

مدل سازی تغییر شکل استوانه‌ای ورق‌های نازک فلزی به روش کشش عمیق

نجم‌الدین عرب^۱، ارنست ناظاریان^۲، علی صفایی^۳

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

۲- استاد، دانشگاه دولتی ایروان، ارمنستان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

Najmarab@iauh.ac.ir

چکیده

مدل سازی روش‌های شکل دادن فلزات، فرآیندی است که به کمک آن می‌توان تصویری گویا از مراحل شکل دادن و میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر این فرآیند به دست آورد. اغلب مدل‌های ارائه شده در فرآیند کشش عمیق فلزات، از تغییر ضخامت ورق در حین کشش و نیز از اثرات اصطکاک صرف نظر کرده و با استفاده از مدل‌های دو بعدی، تحلیلی نامطمئن از این فرآیند را به دست می‌دهند. در این تحقیق علاوه بر در نظر گرفتن عوامل فوق، با ارائه مدلی سه بعدی، تحلیلی دقیق از فرآیند کشش عمیق استوانه فلزی ارائه شده که در مقایسه با سایر مدل‌ها، دارای همخوانی بیشتری با نتایج تجربی است.

واژه‌های کلیدی:

کشش عمیق، مدل سازی شکل دادن فلزات، شکل دادن ورق‌های نازک فلزی، شکل دادن استوانه فلزی.

۱- مقدمه

فنری، چروکیدگی، ناپایداری جریان پلاستیکی، شکست و سایر اثرات را به طور همزمان فراهم ساخته است [۱ و ۲]. فرآیند کشش عمیق از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول، ورق با قطر $2R_{ext0}$ و ضخامت h_0 با اعمال نیروی f_{bh} توسط نگهدارنده ورق در قالب قرار گرفته و در مرحله دوم، سمبه‌ای استوانه‌ای شکل با اعمال نیرو بر روی ورق آن را به داخل ماتریس می‌کشد. با کنترل نیروی نگهدارنده ورق، می‌توان سیلان فلز به داخل ماتریس را تحت کنترل قرار داد و آن را بهینه کرد، چرا که کنترل نیروی نگهدارنده قالب، ضریب اصطکاک ورود فلز به قالب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. معمولاً این مرحله تا کشش کامل استوانه ادامه می‌یابد. اما همیشه نمی‌توان با این عمل قطعه‌ای سالم به دست آورد و از آن جمله می‌توان به پارگی

مدل سازی ریاضی فرآیند شکل دادن ورق‌های فلزی، فرآیندی بسیار پیچیده است که علت آن به تغییرات تاریخچه بارگذاری و شرایط پیچیده ناشی از تغییر شکل برمی‌گردد. پارامترهای مرتبط با قوانین رفتار فلزات که در مدل سازی ریاضی شکل دادن ورق‌های فلزی به کار می‌روند، معمولاً از ساده‌ترین تست‌های مکانیکی نظیر کشش تک محوری برگرفته شده‌اند، که در بسیاری از مواقع نمایانگر شرایط واقعی تغییر شکل نیستند. اخیراً روشهای آزمایش جدیدی ارائه شده‌اند که به شرایط واقعی تغییر شکل، نزدیکتراند. در میان این آزمایشات جدید، کشش عمیق استوانه‌های فلزی، جایگاهی ویژه را به خود اختصاص داده چرا که امکان مطالعه کرنش سختی، شرایط اصطکاک، بازگشت

حال اهمیت این موضوع پیش می‌آید که با در نظر گرفتن شرایطی سه بعدی و همچنین تغییرات ضخامت در حین فرآیند کشش عمیق، مدلی دقیق‌تر و نزدیک‌تر به شرایط عملی را پیش‌بینی نماییم.

