مهندسی مکانیک شریف
دوره‌ی ۳ - ۲۶، شماره‌ی ۱، ص. ۶۹-۷۵

به‌دست آوردن شکل ورق اولیه و میزان شکل‌پذیری در قطعات سه‌بعدی پرس‌کاری شده به روش اجزا محدود معکوس

احمد عاصم پور (دانشیار)
صابر درمحمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
مسعود حاجیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

هدف این نوشتار ارائه‌ی روشی برای به دست آوردن شکل بهینه‌ی ورق اولیه در قطعات پرس‌کاری شده است. در این روش چگونگی شکل‌پذیری قطعه از نقطه‌نظر پارگی و چروکیدگی قابل پیش‌بینی است و استفاده از این روش در مرحله‌ی طراحی قالب بسیار مناسب است. به‌عبارت دیگر، با داشتن شکل سه‌بعدی قطعه، مشخصات مکانیکی ورق و شرایط فیزیکی فرایند می‌توان به تمامی اهداف فوق دست یافت. در این روش از نظریه‌ی تغییر شکل کلی خمیرسانی (پلاستیسیته) استفاده شده است. با توجه به قرارداشتن شکل اولیه‌ی ورق در صفحه‌ی افق، ارتفاع تغییر شکل در هر نقطه معلوم است و مسئله از حالت سه‌بعدی به دوبعدی کاهش می‌یابد که درکاهش حجم محاسبات بسیار مؤثر است.
همچنین به‌منظور دسترسی به مناسب‌ترین حدس اولیه در حل سیستم معادلات، از یک روش ویژه در تصویرکردن المان‌های واقع بر قطعه‌ی سه‌بعدی بر صفحه‌ی افق استفاده شده است. با حل سیستم معادلات علاوه بر شکل بهینه‌ی ورق اولیه، مؤلفه‌های کرنش‌های اصلی نیز مشخص می‌شود. نتایج به دست آمده از این روش برای چند قطعه‌ی صنعتی با نتایج تجربی و همچنین نرم افزارهای تجاری موجود مورد مقایسه قرارگرفته است.

واژگان کلیدی: پرس‌کاری ورق، کشش عمیق، روش اجزاء محدود معکوس، شکل اولیه‌ی ورق، شکل‌پذیری.

assem@sharif.edu
sdormohammadi@mech.sharif.edu
hajian@mech.sharif.edu

مقدمه

پرس‌کاری ورق یکی از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌دهی در صنایع مختلف است. از مزیت‌های این روش کم‌شدن دورریز ماده و تولید قطعات با اشکال پیچیده است. بیشترین کاربرد این فرایند در صنایع خودروسازی مشاهده می‌شود. اندکی بهبود در فرایند ساخت قطعات بدنه‌ی خودرو منجر به صرفه‌جویی‌های اقتصادی قابل توجه می‌شود. با دسترسی به رایانه‌های پرسرعت، شبیه‌سازی رایانه‌ییِ این فرایند به‌طور پیوسته در حال بهبود است. این شبیه‌سازی، بهینه‌سازی فرایند ـ به‌خصوص در مراحل طراحی ـ را هدف گرفته است. در قطعات پیچیده عدم رعایت بعضی از اصول در پارامترهای طراحی ممکن است به بروز عیوب عمده، نظیر پارگی و چروکیدگی، بینجامد.

در یکی از اولین تلاش‌ها برای مدل‌سازی فرایند پرس‌کاری ورق، تحقیقات تجربی وسیعی درموردکشش عمیق انجام، و حل تحلیلی ساده‌یی برای حالت‌کشش عمیق متقارن محوری ارائه شد.[۱] با در دسترس قرارگرفتن رایانه‌های پرسرعت و با توجه به پیچیدگی قطعات پرس‌کاری شده، هزینه‌ی‌زیاد و نیز زمان‌بر بودن سعی و خطای تجربی، مدل‌سازی رایانه‌یی که به‌کاهش قابل توجه زمان و هزینه می‌انجامد، سریعاً توسعه یافت. این فرایند همچنین با استفاده از مدل صلب ـ پلاستیک در اجزاء محدود و براساس نظریه‌ی غشایی مدل‌سازی شد.[۲] درصورت بزرگ‌بودن کرنش‌ها فرض صلب ـ پلاستیک فرضی کاملاً منطقی و مناسب است. با این حال با به‌کارگیری این مدل امکان محاسبه‌ی برگشت فنری و تنش‌های پس‌ماند از بین می‌رود. محققین برای رفع این محدودیت، مدل الاستوپلاستیک را به‌عنوان مدل ماده به‌کار گرفتند. جزئیات روابط و فرمولاسیون این مدل‌سازی در دسترس است.[۳]

مدل‌های فوق همگی از ورق اولیه به قطعه‌ی نهایی می‌رسند؛ این در حالی است که در مرحله‌ی طراحی نیاز داریم که با داشتن قطعه‌ی نهایی، ورق اولیه‌ی مناسب را به دست آوریم. تکمیل حل در این روش‌ها زمان‌بر است و برای مدل‌سازی نیز به کاربر متخصص و با تجربه نیاز است. به‌منظور اجتناب از این مشکلات، اخیراً از مدل‌های اجزاء محدود معکوس استفاده می‌شود؛ چنان که برخی از محققین

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۸/۸، داوری ۱۳۸۸/۶/۱۱، پذیرش ۱۳۸۸/۱۱/۱۲.

