



بررسی تحلیلی و تجربی اتساع ورق فولادی ناهمسانگرد DC04

حسین جاودانی^۱، مهدی گردویی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۰

چکیده

اتساع ورق‌های فلزی به علت اعمال تنش کششی بالا در حین شکل‌دهی و حذف برگشت فنری منجر به تولید قطعات پر استحکام با دقت ابعادی بالا می‌شود. در این پژوهش به بررسی تحلیلی-تجربی فرایند اتساع ورق فولادی DC04 به عنوان یکی از ورق‌های پر کاربرد در صنعت خودروسازی پرداخته شده است. در بخش تجربی با اجرای آزمون کشش تک‌محوری در زاویه‌های 0° ، 45° و 90° نسبت به راستای نورد ورق، ضرایب ناهمسانگردی پلاستیک، ثوابت سخت‌شوندگی مدل توانی و دیگر مولفه‌های مکانیکی جنس ماده به دست آمد. در ادامه مولفه‌های کرنش در نواحی مختلف قطعه با تحلیل روابط معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل-۴۸ مبتنی بر قانون جریان مرتبط محاسبه گردید. با نوشتن معادلات تعادل در سطوح تماسی ورق با اجزای قالب، اثر نیروهای اصطکاکی بر توزیع تنش-کرنش تعیین گردید. پس از طراحی و ساخت قالب و اجرای آزمون‌های تجربی اتساع، با سه جابجایی سنبه $10/5$ ، $15/75$ و 21 میلی‌متر بر روی نمونه‌های مش‌بندی شده، مقادیر کرنش، تنش و ضخامت اندازه‌گیری شد. در انتها خطای روش تحلیلی در مقایسه با نتایج آزمون تجربی برای این سه جابجایی به ترتیب برابر $15/8\%$ ، $4/7\%$ و $0/07\%$ به دست آمد.

کلمات کلیدی: اتساع؛ شکل‌دهی؛ ناهمسانگردی پلاستیک؛ حل تحلیلی؛ ورق DC04

Analytical and experimental investigation on stretch forming of an anisotropic DC04 steel sheet

A. Javdani¹, M. Gerdooei^{2*}

¹ Master of Manufacturing, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Associate Professor Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

Stretching of sheet metals due to the high applied tensile stress and elimination of springback leads to the production of high-strength parts with high dimensional accuracy. In this research, an analytical-experimental study of stretching of the DC04 steel sheet as one of the most widely used sheets in the automotive industry has been considered. In the experimental stage, by performing uniaxial tensile test at angles of 0° ، 45° ، and 90° with respect to the rolling direction of the sheet, the plastic anisotropy coefficients, the constants of the power-law hardening model, and the other mechanical factors of the material were obtained. Then the strain components in different areas of the specimens were calculated by using the Hill-48 anisotropic yield criteria based on the associated flow law. Using equilibrium equations at the contact surfaces of the sheet with the tooling components, the effect of frictional forces on the stress-strain distribution was determined. After designing and fabricating the apparatus and performing experimental tests, the values of strain, stress and thickness were measured with three displacements of punch stroke at 10.5, 15.75, and 21 mm on the specimens. Finally, comparing the results of analytical method with experimental observation, the magnitude of the errors for three mentioned punch strokes were obtained 15.8%, 4.7%, and 0.07%, respectively.

Keywords: Stretching; Forming; Plastic anisotropy; Analytical solution; DC04 sheet;

۱- مقدمه

اتساع^۱ فرایندی از کشش ورق‌های فلزی است که با ایجاد تنش کششی درون-صفحه‌ای بر روی ورق مسطح یا خمیده، باعث افزایش سطح و کاهش ضخامت ورق می‌شود [۱]. با استفاده از این فرایند می‌توان قطعاتی دقیق و پر استحکام را بر روی یک پرس ساده و قالب سنبه و ماتریس تولید کرد [۲] بر خلاف فرایندهای خم‌کاری و کشش عمیق که کرنش سختی تنها در شعاع خم سنبه و ماتریس ایجاد می‌شود، در اتساع به علت نیروی بالای ورق‌گیر، تنش کششی گسترده در کل ورق به وجود می‌آید که باعث افزایش سطح تنش به مقادیری بالاتر از استحکام تسلیم و نزدیک شدن مقدار آن به استحکام نهایی می‌شود. از فرایند اتساع برای استخراج منحنی‌های شکل‌پذیری ورق‌ها نیز استفاده می‌کنند. در این بخش فعالیت‌های پژوهشی انجام شده مرتبط با موضوع این پژوهش مرور خواهد شد. زهرانی و همکاران [۳] در پژوهش خود با استفاده از روش پراش پرتو ایکس بافت ورق فولادی ST14 را تعیین و با رسم منحنی حد شکل‌پذیری حاصل از آزمون‌های کشش تک‌محوری و اتساع اریکسون^۲، شکل‌پذیری ورق را نیز ارزیابی کردند. ایشان نشان دادند که با افزایش استحکام تسلیم و کششی، سطح زیر منحنی حد شکل‌دهی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد ازدیاد طول کل نمونه، ضریب کارسختی و پارامتر ناهمسانگردی نرمال قابلیت شکل‌پذیری ورق بهبود می‌یابد. قنای و همکاران [۴] اثر ناهمسانگردی را بر روی رفتار ورق انعطاف‌پذیر DC04 در طی انجام فرایند کشش عمیق بررسی کردند. ایشان ناهمسانگردی پلاستیک^۳ درون صفحه‌ای ورق DC04 و مدل رفتاری آن را با انجام آزمایش‌های کشش تک‌محوری در جهت‌های مختلف تعیین کردند. ایشان ناهمسانگردی پلاستیک را با استفاده از معیار درجه دوم هیل-۴۸^۴ و کار سختی را با استفاده از قوانین توانی و نمایی محاسبه کردند. سپس اثر ترکیب بین ناهمسانگردی پلاستیک و ناهمسانگردی اصطکاکی را بر توزیع ضخامت ورق