۲- ارزیابی مدل‌های کشش عمیق

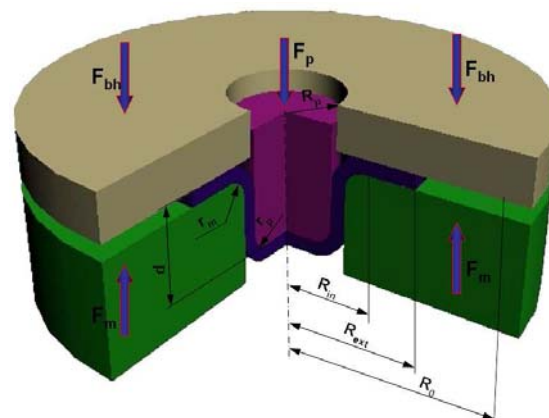
در شکل (۱)، نحوه انجام فرآیند کشش عمیق که با حرکت سمبه به‌داخل ماتریس در طولی معادل d انجام می‌شود، نشان داده شده‌است. ورق دارای قطر خارجی $2R_{ext}$ است که در طی مراحل کشش تغییر می‌کند و قطر داخلی استوانه $2R_{int}$ است که در طی مراحل کشش ثابت می‌ماند. شعاع ماتریس و پانچ به ترتیب r_m و r_p می‌باشند.

نیروی F_p که بر روی ورق اعمال می‌شود، در ابتدای فرآیند کشش عمیق افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن پدیده کار سختی است که در حین عملیات کشش ورق به‌داخل قالب در ورق اتفاق می‌افتد. لذا برای ادامه کشش باید نیروی بیشتری اعمال شود. در ادامه فرآیند و با کاهش قطر خارجی ورق، این نیرو کاهش پیدا می‌کند. شکل (۲)، تغییرات نیروی سمبه را به‌صورت تابعی از میزان حرکت سمبه، برای فولاد $DIN 22Mn Cr4$ که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) و خواص فیزیکی و تجربی آن در جدول (۲) آمده، نشان می‌دهد.

ورق فولادی با قطر اولیه ۱۴۱ میلی‌متر توسط نگهدارنده ورق با نیروی ۵۰۰۰ نیوتن فشرده شده و سپس توسط سمبه به‌داخل قالب کشیده می‌شود تا استوانه فلزی به‌دست آید در طی این عملیات، دو پارامتر اندازه‌گیری می‌شوند که عبارتند از نیروی سمبه و میزان جابجایی آن که توسط تجهیزات نصب شده بر روی سمبه اندازه‌گیری می‌شوند.

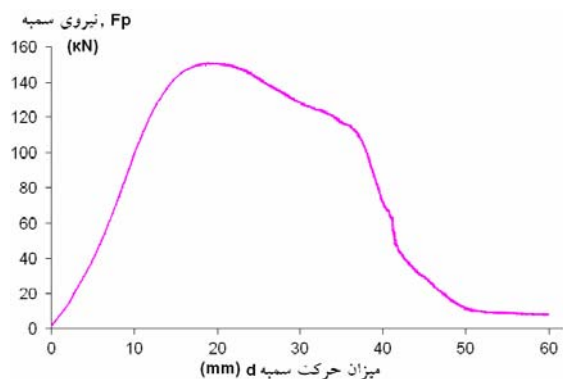
بر حسب حداکثر مقاومتی که ورق در برابر کشیده شدن از خود نشان می‌دهد، منحنی نیرو-جابجایی پانچ، یک مقدار حداکثر F_{pmax} را به‌دست می‌دهد.

نیروی اعمالی توسط پانچ از چندین جزء تشکیل شده‌است که عبارتند از:



شکل (۱): اجزاء مختلف قالب در فرآیند کشش عمیق.

