیدگی رخ داده است. از این‌رو مطابق شکل ۱۸ در گره شماره ۲۶ چروک مشاهده می‌شود. با توجه به پیش‌بینی چروک توسط این معیار در انتهای فرآیند و مقایسه آن با نتایج حاصل از معیار جدید معرفی شده (اندازه شاخص چروکیدگی ارائه شده در انتهای فرآیند از شکل ۱۲) ملاحظه می‌شود که این معیار قادر است که به درستی چروک را پیش‌بینی کند.

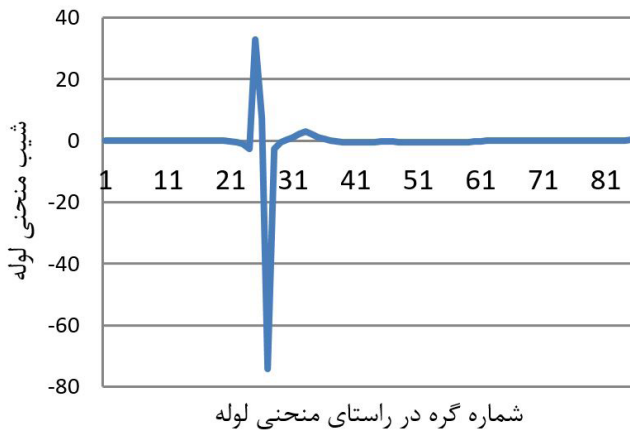


Fig. 18. Variation diagram of the tube profile slope versus node numbers on the tube length

شکل ۱۸: منحنی تغییرات شیب منحنی لوله در راستای طول لوله در انتهای فرآیند

همان‌طور که در هنگام معرفی معیار طول به سطح ذکر شد اگر $0 < A < I$ باشد و $L > I$ قطعه دارای چروک خواهد بود؛ حال با مقایسه شکل ۱۹ و شکل ۱۲ دریافت می‌شود که معیار جدید معرفی شده مبتنی بر مرکز حجم با نتایج حاصل از معیار طول به سطح هم، مطابقت درستی دارد.

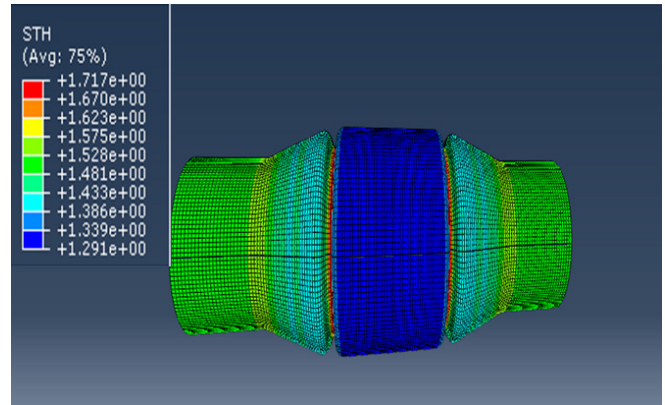


Fig. 14. Simulation result in ABAQUS

شکل ۱۴: نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار اجزا محدود آباکوس

با مقایسه شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ با شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که هرگاه حجم‌های دو فرآیند یاد شده برابر شده‌اند در حالی که مراکز مختصات آن‌ها از یکدیگر فاصله دارند، چروکیدگی اتفاق خواهد افتاد.

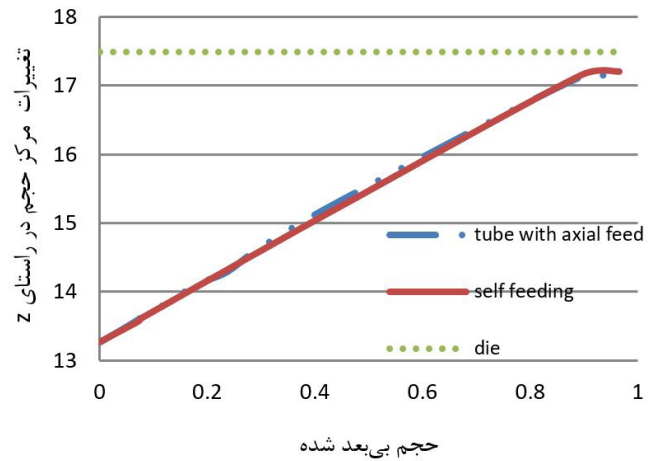


Fig. 15. Variation diagram of the center of volume coordinate in z direction versus normalized volume