نیز به روش معکوس و براساس کمینه‌سازی انرژی به حل مسئله پرداختند.[۴و۵] در این روش، معادلات غیرخطی حاصل از کمینه‌سازی انرژی با استفاده از الگوریتم نیوتن ـ رافسون در چندین مرحله حل می‌شود. از آنجا که سرعت هم‌گرایی معادلات غیرخطی کاملاً وابسته به حدس اولیه است، روش‌هایی برای بهبود حدس اولیه نیز ارائه شد.[۶] در همین راستا، براساس کمینه‌سازی انرژی نتایج روش معکوس به دست آورده شد و با استفاده از روش مستقیم ورق اولیه‌ی حاصل از روش معکوس بهینه‌سازی شد.[۷] سپس به‌کمک نظریه‌ی تغییر شکل کلی خمیرسانی و المان‌های غشایی، مسئله‌ی متقارن محوری حل شد.[۸] و در ادامه آن را برای حالت بدون تقارن محوری نیز توسعه دادند.[۹] در یکی از تحقیقات به‌عمل آمده، با فرض رابطه‌ی خطی بین کرنش و تغییر مکان و اعمال آن به تغییر شکل‌های بزرگ، محققین به حل مسئله پرداختند.[۱۰]

در این نوشتار، و در ادامه و تکمیل پژوهش قبلی،[۱۱] به‌کمک تاکردن[۱] المان‌های قطعه‌ی سه‌بعدی و درنتیجه تبدیل مسئله‌ی سه‌بعدی به دوبعدی، روشی سریع و کارا برای آنالیز کرنش در فرایند پرس‌کاری ورق ارائه می‌شود. تعدادی فرضیات ساده‌ساز نیز برای رسیدن به حل اعمال شده و برای حل از نظریه‌ی تغییر شکل کلی خمیرسانی استفاده می‌شود. مسیر تغییر شکل ماده به‌صورت خط مستقیم در نظر گرفته شده و حل به‌صورت تک‌گام و تنها با در نظر گرفتن حالت ابتدایی و نهایی قطعه انجام می‌شود.

مراحل کاری و فرمول‌بندی

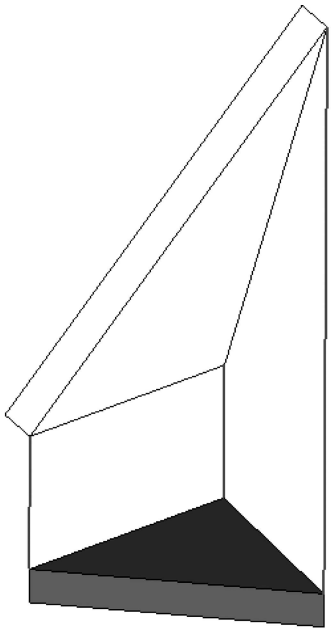
چنان که بیان شد هندسه‌ی قطعه‌ی نهایی به‌صورت سه‌بعدی معلوم است. همچنین مکان اولیه‌ی کلیه‌ی نقاط روی صفحه‌ی افق قرار دارد. با در نظرگرفتن این معلومات مسئله‌ی سه‌بعدی به دوبعدی محدود می‌شود. همچنین با درنظرگرفتن نظریه‌ی تغییر شکل کلی خمیرسانی[۲] و استفاده از یک حدس اولیه‌ی نزدیک به واقعیت، سیستم معادلات به‌صورت خطی درآمده و حل می‌شوند. برای مش‌بندی قطعه از المان‌های مثلثیِ ۶ درجه آزادی استفاده شده است. به‌طورکلی مراحل حل مسئله عبارت‌اند از:

۱. تصویرکردن[۳]

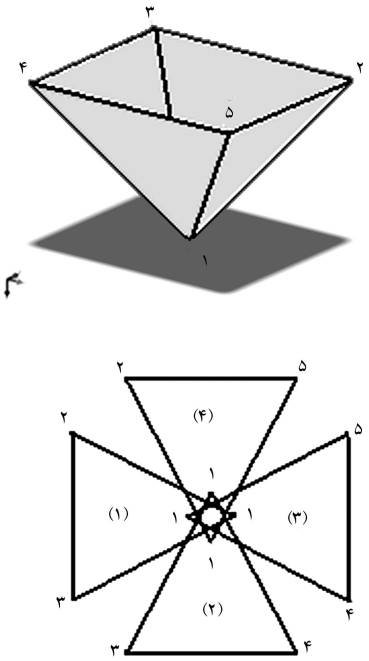
حالت تصویرشده‌ی یک المان دلخواه در شکل ۱ نمایش داده شده است. تصویر این هرم (سایه) از نظر موقعیت طول و عرض کاملاً منطبق بر طول و عرض نقاط موجود روی قطعه‌ی سه‌بعدی است. بنا براین تصویر یک قطعه معرف حالت نهایی آن قطعه پس از شکل‌دهی و در فضای دوبعدی است.