دیواره قطعه استوانه‌ای شکل در حین فرآیند کشش اشاره داشت. واضح و مبرهن است که نیروی مقاومت فلز در برابر کشش، به‌نسبت قطر اولیه ورق به‌قطر پانچ $(2R_{ext0} / 2R_p)$ بستگی دارد که نسبت حد کشش (LDR) نامیده می‌شود. هر چه این نسبت بزرگتر باشد مقاومت ورق در برابر کشش بیشتر خواهد شد. با رعایت این نسبت می‌توان قطعات استوانه‌ای شکل سالم را تولید کرد. در یکی از اولین مدل‌های ریاضی ارائه شده، هیل مدلی را برای کشش استوانه‌ای ارائه داد که در آن برای مواد ایده‌آل که در آنها فرآیند کار سختی انجام نمی‌گیرد، حداکثر نسبت حد کشش معادل $LDR = 2/72$ محاسبه شده بود [۱]، که این مقدار با مقدار واقعی به‌دست آمده در مدل‌های واقعی اختلاف چشم‌گیری دارد. مدل‌های بعدی ارائه شده [۳-۷]، با در نظر گرفتن شکل هندسی قطعه و فرآیند کشش و به‌منظور تعیین تأثیر سرعت کرنش و سرعت اعمال تنش، مدل ارائه شده توسط هیل را بهبود بخشیدند. اما در تمامی مدل‌های ارائه شده فرضیاتی برای ساده‌سازی محاسبات صورت گرفته که به‌طور مثال عبارتند از عدم تغییر ضخامت استوانه در حین فرآیند شکل‌دهی، نادیده گرفتن میزان اصطکاک و همچنین می‌توان به‌استفاده از مدل‌های دو بعدی به‌جای مدل واقعی تر سه بعدی اشاره داشت، که این عوامل باعث به‌وجود آمدن اختلاف زیاد بین مدل‌های ارائه شده و اعداد به‌دست آمده از آزمایشات عملی می‌شود.



شکل (۲): نیروی سمبه به‌صورت تابعی از میزان حرکت سمبه.

$$F_{contr}^{rim} = 2\pi R_{int} h \left\{ \sqrt{\frac{2(f+1)}{2r+1}} \right\}^{n+1} k \quad (3)$$

نیروی اصطکاک در لبه ماتریس F_{fr}^{rim} ، متناسب با مقدار نیرویی درسمبه است که در فلنج ایجاد می‌شود:

$$F_{fr}^{rim} = (F_{contr}^{fl} + F_{fr}^{fl}) (e^{\mu\alpha} - 1) \quad (4)$$

نیروی مقاومت ورق در برابر کشش عمیق F_{fr}^{rim} ، غالباً به‌ضریب اصطکاک μ و زاویه تماس ورق با لبه ماتریس که معمولاً برابر $0/2\pi$ است، بستگی دارد.

در مدل‌های اولیه [۴-۱] از ارتباط لبه ماتریس و دیواره آن با نیروی سمبه صرف نظر شده‌است. این فرضیه به‌تنهایی می‌تواند باعث کاهش ۳۰-۲۰ درصد در صحت نتایج شود. روش‌های مختلفی وجود دارند که به کمک آنها می‌توان نیروی اصطکاک در فلنج F_{fr}^{fl} را محاسبه کرد [۵-۳]. تمامی این روش‌ها نیمه تجربی می‌باشند.

با فرض عدم تغییر ضخامت ورق، هیل معادله ذیل را برای محاسبه نیروی کاهش قطر ورق در حین عملیات کشش عمیق در فلزات فاقد کار سختی ارائه کرد [۱]:

$$F_{contr}^{fl} = \sigma_0 \left[\frac{2(r+1)}{2r+1} \right]^{1/2} \ln \frac{R_{ext}}{R_{int}} \cdot 2\pi h R_{int} \quad (5)$$

با این حال، تمامی روش‌های فوق فرضیات مهمی دارند که هم‌خوانی چندانی با شرایط واقعی ندارند. دو فرضیه مهم در این

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در تحقیق.

نوع فولاد	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%S
22MnCr4	۰/۲۳	۰/۳۵	۱/۱۳	۰/۶۸	Max	Max

جدول (۲): پارامترهای مکانیکی و تجربی.