شکل ۱۵: نمودار تغییرات مختصات مرکز حجم در راستای z

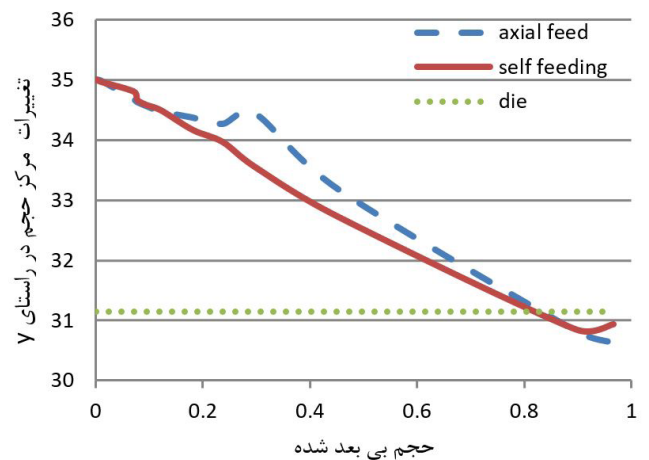


Fig. 16. Variation diagram of the center of volume coordinate in y direction versus normalized volume

شکل ۱۶: نمودار تغییرات مختصات مرکز حجم در راستای y

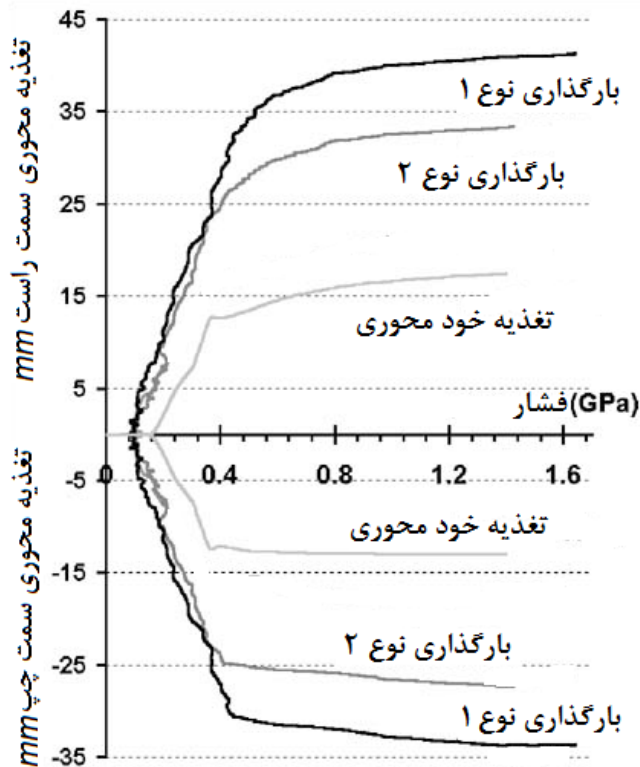


Fig. 21. Loading paths used for both experiments and simulations [16]
 شکل ۲۱: بارگذاری استفاده شده برای آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود [۱۶]