بررسی کردند. ایشان نشان دادند که ناهمسانگردی پلاستیک و اصطکاکی بر تغییر شکل ورق فلزی DC04 تأثیر دارد. انتخاب معیار تسلیم، تأثیر زیادی در صحت انجام حل تحلیلی در فرایندهای شکل‌دهی ورق فلزی دارد. پانیچ و همکاران [۵]، تجزیه و تحلیل تجربی و عددی منحنی حد شکل‌دهی و منحنی تنش حد شکل‌دهی را با استفاده از آزمون ناکازیم^۵ و معیارهای تسلیم هیل-۴۸ و YLD89 و قانون کرنش سختی سوئیفت^۶ برای ورق فولادی پیشرفته با استحکام بالا گرید JAC780Y انجام داده‌اند. ایشان مشاهده کردند که منحنی تنش حد شکل‌دهی می‌تواند شکست را به طور واقعی‌تر و بهتر از منحنی حد شکل‌دهی مبتنی بر کرنش پیش‌بینی کند. پاندر و همکاران [۶] رفتار فولاد DP590 در شکل‌دهی کشش عمیق، تحت شرایط مختلف روانکاری و شکل‌دهی گرم را بررسی کردند. در پژوهش ایشان از مدل‌های جانسون کوک^۷ و جانسون کوک اصلاح شده^۸ و زیرلی-آرمسترانگ^۹ استفاده شده است که در میان آن‌ها مدل زیرلی-آرمسترانگ به همراه معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل-۴۸ بهترین پیش‌بینی تنش جریان مواد، توزیع ضخامت و عمق کشش را از خود نشان داده است. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که اثر توأم دمای بالا و شرایط روانکاری مناسب، به افزایش کشش محدود، یکنواختی توزیع ضخامت در امتداد دیواره‌های فنجان و به کاهش حداکثر نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی کشش عمیق کمک خواهد کرد. کوبوکی و همکاران [۷]، روشی برای پیش‌بینی نمودار تنش-کرنش بر اساس نمودار نیروی ضربه‌ای در فرایند اتساع ارائه و با مقایسه نتایج عددی و تجربی، روش خود را صحت‌سنجی کردند. لو و همکاران [۸]، شکل‌پذیری و شکست انعطاف‌پذیر ورق DP780 را به طور کامل با مدل هیل-۴۸ و مدل شکست مور-کلمب^{۱۰} اصلاح شده بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های اجزای محدود با سه نوع المان مختلف، فرایند اتساع را شبیه‌سازی کرده و قابلیت کاربرد و صحت مدل‌های شکل‌پذیری هیل-۴۸ و شکست مور-کلمب اصلاح شده^{۱۱} را بر روی فرایند اتساع تایید کردند. با مقایسه نتایج

⁷ Johnson-Cook

⁸ Modified Johnson-Cook

⁹ Zerilli-Armstrong

¹⁰ Mohr-Coulomb

¹¹ Modified Mohr-Coulomb

¹ Stretching

² Eriksson

³ Friction anisotropy

⁴ Hill-48

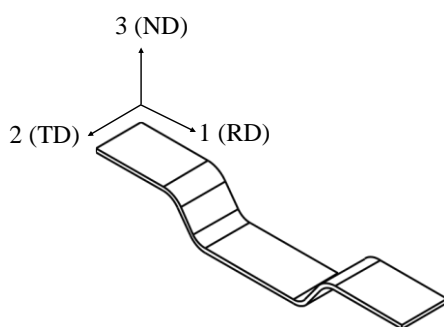
⁵ Nakazima test

⁶ Swift hardening law

در آن‌ها ایجاد می‌کند که این جهت‌گیری ترجیحی دانه‌ها (تمایل آماری دانه‌ها به داشتن جهت‌گیری‌های خاص) عامل اصلی ایجاد خواص ناهمسانگردی پلاستیک در ورق‌های فلزی است [۱۱]. در مورد ورق‌های فلزی نورد شده، جهت‌گیری آن‌ها به شرح زیر است: جهت نورد^۱؛ جهت عرضی^۲؛ جهت عمودی^۳ و تغییر جهت رفتار پلاستیک آن‌ها با کمیتی به نام ضریب ناهمسانگردی (r) ارزیابی می‌شود [۱۲].

ضریب ناهمسانگردی r به عنوان نسبت کرنش‌های عرضی به ضخامت در حین کشش تک‌محوری تعریف می‌شود. در مورد ماده همسانگرد، این ضریب برابر با یک است، به این معنی که کرنش‌های عرضی و ضخامت دارای مقداری یکسان هستند. اگر ضریب ناهمسانگردی بزرگ‌تر از یک باشد، کرنش‌های عرضی محسوس‌تر خواهند بود. به بیان دیگر نمونه در برابر نازک شدن مقاومت بیشتری دارد. از طرف دیگر، برای مواد با ضریب ناهمسانگردی کم‌تر از یک، کرنش‌های ضخامت بر جسته خواهند بود [۱۱].

در این پژوهش، فرایند اتساع بر روی ورق فولادی DC04 با قالب کشش سنبه-ماتریس انجام شده است که در آن ورق در لبه‌های قالب با نیروی ورق‌گیر پیچی مهار می‌شود و نیروی ورق‌گیر از سر خوردن ورق جلوگیری می‌کند. در شکل ۱ طرح‌واره قطعه‌ی شکل‌دهی شده به همراه جهات اصلی مشخص شده که راستای ۱ منطبق بر جهت نورد ورق است، نمایش داده شده است.