۲. تاکردن

به‌منظور دست‌یابی به نیروهای شکل‌دهی، المان‌های قطعه به‌طور جداگانه حول مرکز المان دوران داده شده و به حالت افقی درمی‌آیند. در شکل ۲ المان‌های تاخورده‌ی مربوط به هرم، روی صفحه‌ی افق مشاهده می‌شود. المان‌های نشان داده‌شده از نظر سطحی تقریباً معرف حالت اولیه‌ی المان در سطح افق هستند. اما موقعیت گره‌ها و پیوستگی بین المان‌ها باید تصحیح شوند. به‌عبارت دیگر با اعمال یک نیروی درون صفحه‌یی باید جابه‌جایی‌های لازم انجام شود تا شکل واقعی گسترده حاصل شود.



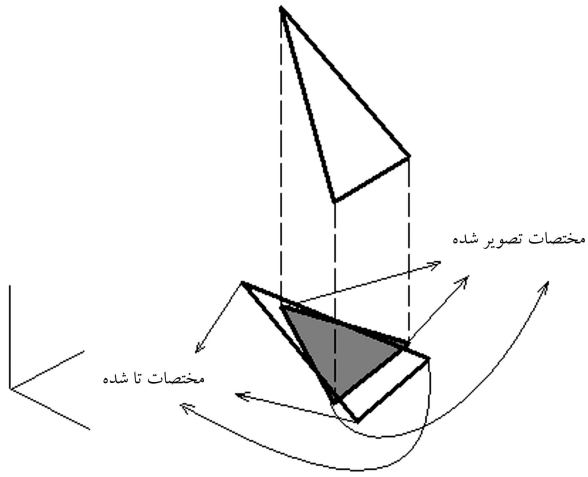
شکل ۱. تصویر یک المان.



شکل ۲. نمایش المان‌های تاشده‌ی هرم روی صفحه‌ی افق.[۱۱]

۳. محاسبه‌ی نیروهای درون صفحه‌یی و تشکیل سیستم معادلات خطی

در مرحله‌ی بعد ماتریس سختی برای المان‌های تاشده به دست می‌آید. در محاسبه‌ی این ماتریس، ضخامت هر المان ثابت و برابر با ضخامت ورق اولیه فرض می‌شود (البته این ضخامت در مراحل بعدی تصحیح خواهد شد). حال نیروهایی به‌صورت صفحه‌یی برای هر المان به دست می‌آید. این نیروها معادل نیروهایی است که سبب تغییر شکل قطعه‌ی سه‌بعدی به حالت تصویر شده و یا حالت تصویر شده به ورق



شکل ۳. نمایش مختصات گره‌های المان تصویر شده و المان تاشده برای یک المان مشخص.

اولیه می‌شود. نیروهای اعمالی در هر گره چنین محاسبه می‌شود:

$$\Delta u_e = (Unfolded\,Coordinates) - (Projected\,Coordinates) \quad (۱)$$

$$F_e = K_e \times \Delta u_e \quad (۲)$$

که در آن F_e نیروهای وارد بر هر المان، K_e ماتریس سختی المان و Δu_e جابه‌جایی گره‌های المان است. در شکل ۳ مختصات گره‌های المان تصویر شده و المان تاشده برای یک المان مشخص نمایش داده شده است.

این عمل برای تمام المان‌ها تکرارشده و با مونتاژ برداری نیروها در تمام گره‌ها و همچنین مونتاژ ماتریس سختی برای تمام المان‌های تاخورده یک سیستم معادلات کلی حاصل می‌شود:

$$KU = F \quad (۳)$$

که در آن F بردار نیروی کلی، K ماتریس سختی کلی و U بردار جابه‌جایی کلی گره‌ها است.

۴. اعمال قیود و حل معادلات

در این مرحله قیود موجود روی گره‌ها اعمال می‌شود. مثلاً وقتی با استفاده از تقارن یک‌چهارم قطعه مدل می‌شود، نقاط روی محور xها یا yها مقید به حرکت روی همان محور می‌شوند.[۱۲] پس از اعمال قید بر روی معادلات، برای حل معادلات از روش گوس استفاده می‌شود.

در جواب به دست آمده از معادله، U معرف میزان جابه‌جایی گره‌ها است که توسط آن شکل اولیه‌ی ورق بهینه حاصل می‌شود. این شکل ورق اولیه به‌عنوان تخمین ابتدایی محسوب شده و در ادامه تصحیح می‌شود. برای این کار کرنش‌های هر المان محاسبه می‌شود.

۵. محاسبه‌ی کرنش‌ها

برای محاسبه‌ی کرنش‌های ایجادشده در المان‌ها، از یک روش ارائه‌شده‌ی موجود استفاده شده است.[۱۳] شکل ۴ حالت اولیه و تغییرشکل یافته را برای المان مثلثی نمایش می‌دهد. المان به دست آمده در ورق تخت معادل المان اولیه در شکل، و المان تاشده‌ی افقی معادل المان تغییر شکل یافته است. هر دو این المان‌ها در صفحه‌ی تخت دوبعدی و در دستگاه مختصات اصلی قرار دارند.