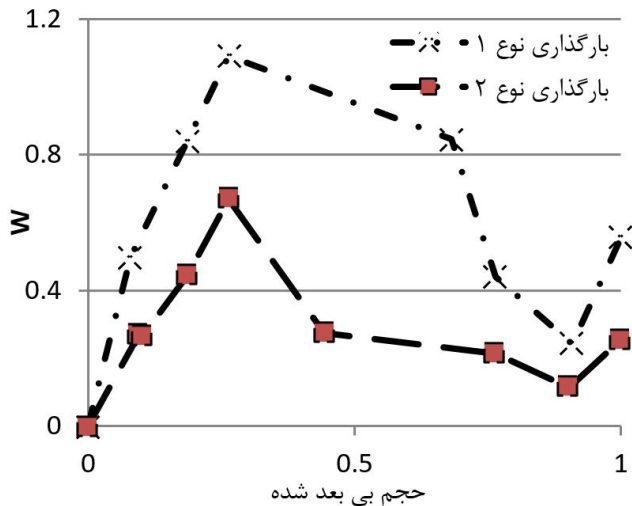


Fig. 22. Wrinkle indicator of new criterion for structural part
 شکل ۲۲: تغییرات شاخص چروکیدگی معیار جدید معرفی شده در طی انجام فرآیند

شکل‌های ۲۳ و ۲۴ قطعات چروک شده حاصل از آزمایش‌های تجربی را به ترتیب برای بارگذاری نوع ۱ و ۲ نمایش می‌دهند. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای مسیر بارگذاری ۱ (شکل ۲۵)، با قطعه بارگذاری متناظر (شکل ۲۳) حاکی از تطابق نزدیک شدت چروک و محل

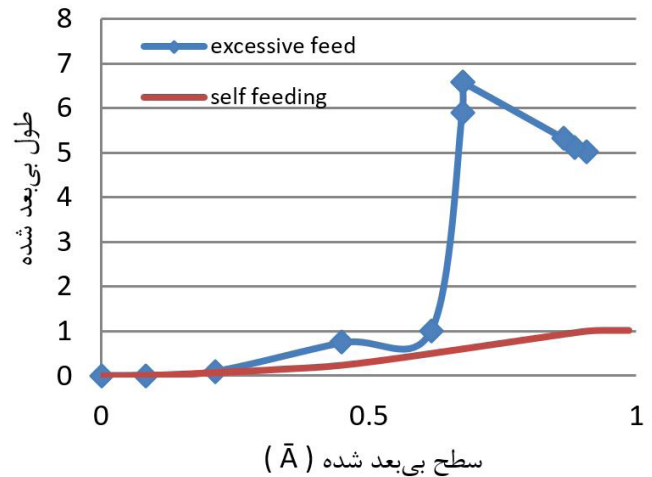


Fig. 19. Variation diagram of Normalized length versus normalized area based on the length-area criterion
 شکل ۱۹: نمودار نتایج تغییرات طول و سطح بی بعد شده حاصل از معیار طول به سطح

۲-۳-۴ مثال عملی برای نمایش کارایی معیار معرفی شده به منظور ارزیابی، کارایی این معیار تشخیص چروکیدگی با داده‌های تجربی استرانو [۱۶] مقایسه شده است.

ابعاد و اندازه‌های قطعه مورد مقایسه در شکل ۲۰ نشان داده شده است. جنس لوله فولاد ضد زنگ AISI 304 با قطر خارجی ۴۹/۳ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر است. فرض شده است که ماده از قانون سخت‌شوندگی سويفت^۱ به صورت $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ پیروی می‌کند [۱۶].

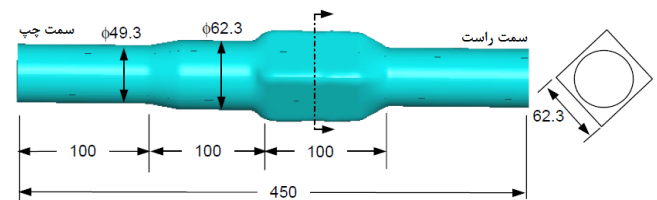


Fig. 20. Simulated structural part in ABAQUS [15]
 شکل ۲۰: شکل و ابعاد قطعه شبیه‌سازی شده [۱۵]

به منظور مقایسه بهتر شدت چروک، ۲ مسیر بارگذاری متفاوت در نظر گرفته شده است (شکل ۲۱). در بارگذاری نوع ۱ شدت وقوع چروک زیاد و چروک نهایی کاملاً مشخص می‌باشد (شکل ۲۲). در حالی که در بارگذاری نوع ۲ شدت چروک نهایی نسبت به نوع ۱ از شدت کمتری برخوردار است (شکل ۲۳).