شکل ۱- طرح‌واره نمونه اتساع شده و جهات اصلی آن

عددی و داده‌های تجربی آزمایش‌های شبیه‌ساز اتساع، مشخص شد که مدل المان سه بعدی بهترین پیش‌بینی را در همه جنبه‌ها از جمله موقعیت و حالت شکست، پاسخ‌های جابجایی و نیروی قالب، تنش دیواره شکست و زاویه پیچش شکست را ارائه می‌کند. لی و همکاران [۹]، از کرنش پلاستیک معادل تجمعی^۱ همراه با تنش سه محوری به عنوان یک تابع وزنی در معیار شکست نرم برای مدل‌سازی اجزای محدود استفاده کردند. روش آن‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی برای آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه‌ی مبتنی بر اندازه‌گیری کرنش در شکل‌دهی نمونه‌های حاوی بریدگی‌های جانبی با شعاع‌های مختلف باشد. گیلومر و همکاران [۱۰]، با انجام آزمایش‌های کشش تک‌محوری و دو محوری و ثبت داده‌های تجربی مربوط به آن، یک معیار تسلیم مدرج متعامد غیر درجه دوم با دو روش کالیبراسیون، برای ترکیب‌های خاصی از انواع ضریب ناهمسانگردی تعریف کردند که در آن دقت درجه‌بندی اولیه با استفاده از یک مدل عددی آزمایش کشش سنبه نیم‌کره ارزیابی شد. ایشان دقیق‌ترین پیش‌بینی کرنش را با استفاده از مقادیر ضریب ناهمسانگردی تعیین شده از کرنش پلاستیک به دست آوردند.

فرایند اتساع کاربرد فراوانی در تولید قطعات ورقه‌ای با شعاع انحنا بالا مانند بدنه خودرو و متعلقات آن دارد. علیرغم شکل‌پذیری مناسب ورق فولادی DC04 و کاربرد بالای در ساخت بدنه خودرو به روش اتساع، در پژوهش‌های پیشین مطالعات تحلیلی چندانی برای مدل‌سازی اتساع این ورق انجام نشده است؛ لذا در این مقاله رفتار ورق فولادی DC04 در طی فرایند شکل‌دهی اتساع با فرض ناهمسانگردی پلاستیک و قانون جریان مرتبط بررسی و نیرو شکل‌دهی، توزیع کرنش، تنش و ضخامت ورق، محاسبه شد و با داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی فرایند اتساع مقایسه شده است.

۲- تحلیل فرایند اتساع

خواص مکانیکی ورق‌های فلزی متأثر از کار مکانیکی انجام شده بر روی آن‌ها خواهد بود. کار مکانیکی بویژه نورد سرد بر روی ورق‌های فلزی، جهت‌گیری‌های ترجیحی با ساختارهای بلوری

³ TD (Transverse Direction)

⁴ ND (Normal Direction)

¹ Accumulated equivalent plastic strain

² RD (Rolling Direction)

در رابطه ۳، K ضریب استحکام و n توان کرنش سختی می‌باشد، بر اساس شرایط اولیه فرایند، نسبت کرنش (β) و نسبت تنش (α) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \quad \beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (۴)$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \rightarrow \varepsilon_3 = -(1 + \beta)\varepsilon_1 \quad (۵)$$

معیار تسلیم هیل-۴۸ به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود که تابع تسلیم آن است. F, G, H, L, M, N ثابت‌های خاص حالت ناهمسانگردی ماده هستند و ۱، ۲، ۳ محورهای ناهمسانگرد اصلی هستند [۱۱].

$$2f(\sigma_{ij})^2 = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \quad (۶)$$

ضریب ناهمسانگردی که بیان‌کننده کرنش عرضی به ضخامتی است به شکل رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} \quad (۷)$$

همچنین ناهمسانگردی نرمال و ناهمسانگردی صفحه‌ای به شکل رابطه ۸ و ۹ تعریف می‌شود [12].

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (۸)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (۹)$$

معیار تسلیم هیل برای حالت تنش صفحه‌ای به شکل رابطه ۱۰ به دست می‌آید [۱۲].

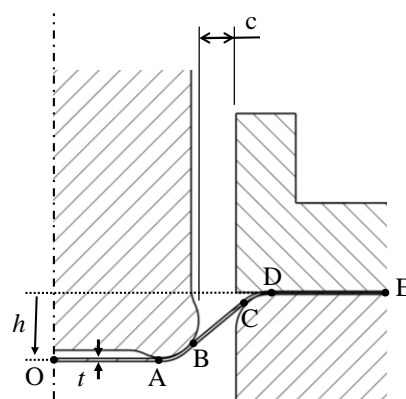
$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)}(2r_{45}+1)\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \quad (۱۰)$$

نسبت کرنش و تنش با استفاده از رابطه ۳، ۴، ۱۰ و قانون جریان به شکل رابطه ۱۱ محاسبه خواهد شد.

$$\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = \frac{\frac{-r_0}{1+r_0}\sigma_1 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2}{\sigma_1 - \frac{r_0}{1+r_0}\sigma_2} \Rightarrow \alpha = \frac{r_{90}[\beta(1+r_0) + r_0]}{r_0[r_{90}(1+\beta) + 1]} \quad (۱۱)$$

رابطه تنش (σ_1) در راستای محور ۱ در معیار تسلیم هیل به شکل رابطه ۱۲ به دست خواهد آمد.

مجموعه قالب، ورق، ورق‌گیر و سنبه در عمق نفوذ h در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل ورق و سنبه در ناحیه OA تماس ندارد و در بخش AB و DC سنبه با ورق تماس می‌یابد و باعث تغییر شکل و ایجاد خم در آن می‌شود. در ناحیه BC سنبه با قطعه کار تماس ندارد و لقی قالب برابر با ۱۰ میلی‌متر می‌باشد، در ناحیه DE قطعه کار در میان ورق‌گیر و قالب مهار می‌شود. از آنجا که مجموعه چیدمان قالب در شکل ۲ متقارن است، فقط یک نیمه راست آن نمایش داده شده است.