رابطه‌ی موقعیت نهایی رأس‌های A و B را می‌توان برحسب موقعیت اولیه‌شان و به‌کمک تانسور F (گرادیان تغییر شکل) به‌شکل ماتریسی بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 0 & 0 \\ X_2 & Y_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_1 & Y_1 \\ 0 & 0 & X_2 & Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{21} \\ F_{22} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

با ضرب کردن معکوس ماتریس مرتبه ۴ در طرفین رابطه‌ی ۴، مؤلفه‌های F محاسبه می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{21} \\ F_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{X_1Y_2 - X_2Y_1} \begin{bmatrix} Y_2 & -Y_1 & 0 & 0 \\ -X_2 & X_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_2 & -Y_1 \\ 0 & 0 & -X_2 & X_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

با داشتن تانسور F، مؤلفه‌های تانسور C (تانسور تغییر شکل گرین) نیز به‌سادگی محاسبه می‌شود.

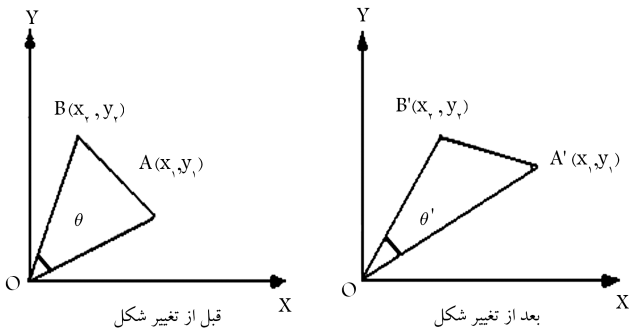
$$C_{11} = F_{11}^2 + F_{21}^2$$
$$C_{12} = C_{21} = F_{11}F_{12} + F_{21}F_{22}$$
$$C_{22} = F_{12}^2 + F_{22}^2 \quad (۶)$$

بدین‌ترتیب مقادیر اصلی C که همان نسبت‌های تغییر طول (λ) هستند، و نیز راستای آنها نسبت به دستگاه مختصات محاسبه می‌شود:

$$\lambda_{11}^2, \lambda_{22}^2 = \frac{C_{11} + C_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{C_{11} - C_{22}}{2}\right)^2 + C_{12}^2} \quad (۷)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2C_{12}}{C_{11} - C_{22}} \quad (۸)$$

که در آن θ زاویه‌ی راستای اصلی با محور x را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. المان مثلثی در حالت تغییر شکل یافته و اولیه.[۱۳]

با محاسبه‌ی لگاریتم تغییر طول‌های اصلی، کرنش‌های اصلی نیز محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه‌ی کرنش‌ها، کرنش معادل از رابطه‌ی ۹ قابل محاسبه است.[۲]

$$\bar{\varepsilon}=\sqrt{\frac{2}{3}\frac{(2+r)}{(1+2r)}}\left[(1+r)\varepsilon_x^2+(1+r)\varepsilon_y^2+2r\varepsilon_x\varepsilon_y+\frac{1}{2}\gamma_{xy}^2\right]^{1/2} \quad (9)$$

سپس با داشتن مقدار کرنش معادل و به‌کمک رابطه‌ی هولمن تنش معادل محاسبه می‌شود.

$$\bar{\sigma}=k\bar{\varepsilon}^n \quad (10)$$

ماتریس بیان‌کننده‌ی جنس ماده (ماتریس D) از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود.

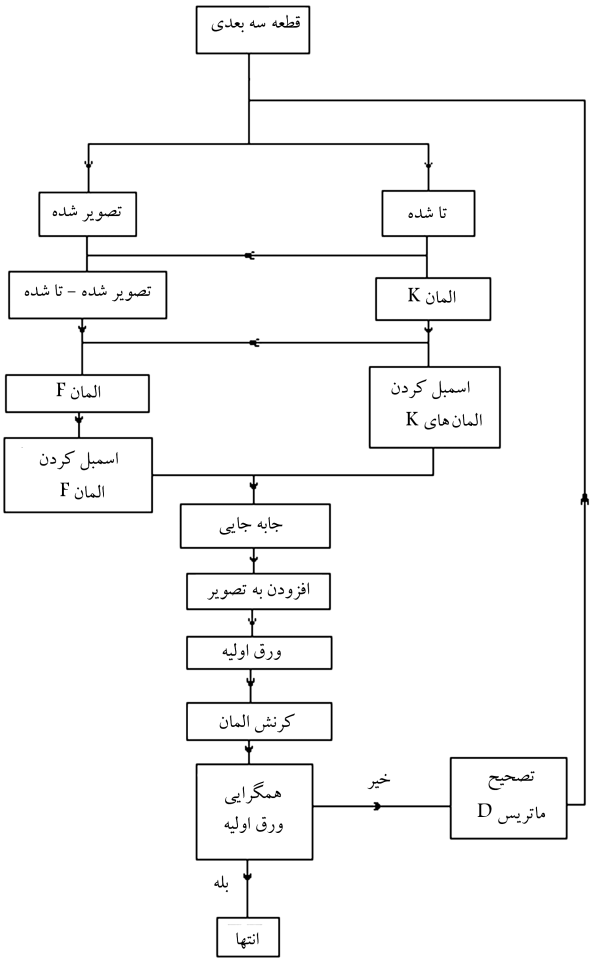
$$D_p=\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}}\left(\frac{1+r}{1+2r}\right)\begin{bmatrix}1+r & r & 0\\ r & 1+r & 0\\ 0 & 0 & 1/2\end{bmatrix} \quad (11)$$

با استفاده از ماتریس D مربوط به هر المان، ماتریس سختی المان‌ها از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$K_e=\int B^T D B\, dv \quad (12)$$

که در آن B ماتریس میان‌یابی کرنش المان، D ماتریس خاصیت ماده، و dv جزء حجم ماده است.