نمودار تغییرات شاخص چروکیدگی نسبت به حجم بی بعد شده برای دو مسیر بارگذاری به‌طور جداگانه در شکل ۲۲ ترسیم شده‌اند. نقاطی که حجم‌های دو فرآیند با تغذیه محوری و خود تغذیه‌ای (برای هر دو نوع بارگذاری) با یکدیگر برابر شده‌اند، قابل مشاهده است. هرچه مقدار انحراف w از صفر بیشتر باشد بر این دلالت دارد که شدت چروک مشاهده شده هم بیشتر می‌باشد.

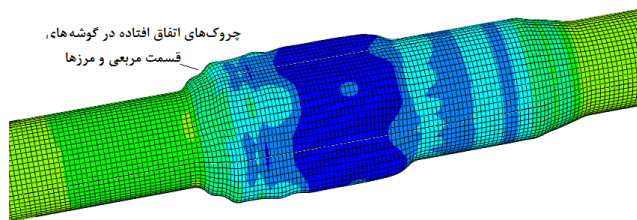


Fig. 26. Finite element analysis simulation results—load path, case 2

شکل ۲۶: نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مسیر بارگذاری ۲ در انتهای فرآیند

۳- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روش‌های هندسی پیش‌بینی چروکیدگی توسط روش اجزا محدود بررسی شده‌اند و سپس معیار جدیدی تحت عنوان معیار هندسی مرکز حجم پیشنهاد شده است. با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از این معیار جدید با معیارهای معرفی‌شده متداول و همچنین نتایج آزمایش‌های تجربی انجام‌شده توسط یوان (لوله با شکل ساده) و استرانو (لوله با شکل پیچیده)، درستی پیش‌گویی این معیار اثبات می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که:

- معیار جدید معرفی شده در عین سادگی نیاز به محاسبات پیچیده و طولانی ندارد.
- از آنجا که معیارهای متداول قابلیت تشخیص چروک در اشکال پیچیده و یا توانایی تشخیص نوع چروک را دارا نمی‌باشند این معیار به دلیل استفاده از اطلاعات سه بعدی قطعه و قالب قابلیت کاربرد برای انواع قالب‌ها با اشکال پیچیده را دارا می‌باشد.

منابع

- [1] E. Chu, Y. Xu, Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(2) (2004) 263-283.
- [2] F. Dohmann, C. Hartl, Hydroforming-applications of coherent FE-simulations to the development of products and processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 150(1-2) (2004) 18-24.
- [3] S. Yuan, Z. Tang, G. Liu, Prediction and analysis of wrinkling in tube hydroforming process, *International Journal of Materials and Product Technology*, 40(3-4) (2011) 296-310.
- [4] K. Khalili, S.E. Eftekhari Shahri, P. Kahhal, M.S. Khalili, *Wrinkling study in tube hydroforming process*, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2011, pp. 151-158.
- [5] J. Abrantes, A. Szabo-Ponce, G. Batalha, Experimental and numerical simulation of tube hydroforming (THF), *Journal of Materials Processing Technology*, 164 (2005)

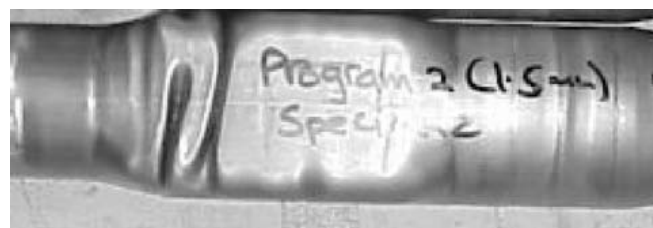


Fig. 23. Wrinkled part due to load path case 1; severe wrinkling can be observed [16].

شکل ۲۳: قطعه چروک شده برای مسیر بارگذاری ۱ در انتهای فرآیند [۱۶]

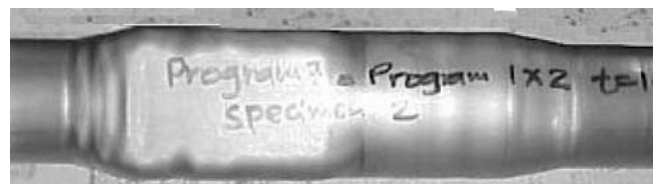


Fig. 24. Detail of final part due to load path case 2; slight wrinkling is visible [16].