شکل ۲- نیم‌بخش قالب اتساع

هیل یک رفتار کمی از ناهمسانگردی پلاستیک ورق را بدون در نظر گرفتن پایه بلورشناسی مواد به عنوان تعمیم معیار هوپر میز-هنسکی^۱ ارائه کرد. او مواد را با سه محور متعامد ناهمسانگرد، x, y و z فرض کرد که خواص آن‌ها تقارن دوگانه دارد (صفحه‌های yz, zx و xy تقارن آینه‌ای دارند) [۹ و ۱۰] در این تحلیل ورق ناهمسانگرد بر اساس معیار تسلیم هیل-۴۸ و مدل کارسختی توانی مدل شد. ضریب اصطکاک کولمب در طول تماس ثابت و برابر 0.3 در نظر گرفته شد [۱۳]، همچنین از رفتار الاستیک ماده صرف نظر می‌شود. جهت ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در راستای طول، عرض و ضخامت ورق در نظر گرفته و بر اساس فرض تنش صفحه‌ای می‌توان نوشت:

$$\sigma_1, \sigma_2 > 0; \quad \sigma_3 = 0 \quad (۱)$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \neq 0 \quad (۲)$$

$$\bar{\sigma} = k(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n; \quad \varepsilon_0 = 0 \quad (۳)$$

^۱ Huber Mises- Hencky

به سمت خارج است و نیروی مماس بر ورق در اثر اصطکاک ایجاد می‌شود. همانطور که در شکل ۳-پ نشان داده شده است، جهت نیروهای کششی با زاویه $d\theta$ متفاوت است، بنابراین یک جزء نیرو شعاعی $F_1 d\theta$ به داخل وجود دارد؛ همچنین با استفاده از شکل ۳ در شرایط تعادل نیروها در طول ورق، اگر نیروی کشش در یک بخش مانند نقطه A مشخص باشد، با انتگرال‌گیری از رابطه ۱۶ می‌توان نیروی کشش را در نقطه دیگر مانند نقطه B تعیین کرد.

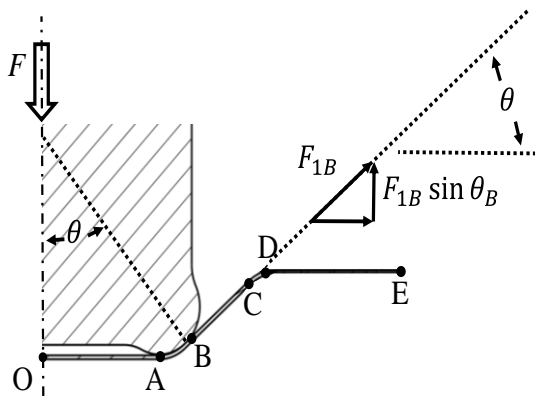
$$\sum F_R = 0 \rightarrow P = \frac{F_1}{R} \quad (15)$$

$$\sum F_T = 0 \rightarrow \frac{dF_1}{F_1} = \mu d\theta \quad (16)$$

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نیروی وارد بر سنبه با نیروی کشش ایجاد شده در امتداد طولی ورق در تعادل است، جزء عمودی این نیرو، نیروی کششی $F_{1B} \sin \theta_B$ است، بنابراین نیروی وارد به سنبه در واحد عرض ورق، با در نظر گرفتن هر دو طرف ورق از رابطه ۱۷ به دست خواهد آمد. با استفاده از رابطه ۱۸ می‌توان با داشتن نیروی A نیروی وارد بر نقطه B را محاسبه کرد.

$$F_S = 2F_{1B} \sin \theta_B \quad (17)$$

$$F_{1B} = F_{1A} \exp(\mu \theta_{AB}) \quad (18)$$



شکل ۴- ارتباط بین نیروی سنبه و نیروی کشش دیواره

توزیع کرنش در طول ورق از حل رابطه ۱۹ به دست خواهد آمد.

$$\sigma_1 = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{\frac{(r_0 \alpha^2 + r_{90} + r_0 r_{90} + r_0 r_{90} \alpha^2 - 2r_0 r_{90} \alpha)}{r_{90}(r_0 + 1)}}} \quad (12)$$

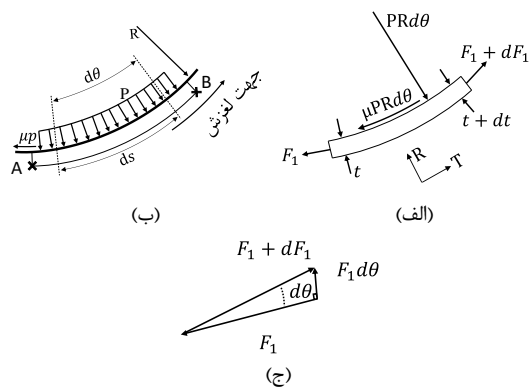
رابطه کرنش موثر ($\bar{\epsilon}$) به شکل رابطه ۱۳ نوشته خواهد شد.

$$\bar{\epsilon} = \left(\frac{\sqrt{\frac{r_0 + 1}{r_0}}}{r_0 + r_{90} + 1} \right) \times \sqrt{\frac{[r_{90}(\epsilon_2 - r_0 \epsilon_3)^2 + r_0(r_{90} \epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (r_0 \epsilon_1 + r_{90} \epsilon_2)^2]}{}} \quad (13)$$

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نیروی کشش مماسی از جای‌گذاری روابط ۳ و ۱۲ در رابطه ۱۴ محاسبه خواهد شد.

$$F_1 = \sigma_1 t \quad (14)$$

به جهت بررسی تعادل استاتیکی در یک جزء لغزنده بر روی سطح اصطکاکی، یک جزء بزرگ‌تر از طول قوس ds را در شکل ۳-الف در نظر می‌گیریم. در شکل ۳-الف سطح ابزار خمیده فرض می‌شود و p فشار تماس، μp تنش برشی اصطکاکی و μ ضریب اصطکاک است. به دلیل نیروی اصطکاک مطابق شکل ۳-ب هم نیروی کشش و هم ضخامت تغییر می‌کند.