با مونتاژکردن بردارهای نیرویی المان‌ها و ماتریس‌های سختی آنها، و نیز با حل دستگاه معادلات حاصله، ورق اولیه مربوط به قطعه‌ی سه‌بعدی به دست می‌آید. در این مرحله کرنش‌های هر المان به‌روشی که پیش‌تر توضیح داده شد قابل محاسبه‌اند. ماتریس D نیز با استفاده از روش مستقیم[۴] اصلاح می‌شود و دوباره در مسیر حل قرارگرفته و فرایند حل تکرار می‌شود. فلوچارت کلی روش پیش‌بینی شکل ورق اولیه در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵. فلوچارت کلی روش حل.

جدول ۱. ابعاد مربوط به فرایند و قطعه.

قطر پانچ	قطر لبه‌ی فلنج	شعاع فیلت پانچ	شعاع فیلت لبه‌ی قالب	عمق	ضخامت ورق اولیه
۵۰	۷۶/۶	۱۳	۵	۳۱/۵	۰/۷

جدول ۲. مشخصات ماده.

E(GPa)	R	K(MPa)	n
۲۱۰	۱/۶۵	۵۴۷	۰/۱۸

نتایج

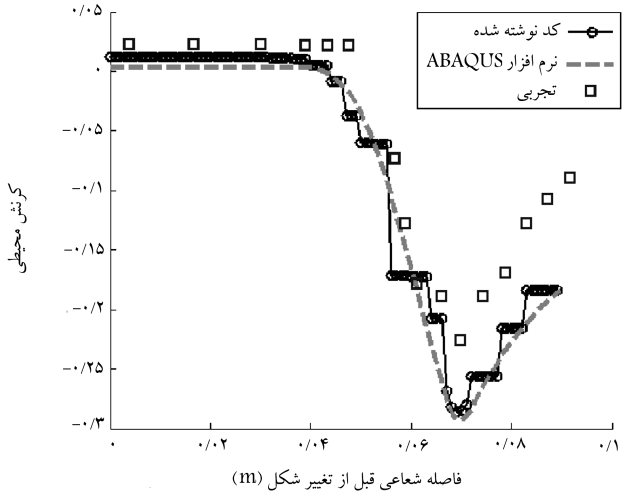
برای ارزیابی صحت نتایج، دو قطعه‌ی فنجان مدور[۵] و منشور مربعی[۶] درنظرگرفته شده‌اند. نتایج این دو قطعه با نتایج موجود[۱۴] و نیز با نتایج نرم‌افزار ABAQUS مقایسه شده است. فنجان مدور، قطعه‌یی استوانه‌یی و دارای تقارن محوری است. این قطعه با ۳۸۳۶ المان و ۲۰۰۳ گره مش‌بندی شد. ابعاد قطعه‌ی تحلیل‌شده و مشخصات ورق مورد استفاده برای پرس‌کاری به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ آمده است (ابعاد به mm داده شده است).

شکل ورق اولیه‌ی این قطعه، دایره‌یی بود با قطر ۹۰mm. به‌منظور مقایسه‌ی اندازه‌ی شکل این ورق با نتایج نرم‌افزار ABAQUS(که به‌روش مستقیم مسئله را حل می‌کند)، پس از چندین مرتبه آزمون سعی و خطا قطر ورق اولیه‌ی مناسب ۹۱mm به دست آمد. این مقایسه ۱/۱ درصد خطا نشان می‌دهد.

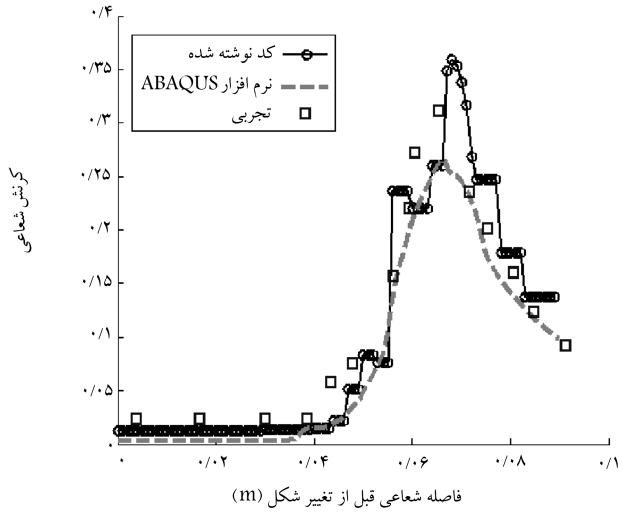
در شکل ۵ کرنش شعاعی، محیطی و ضخامتی نمایش داده شده است. منحنیِ با نقاط مربعی نقاطی هستند که به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شده‌اند.[۱۴] منحنیِ نشان داده شده با نقاط خط‌چین از تحلیل نرم‌افزار ABAQUS به دست آمده‌اند. منحنی نشان داده شده با نقاط دایره‌دار نیز از تحلیل کد معکوس نوشته شده به دست آمده است.