نوع فولاد	استحکام کششی MPa	ضریب انیزوتروپی r	ضریب کار سختی k MPa
22MnCr4	۱۵۵	۲/۱	۶۱۰
توان معادله کار سختی n	ضخامت ورق میلی‌متر h_a	شعاع سمبه R_s میلی‌متر	شعاع ماتریس r_m میلی‌متر
۰/۲۶۳	۱	۳۰/۷۵	۸/۵

$$F_p = F_{contr}^{fl} + F_{fr}^{fl} + F_{contr}^{rim} + F_{fr}^{rim} + F_{bend} + F_{unbend} + F_{fr}^{s-w} \quad (1)$$

که در آن:

F_{contr}^{fl} : نیروی ناشی از پدیده کار سختی در فلنج.

F_{fr}^{fl} : نیروی ناشی از اصطکاک در فلنج.

F_{contr}^{rim} : نیروی ناشی از کار سختی ورق در لبه بیرونی ماتریس.

F_{fr}^{rim} : نیروی ناشی از اصطکاک ورق با لبه بیرونی ماتریس.

F_{bend} : نیروی ناشی از خمش در ابتدای لبه بیرونی ماتریس.

F_{unbend} : نیروی غیر خمشی در پایان لبه بیرونی ماتریس.

F_{fr}^{s-w} : نیروی اصطکاک در دیواره‌های ماتریس.

در اغلب مدل‌های ارائه شده، نیروی اصطکاک بین دیواره‌های ماتریس و ورق در نظر گرفته نشده‌است، چرا که تعیین مقدار آن بسیار مشکل بوده و نیز اصولاً تماسی بین دیواره استوانه فلزی و ماتریس وجود ندارد.

نیروی خمشی F_{bend} را می‌توان با استفاده از معادله ارائه شده توسط استاتون^۲ به‌صورت ذیل محاسبه کرد [۸]:

$$F_{bend} = 2\pi R_{int} \int_{no/2}^{s(y)} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

نیروی ناشی از کار سختی ورق در لبه ماتریس F_{contr}^{rim} ، متناسب با شعاع لبه ماتریس (r_m) است. این نیرو را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود:

$$\varepsilon = \frac{\bar{r}+1}{\sqrt{2(\bar{r}^2 + \bar{r}+1)}} \sqrt{d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_\theta^2 + d\varepsilon_z^2} \quad (10)$$

۶- قانون ثابت بودن حجم در تغییر شکل های پلاستیک:

$$d\varepsilon_r + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z = 0 \quad (11)$$

با استفاده از شرایط مرزی شناخته شده، عملیات شبیه سازی فرآیند به کمک نرم افزار Ansys انجام گرفت. سپس چون برای به دست آوردن منحنی های توزیع کرنش، احتیاج به سه پارامتر اصلی، کرنش طولی، کرنش شعاعی و کرنش ضخامت داریم، ضخامت و شعاع نقاط مختلف و همچنین قطر ورق قبل و بعد از فرآیند کشش عمیق اندازه گیری شد. سپس تنشهای شعاعی و طولی اندازه گیری شده و معادلات فوق برای کشش عمیق استوانه فلزی، حل شدند [۱۲].

برای مقایسه مدل های قبلی ارائه شده و همچنین مدل بحث شده در این تحقیق با شرایط واقعی، عملیات کشش عمیق با شرایط مرزی بحث شده، توسط پرسهای مکانیکی به صورت دقیق انجام گرفت. نتایج به دست آمده را با مدل های مورد نظر به مقایسه می گذاریم.

برای رسم منحنی های کرنش داریم:

$$\varepsilon_z = \ln S/S_0 \quad (12)$$

در رابطه بالا S_0 ضخامت اولیه که برابر 2mm و S ضخامت ورق بعد از کشش می باشد، که بیانگر کرنش ضخامت است.

$$\varepsilon_\theta = \ln P/r \quad (13)$$

در رابطه بالا r شعاع نقاط مختلف ورق قبل از کشش و P شعاع همان نقاط بعد از کشش می باشد.

$$\varepsilon_p = \Delta P/\Delta r \quad (14)$$

چون اندازه گیری ε_p مشکل است، لذا به جای اندازه گیری، از رابطه زیر استفاده شد:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\theta + \varepsilon_p = 0 \rightarrow \varepsilon_p = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \quad (15)$$

۴- مقایسه مدل های مختلف با نتایج تجربی

نتایج محاسبات با مدل جدید ارائه شده و به کمک مقادیر ارائه شده در جدول (۲)، با نتایج تجربی، مورد مقایسه قرار گرفتند.