شکل ۳- (الف) نمایش ضخامت و نیروهای المان. (ب)

لغزش یک جز از ورق بر روی سطح سنبه. (ج) مولفه

نیروی شعاعی

طول المان را می‌توان بر حسب شعاع ابزار و زاویه گسترده نوشت، در شکل ۲-ب نیروی وارد بر المان به شکل شعاعی و

$$F_1 = \frac{K(\varepsilon_0 + \left(\frac{\sqrt{\frac{r_0+1}{r_0}}}{r_0+r_0+1}\right) \sqrt{r_{90}(\varepsilon_2 - r_0\varepsilon_3)^2 + r_0(r_{90}\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (r_0\varepsilon_1 + r_{90}\varepsilon_2)^2})^n}{\sqrt{\frac{(r_0\alpha^2+r_{90}+r_0r_{90}+r_0r_{90}\alpha^2+2r_0r_{90}\alpha)}{r_{90}(r_0+1)}}} t_0 \exp(-\varepsilon_1) \quad (19)$$

۳- روش تجربی

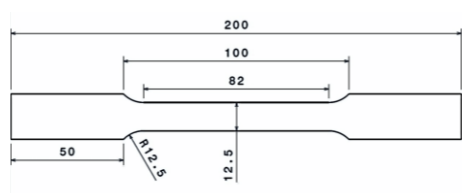
فولاد نورد سرد شده DC04 که در صنعت داخلی به ورق روغنی St14 شناخته می‌شود؛ به سبب برخورداری از عنصر منگنز و درصد پایین کربن، ضمن برخورداری از استحکام قابل قبول از چقرمگی بالایی نیز برخوردار است. به همین دلیل از آن برای تولید قطعات پیچیده و پر استحکام با فرایندهای کششی، استفاده می‌شود. عمده ترین کاربرد این ورق در مصارفی است که نیاز به کشش عمیق وجود دارد. در صنایع خودروسازی از DC04 برای تولید بدنه خودروها و فیلتر اتومبیل استفاده می‌شود. ترکیب شیمیایی این فولاد با توجه به استاندارد AISI ۱۰۰۶ [۱۴] در جدول ۱ و خواص مکانیکی آن در جدول ۲ و شکل ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی ورق DC04

r_{90}	\bar{r}	Δr	k (MPa)	n
۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۳۶	۵۳۱	۰/۲۵

σ_y (MPa)	σ_U (MPa)	Elongation (mm)	r_0	r_{45}
۱۰۲/۵	۲۱۸	۲۸	۰/۶۵	۱/۱

آزمون کشش تک‌محوری برای تعداد ۹ نمونه طبق استاندارد کشش فلزات^۱، برای دستیابی به خواص مکانیکی ورق، انجام شد. نمونه‌های کشش در سه جهت 0° ، 45° و 90° نسبت به راستای نورد مطابق ابعاد شکل ۶ با استفاده از دستگاه وایرکات آماده شد.

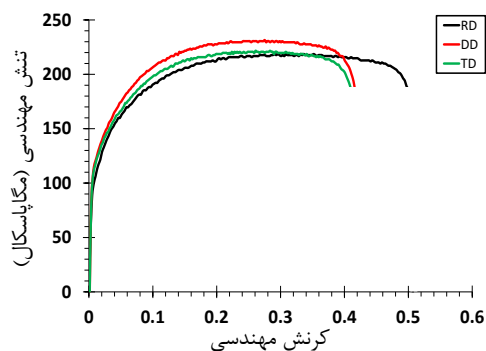


شکل ۶- نمونه آزمون استاندارد کشش (واحد به میلی‌متر)

آزمون‌ها با استفاده از دستگاه هیدرولیکی ۶۰ تن کشش/فشار سنتام STD600، با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای افزایش دقت و بررسی تکرار پذیری در تعیین رفتار مکانیکی، در هر جهت سه نمونه تهیه و آزمایش شد. برای

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق فولادی DC04 [14]

ترکیبات شیمیایی (درصد وزنی)				
C	P	S	Mn	Fe
۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۲۵	۹۹/۷۵-۹۹/۴۳



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش ورق DC04

¹ ASTM-E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials)

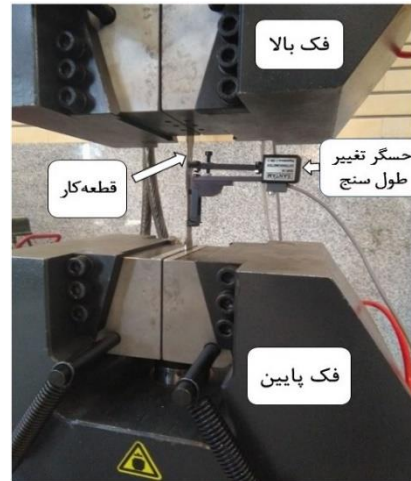
برای محاسبه ضریب ناهمسانگردی، مطابق استاندارد ASTM-E517، مطابق شکل ۹ نمونه‌ها در سه جهت 0° ، 45° و 90° برش و در ناحیه طول سنجه گذاری شد. پس از کشش تا 15% کرنش شکست آزمون متوقف و کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در راستای طول عرض و ضخامت اندازه‌گیری و ضرایب ناهمسانگردی مطابق رابطه ۷ متناظر با جهت‌های 0° ، 45° و 90° به دست آمد؛ همچنین ناهمسانگردی نرمال از رابطه ۸ و ناهمسانگردی صفحه‌ای مطابق رابطه ۹ محاسبه شد.



شکل ۹- نمونه‌های کشش تک محوری در سه راستا

اجزای قالب فرایند اتساع شامل سنبه و سنبه‌گیر، دو عدد ماتریس و کفشک، به همراه ورق‌گیر پیچی می‌باشد. که همه اجزا از فولاد سردکار آلیاژی ساخته شده است. نمای انفجاری اجزای قالب در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. به جهت جلوگیری از تماس ورق با پیشانی و دیواره سنبه یک برآمدگی در گوشه سنبه تعبیه شده است.