چنان‌که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، توزیع کرنش‌های حاصل ازکد نوشته شده از نظر کیفی با نتایج تجربی و همچنین نتایج حاصل از حل نرم‌افزار ABAQUS به‌خوبی مطابقت دارد. با این حال از نظر کمّی اختلافاتی مشاهده می‌شود. یکی از دلایل اختلاف نسبت به مقادیر تجربی، استفاده از المان غشائی است که فاقد خاصیت خمش است. همچنین در کار حاضر اثرات اصطکاکی وارد نشده‌اند که این خود باعث ایجاد خطا می‌شود.

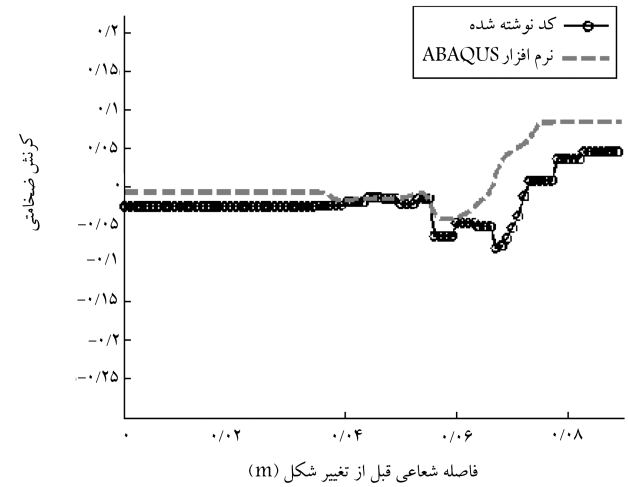
برای بررسی پارگی احتمالی قطعه، کرنش‌های اصلی المان‌های آن بر روی منحنی حد شکل‌دهی نشان داده شده است. برای رسم منحنی حد شکل‌دهی



الف) کرنش محیطی برحسب فاصله از مرکز؛



ب)کرنش شعاعی برحسب فاصله از مرکز؛



ج)کرنش ضخامتی برحسب فاصله از مرکز در ورق اولیه.

شکل ۶. نمایش کرنش برحسب فاصله از مرکز در ورق اولیه.

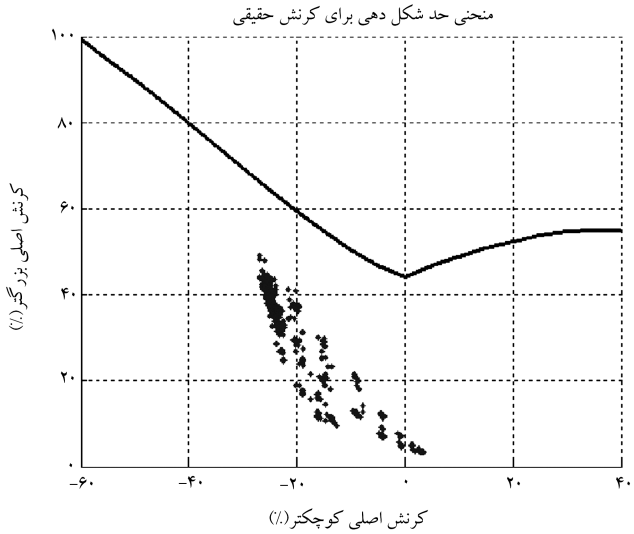
از رابطه‌ی تجربی استوارت ـ کیلر استفاده شده است.[۱۵] این رابطه برای ورق‌های فولادی کم‌کربن ارائه شده است. از بین دو کرنش اصلی داخل صفحه، محور افقی نشان‌گر کرنش اصلیِ کوچک‌تر و محور قائم نشان‌گر کرنش اصلی بزرگ‌تر است. با بررسی نمودار حد شکل‌دهی این قطعه در شکل ۷ مشاهده می‌شود که خطر پارگی برای این قطعه وجود ندارد. آزمایش تجربی این قطعه نیز عدم پارگی قطعه را تأیید می‌کند.

منشور مربعی به‌عنوان دومین قطعه مورد تحلیل قرار گرفته است. ابعاد این قطعه‌ی مربعی (برحسب mm) در جدول ۳ و مشخصات ماده‌ی مورد استفاده در ورق اولیه‌ی آن در جدول ۴ آمده است.

این قطعه با ۱۸۶۸ المان و ۹۹۲ گره مش‌بندی شد و بعد از ۵ مرحله تصحیح ماده، حل به هم‌گرایی رسید. نتیجه‌ی شکل ورق اولیه‌ی حاصل از این تحلیل در شکل ۸ نمایش داده شده است. طول ضلع به دست آمده برای ورق اولیه نسبت به طول ضلع مناسب به دست آمده در مدل‌سازی نرم‌افزار ABAQUS(۰٫۲m) حداکثر ۲٫۵ درصد خطا دارد.

در مرحله‌ی طراحی اولیه، دانستن نقاط مربوط به کرنش‌های بحرانی برای طراح از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین در شکل ۹ مقادیر کرنش ضخامتی روی قطعه‌ی سه‌بعدی نمایش داده شده است.