شکل ۲۴: قطعه چروک شده برای مسیر بارگذاری ۲ در انتهای فرآیند [۱۶]

چروکیدگی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی است. همچنین در مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود برای مسیر بارگذاری ۲ (شکل ۲۶) با قطعه بارگذاری متناظر (شکل ۲۴)، نزدیکی تطابق شدت و محل چروک حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مشاهده می‌گردد. با توجه به این که معیار جدید مقدار شاخص چروکیدگی در انتهای فرآیند برای مسیر بارگذاری ۱ عدد ۰/۵۵ و برای مسیر بارگذاری ۲ عدد ۰/۲۵ را نشان می‌دهد، نشانگر این نکته است که شدت چروک ناشی از مسیر بارگذاری ۱ نسبت به ۲ بیشتر است. درستی این پیش‌گویی توسط معیار معرفی شده با مشاهده شکل‌های ۲۳ و ۲۴ تأیید می‌شود.

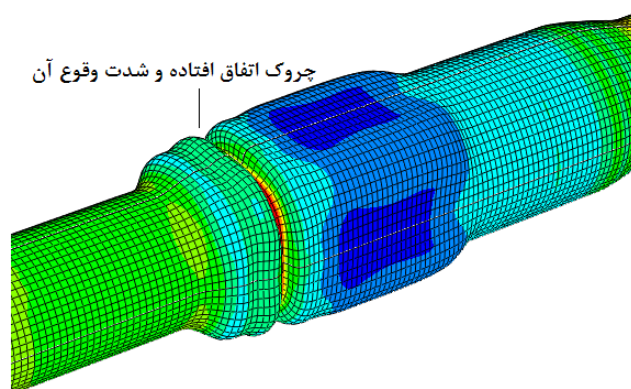


Fig. 25. Finite element analysis simulation results—load path, case 1

شکل ۲۵: نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مسیر بارگذاری ۱ در انتهای فرآیند

- Journal of Materials and Product Technology*, 40(3-4) (2011) 296-310.
- [13] M. Strano, S. Jirathearanat, S.-G. Shr, T. Altan, Virtual process development in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1) (2004) 130-136.
- [14] B. Teng, K. Li, S. Yuan, Optimization of loading path in hydroforming T-shape using fuzzy control algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8) (2013) 1079-1086.
- [15] S. Jirathearanat, *Advanced methods for finite element simulation for part and process design in tube hydroforming*, The Ohio State University, 2004.
- [16] M. Strano, S. Jirathearanat, T. Altan, Adaptive FEM simulation for tube hydroforming: a geometry-based approach for wrinkle detection, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 50(1) (2001) 185-190.
- [17] S. Yuan, W. Yuan, X. Wang, Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3) (2006) 668-671.
- 1140-1147.
- [6] C. Back, M. Miyagawa, The plastic deformation and strength of circular cylindrical shells under internal pressure and/or axial force (1st report, experiment), *Trans Jpn Soc Mech Eng*, 32(235) (1966) 447-456
- [7] Fuchizawa, Paper presented at the *38th Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity Proceedings*, (1987) 339
- [8] F. Bardi, S. Kyriakides, Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part I: experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(8) (2006) 830-841.
- [9] S.P. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, McGraw-hill, 1959.
- [10] S.P. Timoshenko, D.H. Young, *Theory of structures*, (1945).
- [11] M. Koc, T. Altan, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(1) (2002) 123-138.
- [12] S. Yuan, Z. Tang, G. Liu, Prediction and analysis of wrinkling in tube hydroforming process, *International*

Please cite this article using:

S. Navabi Nezhad and A. Jaamialahmadi, Investigation into Detection Criteria for Wrinkling in Tube Hydroforming,

Amirkabir J. Mech. Eng., 49(4) (2018) 829-838.

DOI: 10.22060/mej.2016.759

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

