فصلنامه تحقیقات مکانیک کاربردی
جلد ۳، شماره ۱، ص‌ص ۳۹ الی ۴۸، تابستان ۱۳۹۰
تاریخ دریافت: ۸۹/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۲۲

جبران‌سازی خاصیت برگشت‌فنری در ورقکاری

سمیرا کرمی – دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
علی شقاقی مقدم- استادیار گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: samira_karami2012@yahoo.com

چکیده: در هنگام شکل‌دهی، ورق تحت تاثیر نیرو (یا جابجایی) تغییرشکل می‌یابد. قسمتی از ورق تحت تغییرشکل کشسانی و قسمتی دیگر تحت تغییرشکل پلاستیک قرار می‌گیرد. پس از باربرداری به‌دلیل تنش‌های داخلی که در ورق وجود دارد، انحرافی در شکل قطعه بوجود می‌آید که به آن خاصیت برگشت‌فنری می‌گویند. در این مقاله ابتدا دو الگوریتم متداول در زمینه جبران‌سازی بررسی می‌شوند. این دو الگوریتم یکی براساس جابجایی گره‌ها و دیگری براساس میدان نیروی اعمال‌شده به ورق در موقع پرسکاری اقدام به تصحیح قالب می‌نمایند. جنس ورق، ضخامت ورق، اصطکاک و نیری ورقگیر در این دو الگوریتم مد نظرگرفته نمی‌شوند. بعد از معرفی دو الگوریتم فوق، الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این الگوریتم دقیقا با همان مکانیزمی که برگشت‌فنری در ورق رخ می‌دهد، اقدام به جبران آن می‌نماید بدین صورت که با عبور دادن کمان از تمامی سه گره مجاور در دو شبکه مرجع و برگشت‌فنری و مقایسه کمان‌های متقابل رابطه‌ای برای برگشت‌فنری در هر گره تقریب زده می‌شود. حال با دانستن رفتار ورق در هر گره می‌توان سطح جبران‌شده را طوری پیداکرد که پس از برگشت‌فنری سطح مطلوب حاصل گردد. این الگوریتم تعداد تکرار کمتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر برای رسیدن به دقت مطلوب مورد نیاز می‌باشد. در نهایت ساخت چند قطعه صنعتی که با این الگوریتم طراحی قالب در آن صورت گرفته برای معتبرسازی الگوریتم آورده می‌شود.

واژه های کلیدی: برگشت‌فنری، جبران سازی، ورق کاری، شکل دهی U

Spring Back Compensation in Metal Sheet Forming

S. Karami, Ms. Student, Department of Applied Design, Faculty of Mech. Eng., TIAU
A. Shagaghi, Ass. Prof., Department of Applied Design, Faculty of Mech. Eng., TIAU

Abstract: Usually, in shape forming of a plate it deformed or displaced under forces. A portion of the plate deformed in elastic and the other in plastic form. Therefore, after removing the loads a deviation occurs in the shape of plate, because of the internal stresses. These characteristics called spring back. In this paper first, the two famous algorithms in spring back have been described the first is based on the nodal displacements and later on the base of the intended field force modifying of the molds. In the present algorithm there is a need for a few iteration for compensation of spring back. The validation of algorithm and its accuracy is made by design and manufacturing of a industrial sample.

Keywords: Nano-particle; Wet-type milling process; Taguchi method; RSM and GA

۱- مقدمه

ورق‌کاری یکی از فرآیندهای مهم تولید صنعتی بویژه در صنعت خودرو و هوافضا می‌باشد. بیشتر قطعاتی که ورقکاری می‌شوند جزئی از یک مجموعه بزرگتر می‌باشند که بعداً می‌بایست بصورت یک مجموعه واحد مونتاژ شوند. حال اگر هرکدام از قطعات دارای انحراف غیرمجاز باشد باعث بروز مشکلات اساسی هنگام مونتاژ می‌گردد. بنابراین رسیدن به قطعه مطلوب از اهمیت بسزائی در ورقکاری برخوردار می‌باشد[۱و۷]. به شکل رایج سنتی برای نیل به این هدف ابتدا قالب را بصورت شکل نهایی قطعه ساخته می‌شد و پس از عملیات ورقکاری، مقدار بازگشت‌فنری را بصورت عینی مشاهده نموده و اقدام به تصحیح قالب بصورت تجربی می‌نمودند[۴]. اینکار نیاز به تجربه بالا و در برخی مواقع باعث از کارافتادگی قالب می‌گشت. امروزه با توسعه کدهای نرم‌افزاری اجزای محدود، کار به روشی نو انجام می‌شود بدین صورت که با یک تحلیل دقیق تنش و کرنش با استفاده از این کدها، کاربر می‌تواند شکل نهایی ورق را پس از برگشت‌فنری تخمین و با استفاده از اطلاعات حاصل از انحراف‌شکل با قطعه آرمانی اقدام به تصحیح قالب نماید [۱۳]. این روش هزینه خیلی‌کم نسبت به روش سنتی دارد و دقت کار بسیار بالا می‌باشد.

در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری Solid works برای طراحی‌قطعه، از ABAQUS برای تحلیل اجزای‌محدود و از MATLAB برای بهینه‌سازی استفاده شده‌است. الگوریتم‌های مختلفی برای جبران‌سازی خاصیت برگشت فنری معرفی‌شده که می‌توان از میان آنها به روشDisplacement Adjustment اشاره کرد که دارای الگوریتم نسبتاً ساده می‌باشد [۲، ۴، ۵ و ۶]. تقریب‌های خطی مورد استفاده در این روش باعث کاهش زمان محاسبه شده ولی در عین‌حال باعث افت دقت کار نیز می‌گردد. روش دیگر Spring forward است که برای جبران‌سازی اشکال ساده مناسب می‌باشد.