در شکل ۱۰ نیز توزیع کرنش ضخامتی حاصل از نرم افزار ABAQUS روی قطعه نمایش داده شده است. منحنی کرنش ضخامتی برحسب فاصله از مرکز در راستای قطر نیز در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در این منحنی نقاط دایره‌دار



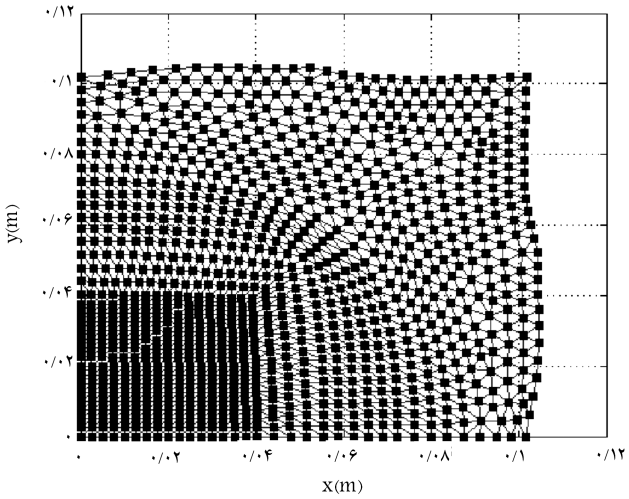
شکل ۷. نمایش کرنش المان‌ها بر روی منحنی حد شکل‌دهی.

جدول ۳. ابعاد منشور مربعی.

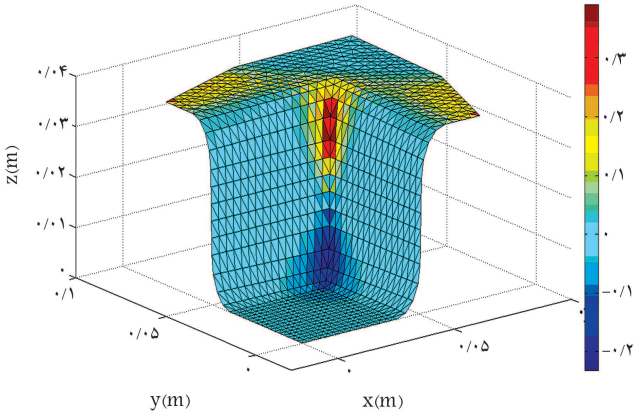
طول ضلع	شعاع فیلت	عمق کشش	ضخامت ورق اولیه
۱۸۲	۱۰	۳۶	۰٫۸۲

جدول ۴. مشخصات ماده‌ی مورد استفاده در ورق اولیه.

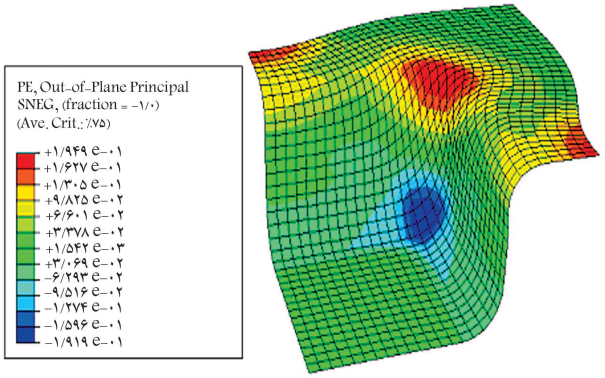
N	K(MPa)	R	E(GPa)
۰٫۲۲	۵۱۳	۱	۲۰۰



شکل ۸. شکل ورق اولیه‌ی مناسب برای منشور مربعی.



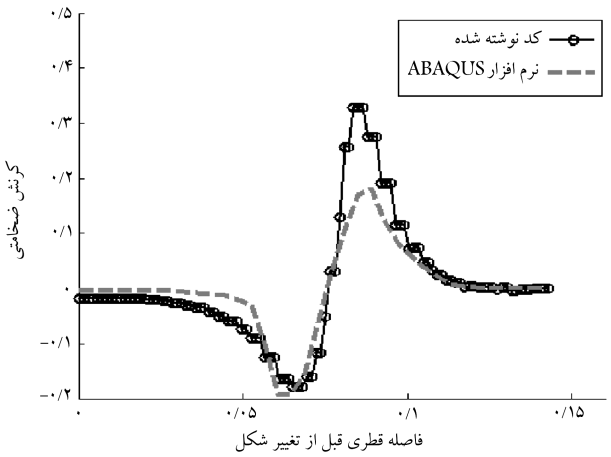
شکل ۹. توزیع کرنش ضخامتی روی قطعه‌ی سه‌بعدی.



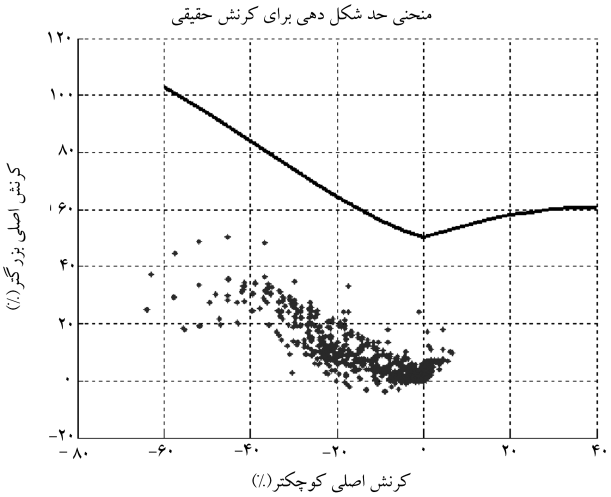
شکل ۱۰. توزیع کرنش ضخامتی روی قطعه‌ی نهایی حاصل از نرم افزار ABAQUS.