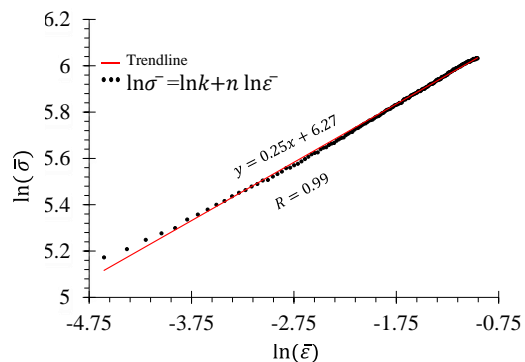
اندازه‌گیری دقیق تنش تسلیم از حسگر تغییر طول سنج^۱ استفاده شد. مجموعه چیدمان آزمون کشش به همراه حسگر تغییر طول سنج در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷- نمونه در حالت کشش تک محوره همراه با تغییر طول سنج

از داده‌های نیرو-جابجایی نمودار تنش-کرنش مهندسی و حقیقی به دست آمد. ضریب سختی K و توان کرنش سختی n از منحنی لگاریتمی تنش-کرنش حقیقی بعد از تسلیم شدن تا پایان تغییر شکل پلاستیک یکنواخت به شرح زیر به دست می‌آید.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \rightarrow \ln \bar{\sigma} = \ln K + n \ln \bar{\epsilon} \rightarrow y = b + nx \quad (20)$$

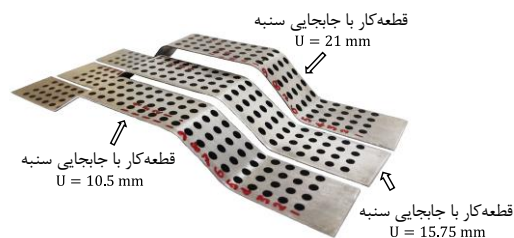


شکل ۸- محاسبه ثوابت K و n در قانون توانی

¹ Extensometer Sensor

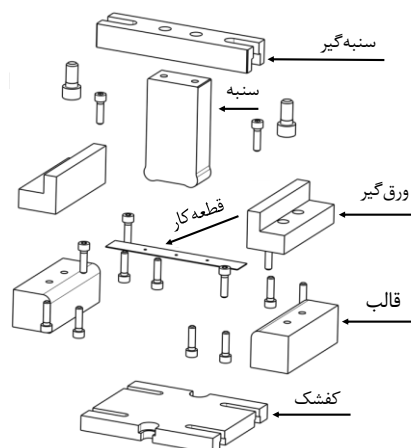
۴- ارائه نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به روش تحلیلی و تجربی گزارش گردیده و مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۱۲ نمونه شکل داده شده با استفاده از قالب اتساع در سه جابجایی ۱۰/۵، ۱۵/۷۵ و ۲۱ میلی‌متر نمایش داده شده است. برای اندازه‌گیری توزیع کرنش‌های دایره‌ای در طول نمونه ایجاد و شماره گذاری شده است. در حل تحلیلی با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک کلمب $\mu = 0/3$ ، دقیق‌ترین نتایج مربوط به توزیع کرنش طولی به دست آمد. در روش تحلیلی توزیع تنش، کرنش و ضخامت برای شش جابجایی مختلف سنبه محاسبه شد.



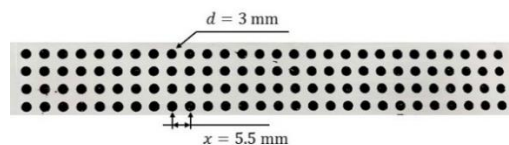
شکل ۱۲- قطعه‌کارهای شکل‌دهی شده با جابجایی گوناگون سنبه

در شکل ۱۴ منحنی نیرو بر حسب جابجایی سنبه برای دو روش تجربی و تحلیلی ارائه شده است. روند کلی تغییرات نیرو در دو روش تحلیلی و تجربی پیوسته افزایشی است. در روش تحلیلی حداکثر نیروی فرایند اتساع برابر ۷/۱۳ کیلونیوتن پیش‌بینی شده است که به میزان ۲۳/۲۷٪ از نیروی تجربی آن کم‌تر است. علت این خطا را می‌توان به فرض یکنواختی کرنش قطعه در مدل تحلیلی مرتبط دانست. برخلاف این فرض بررسی نتایج تجربی در شکل ۱۳-الف نشان داد که نمونه در نواحی مختلف طول قطعه، به علت تغییر شرایط مرزی موضعی، تغییر عرض متفاوتی دارد. این درحالی است که در روش تحلیلی به جهت ساده‌سازی مدل، نسبت کرنش و تنش در همه نواحی ثابت فرض شده است. به بیان دیگر می‌توان بیان داشت که برخلاف فرض کشش تک‌محوری با $\beta = -0/5$ در حل تحلیلی، مطابق شکل ۱۳-الف به علت شرایط قیدگذاری بر روی ورق β در نواحی دیگر ورق به جز BC و CD بزرگ‌تر از $-0/5$ است؛ لذا مطابق رابطه ۱۱ با افزایش نسبت کرنش β ، نسبت تنش α نیز افزایش یافته و در این شرایط با استفاده از



شکل ۱۰- نمای انفجاری چیدمان قالب

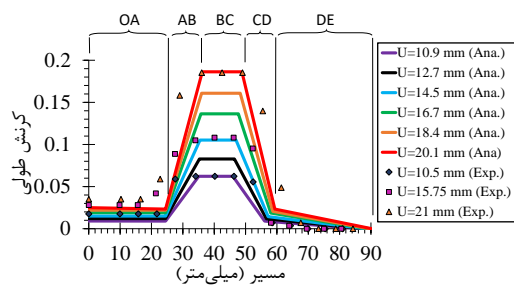
نوار خام فولادی اولیه به صورت نوار مستطیلی، در ابعاد ۱۷۰×۲۵ میلی‌متر برش زده و با دایره‌های توپر به قطر ۳ میلی‌متر به روش چاپ سیلک با رنگ روغن مش‌بندی شد. نمونه مش‌بندی شده در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- نمونه مش‌بندی شده با رنگ روغن

پس از قرارگیری نوار خام فولادی بر روی سطح قالب با استفاده از ۴ پیچ آلن M 8 نیروی ورق‌گیر تامین شد. سنبه با ۲ عدد پیچ آلن M 8 بر روی سنبه‌گیر مقید و مجموعه متحرک به کمک ۲ پیچ آلن M 14 به نحوی بر روی صفحه فوقانی پرس تنظیم شد که لقی طرفین سنبه با ماتریس برابر باشد. در ادامه با اعمال جابجایی رم پرس با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه فرایند اتساع با سه عمق کشش ۱۰/۵، ۱۵/۷۵ و ۲۱ میلی‌متر بدون استفاده از روان‌کار اجرا شد. در حین فرایند اتساع نیروی شکل‌دهی و جابجایی رم متحرک ثبت گردید. پس از اتمام فرایند با اندازه‌گیری قطر مش‌های تغییر شکل یافته کرنش‌های هر دایره با استفاده از رابطه ۱ محاسبه و نمودار تغییرات کرنش بر روی مسیر طولی محاسبه و ترسیم شد.