ارتباط، عدم تغییرات ضخامت ورق در حین فرآیند کشش و نیز چشم پوشی از تأثیرات اصطکاک در حین فرآیند است.

در مدل ارائه شده در این تحقیق، روشی دقیق برای محاسبه نیروی کاهش قطر ورق $F_{\text{contr}}^{\text{fl}}$ و نیروی اصطکاک $F_{\text{fr}}^{\text{fl}}$ در فلنج ارائه شده، چرا که این عوامل بیشترین سهم را در نیروی سمبه دارند.

۳- تشریح مدل جدید

بر خلاف مدل های شرح داده شده [۷-۱] که عدم تغییر در ضخامت در ورق را مد نظر قرار داده و با تبدیل شرایط سه بعدی به دو بعدی، محاسبات را تسهیل می کردند، در مدل ارائه شده در این تحقیق، فرض شده که در هر نقطه از محل تماس نگهدارنده ورق با ورق، شرایط تنشی یکسان است.

این شرایط در هنگامی تحقق می یابند که نیروی نگهدارنده ورق توسط یک پمپ هیدرولیک تأمین شود [۹] و یا آنکه نیروی اعمال شده توسط نگهدارنده به ورق، پایین باشد [۱۰ و ۱۱].

در مدل ارائه شده، تعداد ۶ معادله اصلی مورد استفاده قرار گرفته اند.

۱- معادله تعادل در مختصات استوانه ای که در آن تنش های برشی ناچیز انگاشته شده اند:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} - 2\frac{\mu\sigma_z}{n} \quad (6)$$

۲- معادله کار سختی Ludwig:

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (7)$$

۳- معادله تنش مؤثر برای مواد ایزوتوپ ارائه شده توسط هیل:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\bar{r}+1}} * \quad (8)$$

$$\left[\bar{r}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 \right]^{1/2}$$

۴- قوانین شار پلاستیکی:

$$\frac{ds_r}{r(\delta r - \delta\theta) + (\delta r - \delta z)} = \frac{ds_\theta}{r(\delta\theta - \delta r) + (\delta\theta - \delta z)} \quad (9)$$

$$= \frac{ds_r}{(\delta z - \delta r) + (\delta z - \delta\theta)} = \frac{d\bar{s}}{(1+\bar{r})\delta}$$

۵- معادله کرنش مؤثر که توسط هیل ارائه گردیده است:

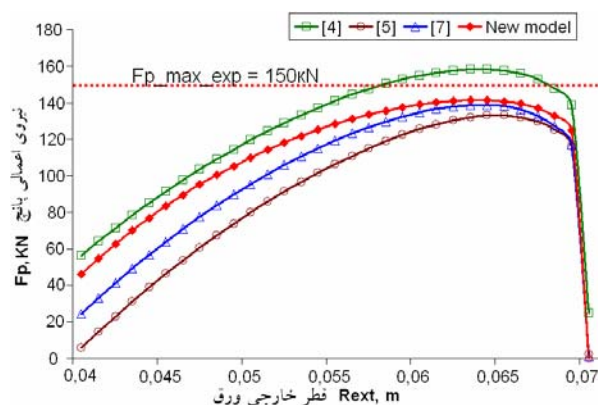
۴- با استفاده از نتایج به دست آمده با مدل جدید، می‌توان نسبت حد کشش (LDR) را با دقت بالاتری محاسبه کرد.