نتایج کد معکوس، و نقاط خط‌چین نتایج مربوط به نرم‌افزار ABAQUS را نمایش می‌دهند.

این توزیع کرنش از نظر کیفی با نتایج حاصل از حل نرم‌افزار ABAQUS تطابق خوبی دارد، اگرچه از نظر کمی اختلافاتی مشاهده می‌شود. صرف‌نظرکردن از اثرات خمش و اصطکاک را می‌توان یکی از دلایل این اختلاف عنوان کرد. استفاده از المان‌های مرتبه‌ی بالاتر نیز به بهبود دقت نتایج می‌انجامد.



شکل ۱۱. کرنش ضخامتی برحسب فاصله در راستای قطر.



شکل ۱۲. نمایش کرنش المان‌های منشور مربعی بر روی منحنی حد شکل‌دهی.

در نهایت نیز به‌منظور بررسی پارگی احتمالی قطعه، کرنش‌های اصلی المان‌های آن روی منحنی حد شکل‌دهی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار روشی برای بررسی و طراحی فرایند پرس‌کاری ورق در مرحله‌ی طراحی محصول ارائه شد. از مزیت‌های این روش عدم وجود مشکلات هم‌گرایی موجود در حل دستگاه معادلات غیر خطی و سرعت مناسب برای دفعات زیاد شبیه‌سازی فرایند در حین طراحی و عدم نیاز به کاربر متخصص و با تجربه‌ی بالا برای شبیه‌سازی است. در این حل در یک گام، تنها از مراحل اولیه و نهایی قطعه استفاده شده است که باعث سرعت بخشیدن به حل مسئله می‌شود. به‌منظور ارزیابی روش تک‌گام توضیح داده شده، کشش عمیق دو قطعه‌ی استوانه‌یی و مکعبی مورد تحلیل قرار گرفت. هندسه‌ی ورق اولیه، توزیع کرنش و ضخامت، و نیز نمایش کرنش المان‌ها بر روی منحنی حد شکل‌دهی از جمله نتایج مورد ارزیابی بودند. به‌طور کلی نتایج از نقطه نظر کیفی قابل قبول و از نقطه نظر کمّی تقریباً مناسب‌اند. البته نتایج کمّی را می‌توان در مراحل تحقیقات بعدی با در نظر گرفتن اثرات خم و اصطکاک به‌نحو مطلوبی بهبود بخشید.

پانوشت

1. unfolding
2. total deformation theory of plasticity
3. projection
4. direct method
5. circular cup
6. square box

منابع

1. Johnson, W., and Mellor, P.B. *Engineering Plasticity*, Ellis Horwood, chichester (1983).
2. Kobayashi, Sh.; Oh, S., and Altan, T. *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford university press (1989).
3. Pittman, J.F.T.; Zienkiewicz, O.C.; Wood, R.D., and Alexander, J.M. *Numerical Analysis of Forming Processes,* John Wiley & Sons, chichester (1984).
4. Guo, Y.Q.; Batoz, J.L.; Detraux, J.M., and Duroux, P. "Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts", *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* **39**, pp. 1385-401 (1990).
5. Guo, Y.Q.; Batoz, J.L.; Naceur, H.; Bouabdallah, S.; Mercier, F., and Barlet, O. "Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach", *Computers and Structures,* **78**, pp. 133-148 (2000).
6. Guo, Y.Q.; Naceur, H.; Debray, K., and Bogard, F. "Initial solution estimation to speed up inverse approach", *stamping modeling Engineering Computations,* **20**, pp. 810-834 (2003).
7. Habibi Parsa, M. and Pournia, P. "Optimization of initial blank shape predicted based on inverse finite element method", *Finite Elements in Analysis and Design,* **43**, pp. 218-233 (2007).
8. Majlessi, S.A., and Lee, D. "Further development of sheet metal forming analysis method", *Journal of engineering for industry,* **109** (Nov. 1987).
9. Majlessi, S.A., and Lee, D. "Deep drawing of square-shaped sheet metal parts", part 1: finite element analysis, *Journal of engineering for industry,* **115**, pp.102-109 (1993).
10. Liu, S.D., and Karima, M. "A one step finite element approach for product design of sheet metal stampings", *NUMIFORM,* **92**, pp. 497-502 (1992).
11. Azizi, R., and Assempour, A. "Application of linear inverse finite element method in prediction of the optimum blank in sheet metal forming", *Material and design,* **29**, pp. 1965-1972 (2008).
12. Chandrupatla, R., and Tirupathi, *Introduction to Finite Elements in Engineering,* Prentice hall, New Jersy (1997).
13. Sowerby, R.; Chu, E., and Duncan, J.L. "Determination of large strains in metal forming", *Journal of strain analysis,* **17**(2) (1982).
14. Saran, M.J.; Schedin, E.; Samuelsson, A.; Melander, A., and Gustafsson, C. "Numerical and experimental investigation of deep drawing of sheet metal parts", *Journal of engineering for industry,* **112** (August 1990).
15. Keeler, S.P. "On the origins of FLD", In forming limit diagrams: concept, method, and applications, edited by: R.H. Wagoner, K.S. Chan, S.P. Keeler, Tms (publisher), Warrendale, Pa. pp.3-8 (1989).