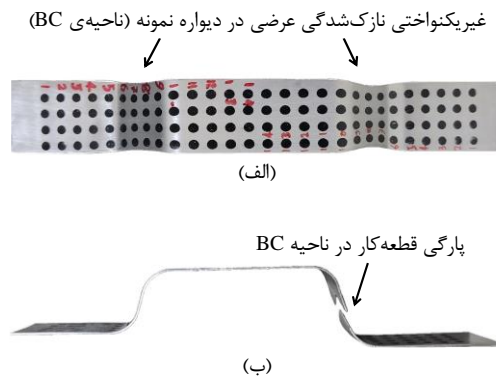
خواهد شد. نتایج تخمین تئوری توزیع کرنش از دقت قابل قبولی بویژه در ناحیه بحرانی دیواره نمونه برخوردار است، اگر چه خطای متوسط روش تحلیلی در مقایسه با نتایج تجربی ۱۸/۹٪ است. در بخش‌هایی که ورق با سنبه تماس ندارد، یعنی در زیر سنبه مقدار کرنش ثابت است، این نتیجه توسط داده‌های آزمایشگاهی نیز تایید می‌شود. در شکل ۱۳-ب پارگی در ناحیه دیواره قطعه (بخش BC) را که با نفوذ سنبه بیش‌تر از ۲۱ میلی‌متر شکل‌دهی شده نمایش می‌دهد. بیش‌ترین مقدار خطای داده‌های تحلیلی در مقایسه با داده‌های آزمون تجربی در ناحیه AB و CD در شعاع گوشه سنبه و ماتریس به‌دست آمد. این خطا اولاً به علت غیر خطی بودن مسیر بارگذاری حین شکل‌دهی در شعاع گوشه سنبه و ماتریس و ثانیاً به دلیل خطای خوانش کرنش طولی با استفاده از کولیس روی شعاع گوشه سنبه و ماتریس است.



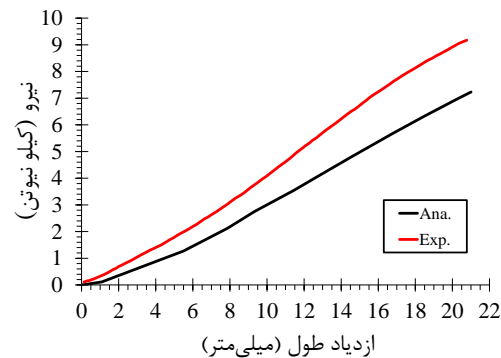
شکل ۱۵- نمودار کرنش طولی بر روی مسیر طولی نمونه حاصل از روش تحلیلی به همراه نتایج تجربی

در شکل ۱۶ تنش طولی در نقاط مختلف نمونه از مرکز تا لبه نمایش داده شده است. داده‌های تنش در این نمودار با استفاده از جای‌گذاری کرنش محاسبه شده از دو روش تحلیلی و آزمایشگاهی در روابط ۱۲ و ۱۳ به‌دست آمده است. با توجه به رابطه ساختاری توانی بین تنش-کرنش موثر روند کلی حاکم بر منحنی تنش مشابه منحنی کرنش است. به نحوی که بیش‌ترین تنش در بخش دیواره قطعه (ناحیه‌ی BC) اتفاق می‌افتد؛ همچنین روش حل تحلیلی، تنش طولی را در جابجایی ۲۱ میلی‌متر با دقت متوسط ۴/۷٪ تخمین می‌زند. افزایش شدید تنش و کرنش در شعاع گوشه سنبه (AB) و شعاع گوشه ماتریس (CD) به سبب نیرو اصطکاکی، تماس بر ورق می‌باشد. براین اساس کنترل شرایط اصطکاکی بین ورق و اجزای قالب،

رابطه ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که تنش موثر برای جریان مواد نیز رو به افزایش خواهد بود؛ لذا با افزایش تنش موثر نیروی بیش‌تری برای شکل‌دهی نیاز خواهد بود که در حل تحلیلی این تغییرات نقطه به نقطه نسبت کرنش و تنش در نواحی مختلف لحاظ نشده است.



شکل ۱۳- شکل‌دهی قطعه کار، (الف) غیریکنواختی (الف) غیریکنواختی تغییر شکل عرضی در دیواره قطعه اتساع شده (ب) پارگی قطعه کار شکل‌دهی شده در ناحیه BC با نفوذ سنبه بیش‌تر از ۲۱ میلی‌متر



شکل ۱۴- نیروی شکل‌دهی نسبت به نفوذ سنبه به دست آمده از روابط تحلیلی و آزمون اتساع

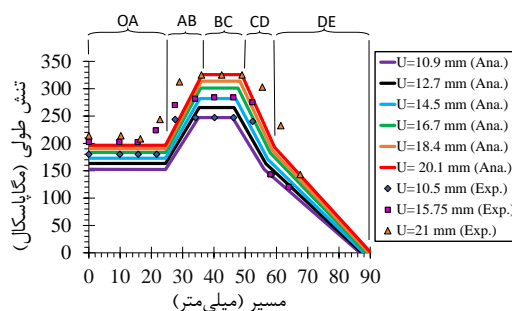
در شکل ۱۵ توزیع کرنش طولی نمونه به‌دست آمده از روش تحلیلی و تجربی نمایش داده شده است. نتایج روش تحلیلی با حل رابطه ۱۹ در شش حالت نفوذ سنبه محاسبه شده است. بیش‌ترین کرنش در ناحیه لقی قالب و سنبه ایجاد می‌شود که در صورت ادامه یافتن فرایند تا عمق بیش‌تر از ۲۱ میلی‌متر، ورق از ناحیه BC به گلویی می‌رسد و در آخر پاره