۶- مراجع

- [1] R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University press, [Chapter 12], 1950.
- [2] R. L. Whiteley, "The Importance of Directionality in Drawing Quality Sheet Steel", Trans: American Society of Mechanical Engineers, 52, p. 154, 1960.
- [3] P. Baque, E. Felder and J. Hyafil, "Mise En Forme Des Metaux", (Calcul Par la Plasticite) Tome 1. Edition Dunod, 1973.
- [4] Daw-Kwei Leu, "The Limiting Ratio for Plastic Instability of the Cup-drawing Process", Journal of Materials Processing Technology, 164, pp. 185-201, 1998.
- [5] R. K. Verma, S. Chandra, "An Improved Model for Predicting Limiting Drawing Ratio", Journal of Materials Processing Technology, 172, pp. 218-224, 2006.
- [6] B. Springub, B-A. Behrens, "Semi-analytical Identification of the Flow Curve Extrapolation in Onsideration of Martensite Evolution", Proceedings of the IDDRG 2006 Conference, Porte, pp. 75-82, 2006.
- [7] E. Schedin, Ph. D, Thesis, "Royal Institute of Technology", Stokholm, Sweden, 1991.
- [8] T. B. Stoughton, "Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", Proceedings of the 15th IDDRG, Dearborn, USA and Toronto, Canada, pp. 205-215, 1988.
- [9] S. H. Zhang and J. Danckert, "Development of Hydromechanical Deep Drawing", Journal of Material Processing Technology. 83, 1998.
- [10] E. Doege and L. E. Elend, "Design and Application of Pliable Blank Holder System for the Optimization of Process Conditions in Sheet Metal Forming", Journal of Material Processing Technology 111, pp. 182-187, 2001.
- [11] E. Nazaryan, N. Arab, M. Arakelyan and M. Markosyan, Mechanics of Forming Thin Ring Plates, International Deep Drawing Research Conference, IDDRG 2009, Golden, Co, USA.
- [12] E. Nazaryan, N. Arab, "Mechanics of Forming Thin Ring Plates with Circular Holes", Russian Machinery and Manufacturing Journal, No. 3, pp. 24-29, 2009.

۷- پی‌نوشت

- 1- Hill
- 2- Stoughton
- 3- Leu
- 4- Verma
- 5- Schedin



شکل (۳): نیروی سمبه بر حسب تابعی از شعاع بیرونی ورق.

در شکل (۳)، نیروی سمبه F_p به صورت تابعی از شعاع بیرونی ورق R_{ext} که با ۴ مدل مختلف لو^۳ [۴]، ورما^۵ [۵]، شدین^۶ [۷] و مدل ارائه شده در این تحقیق، محاسبه گردیده و همچنین حداکثر نیروی سمبه شکل (۲) که با آزمایشات تجربی به دست آمده، مقایسه گردیده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌های مختلف با مقدار تجربی $F_{p\ max}$ ، مشخص می‌شود که نتایج حاصل از مدل جدید ارائه شده، دارای دقت بالاتری است. مدل [۴]، مقدار $F_{p\ max}$ را بالاتر از مقادیر تجربی به دست می‌دهد حال آنکه ۳ مدل دیگر، مقدار آن را کمتر از مقادیر تجربی به دست می‌دهند.

۵- نتیجه‌گیری

۱- مدل‌هایی که در تحلیل فرآیند کشش مورد استفاده قرار می‌گیرند باید تغییرات ضخامت ورق و اثرات اصطکاک در حین فرآیند کشش را مد نظر قرار دهند. مدل‌هایی که تغییر ضخامت در فرآیند را در نظر نمی‌گیرند، تحلیل اثرات اصطکاک را بسیار مشکل می‌سازند.

۲- مدل پیشنهاد شده در این تحقیق، با ثابت دانستن نیروی اعمالی از طرف نگهدارنده ورق در تمام نقاط تماس با ورق، تعیین نیروی اصطکاک در فرآیند کشش را بسیار آسان می‌سازد.

۳- در مقایسه با سایر مدل‌های ارائه شده، مدل پیشنهادی در این تحقیق، هم‌خوانی بهتری با نتایج تجربی دارد.