قطعه کار نسبت به طول نمونه محاسبه شد. در بخش تئوری با هدف ارائه یک مدل ساده شده تحلیلی برای تخمین نیرو، توزیع تنش و کرنش از تابع تسلیم ناهمسانگرد هیل-۴۸ و قانون جریان وابسته استفاده شد. نتایج نشان داد که به علت وجود نیروی اصطکاک مماسی در ناحیه شعاع سنبه و ماتریس، بحرانی‌ترین ناحیه در فرایند اتساع ورق، دیواره قطعه (بین فضای لقی سنبه و ماتریس) است که با افزایش نفوذ سنبه دچار کاهش شدید ضخامت شده و در نهایت نمونه از همین نقطه پاره خواهد شد؛ همچنین مدل تحلیلی ارائه شده توزیع کرنش، تنش و ضخامت قطعه را در جابجایی سنبه ۲۱ میلی‌متر (نزدیک به لحظه گلوبی موضعی) به ترتیب با خطا ۱۵/۸٪، ۴/۷٪ و ۰/۷٪ تخمین زده است در مجموع این مدل از قابلیت لازم برای مدل‌سازی فرایند اتساع با دقت قابل قبول برخوردار است.

۶- مراجع

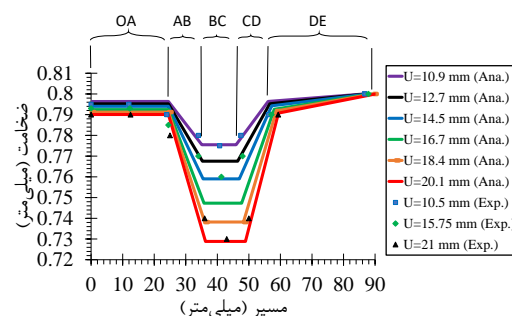
- [1] Hattalli V L, Srivatsa S R (2018) Sheet Metal Forming Processes - Recent Technological Advances. Mater Today Proc 5(1): 2564–2574.
- [2] Marciniak Z, Duncan J L, Hu S J (2002) Mechanics of Sheet 228.
- [۳] محمدی زهرانی ا، طاهری م، زمردیان ا (۱۳۸۶) ارزیابی قابلیت شکل پذیری ورق‌های فولادی کم کربن ST14 در تولید بدنه خودرو. فن ع ت م م مجلسی (۱)
- [4] Ghennai W, Boussaid O, Bendjama H, Haddag B (2019) Nouari M Experimental and numerical study of DC04 sheet metal behaviour—plastic anisotropy identification and application to deep drawing. Int J Adv Manuf Technol 100(1): 361–371.
- [5] Panich S, Seemuang N, Chaimongkon T (2017) Formability analysis of fukui stretch-drawing and square cup drawing using strain and stress based forming limit curves. Key Eng Mater 751: 167–172.
- [6] Pandre S, Morchhale A, Kotkunde N, Singh S K, Khanna N, Saxena A (2021) Determination of Warm Deep Drawing Behavior of DP590 Steel Using Numerical Modeling and Experimental Process Window. Arab J Sci Eng 46(12): 12537–12548.
- [7] Kuboki T, Jin Y, Murata M (2012) Prediction of stress-strain diagram from forming load in stretch forming. Int J Mech Sci 60(1): 46–53.
- [8] Luo M, Chen X, Shi M F, Shih H C (2010) Numerical analysis of AHSS fracture in a

با ایجاد یکنوختی در توزیع تغییر شکل طولی قطعه، نقش موثری بر کاهش سطح تنش و کرنش و در نتیجه افزایش قابلیت اتساع خواهد داشت.



شکل ۱۶- نمودار تنش طولی بر روی مسیر طولی نمونه حاصل از روش تحلیلی به همراه نتایج تجربی

توزیع ضخامت به دست آمده از حل تحلیلی با شش عمق نفوذ سنبه به همراه داده‌های تجربی از سه نمونه با عمق کشش ۱۰/۵، ۱۵/۷۵، و ۲۱ میلی‌متر در شکل ۱۷ نمایش شده است. در این بخش نیز به صورت مشابه بیش‌ترین کاهش ضخامت مربوط به بحرانی‌ترین ناحیه با بیش‌ترین مقدار تنش و کرنش یعنی دیواره قطعه (ناحیه BC) است. حل تحلیلی ضخامت قطعه کار را با خطای متوسط ۰/۷٪ ارائه می‌کند.



شکل ۱۷- نمودار توزیع ضخامت بر روی مسیر طولی نمونه حاصل از روش تحلیلی به همراه نتایج تجربی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مطالعه تحلیلی-تجربی اتساع ورق فولادی DC04 انجام شد. با انجام آزمایش کشش تک‌محوری در سه راستا، ضرایب ناهمسانگردی، ثوابت K و n معادله توانی به دست آمد. در ادامه با انجام آزمون اتساع، توزیع کرنش، تنش و ضخامت

- [11] Hosford W F, Caddell R M (2011) Metal forming: mechanics and metallurgy. Camb uni press: 207-209.
- [12] Banabic D (2010) Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation. Spr Sci & Bus M: 30-36.
- [13] Altan T, Ngaile G, Shen G (2004) Cold and hot forging: fundamentals and applications. ASM int 1.
- [14] (2012) AISI 1006 Carbon Steel UNS G10060: 1-2.
- stretch-bending test. AIP Conf Proc 1252: 455-463.
- [9] Lee Y W, Woertz J C, Wierzbicki T (2004) Fracture prediction of thin plates under hemispherical punch with calibration and experimental verification. Int J Mech Sci 46(5): 751-781.
- [10] Gilmour K R, Leacock A G, Ashbridge M T J (2004) The influence of plastic strain ratios on the numerical modelling of stretch forming. J Mater Proc Technol 152(1): 116-125.