در ابتدا با بررسی شکل‌دهی کمان تحت شرایط کرنش صفحه‌ای، رابطه تحلیلی مربوط به شکل‌دهی استخراج می‌شود. این رابطه بیان می‌دارد که اگر کمانی به شعاع r از یک ورق با جنس و ضخامت مشخص فرم داده شود، پس از باربرداری شعاع آن به r' تغییر می‌کند که از رابطه تحلیلی می‌توان شعاع برگشت‌فنری را تعیین نمود[۸]. از این اصل می‌توان استفاده کرد و اقدام به تصحیح قالب نمود بدین‌صورت که با شبکه‌بندی پروفیل مرجع و برگشت‌فنری انحنای کمان در هر نقطه از دو شبکه را بدست آورد. با استفاده از داده‌های این شبکه‌ها، رابطه تحلیلی بدست آمده برای شکل‌دهی کمان تصحیح می‌شود. در نهایت بکمک رابطه اصلاح‌شده شبکه اصلاح می‌شود. این روش برطبق مکانیزمی که برگشت‌فنری در ورق رخ می‌دهد اقدام به جبران آن می‌نماید. به‌همین دلیل تعداد تکرار کمتری نسبت به روش‌های دیگر برای رسیدن به دقت مطلوب موردنیاز می‌باشد.

۲- راهبرد جبران‌سازی برگشت‌فنری

حتی پس از بهینه‌کردن قطعه تولیدی و فرآیند کشش عمیق باوجود کاهش برگشت‌فنری، در قطعه تولیدشده پس از باربرداری انحرافاتی به‌خاطر تنش‌های داخلی رخ می‌دهد. بنابراین جبران‌کردن برگشت‌فنری لازم به نظر می‌رسد تا اینکه قطعه با دقت مناسب تولید گردد. بعد از بهینه‌سازی اولیه در طراحی قطعه و فرایند کشش عمیق، کارنهایی بهینه سازی شکل قالب و پانچ می‌باشد که به این مرحله Over bending گویند و به‌منظور تغییرشکل قالب به نحوی که بعد از برگشت‌فنری قطعه ایجادشده به حد مطلوب برسد. مسئله جبران‌کردن برگشت‌فنری به‌صورت سنتی مراحلی بشرح ذیل را طی می‌کند.

ابتدا باتوجه به‌شکل مطلوب، پروفیل‌های قالب و پانچ ایجاد می‌شود. پس از اجرای پرسکاری، چند نمونه را انتخاب و شکل آنرا بصورت دقیق وارد رایانه شده و با مقایسه با شکل مطلوب، تصمیم‌گیری بر چگونگی تغییرقالب انجام می‌گیرد. سپس دوباره

فرایند تکرار می‌گردد. این عمل چندین بار برای رسیدن به دقت مطلوب تکرار می‌گردد [۱۱]. گرچه این روش تاحد مورد قبولی مناسب می‌باشد ولی از لحاظ زمانی و مالی بسیار پرهزینه می‌باشد. امروزه با رایج شدن بسته‌های نرم‌افزاری اجزای محدود کار بسیار ساده شده است و دیگر کاربر مجبور به پرداخت هزینه‌های نمونه‌سازی نمی‌باشد و تمام جبران‌کردن توسط نرم-افزار صورت‌گرفته و نتیجه نهایی برای ساخت به دستگاه CNC ارسال می‌شود. البته بسیار مهم می‌باشد که از یک نرم‌افزار قابل اطمینان استفاده گردد چرا که در غیر اینصورت هزینه‌ها بیشتر می‌گردد. نکته مهم اینجاست که بهینه‌کردن شکل قالب، برگشت‌فنری را کم نمی‌کند بلکه حتی در بعضی مواقع احتمال افزایش برگشت‌فنری نیز می‌باشد. در ادامه بحث الگوریتمهای رایج برای بررسی این مسئله مورد بحث قرار می‌گیرند.

۳-۱- روش Displacement Adjustment

روش Displacement Adjustment(DA)، در عین سادگی دارای کاربرد مناسبی برای موارد عملی می‌باشد. مرحله اول این روش در شکل (۱) نشان داده شده‌است. مطابق شکل برحسب قالب و نوع ورق، محاسبات اجزای محدود انجام گرفته ولی پس از اتمام کار، دو مرحله بسیار مهم می‌باشد و آن شبکه-بندی ورق یکی در حالیکه پانچ در پایین‌ترین نقطه خود قرار دارد و دیگری پس از باربرداری از ورق می‌باشد. با مقایسه این دو شبکه با یکدیگر می‌توان میدان گسسته‌ای برای جابجایی اجزا بدست آورد. برای اصلاح شکل قالب، این میدان گسسته را در ضریب Over bending که معمولاً ۱/۳- می‌باشد ضرب نموده و از شبکه مرجع کم نموده و در نهایت می‌توان شبکه قالب اصلاح شده را بدست آورد.

$$\vec{S} = \left\{ \vec{S}_i : \vec{S}_{ii} \in \square^3 \ ,1 \le i \le n \right\} \quad (۱)$$

$$\vec{C} = \vec{R} + a\left(\vec{S} - \vec{R}\right) \Leftrightarrow \vec{c}_i = \vec{r}_i + a\left(\vec{s}_i - \vec{r}_i\right) \forall i \quad (۲)$$

درحالیکه S و R به‌ترتیب شبکه مرجع و برگشت‌فنری می‌باشند.

$$\vec{R} = \left\{ \vec{r}_i : \vec{r}_{ii} \in \square^3 \ ,1 \le i \le n \right\} \quad (۳)$$

با انجام این عمل درچند مرحله تکرار می‌توان مطابق شکل (۱) به‌نتیجه مطلوب رسید و شکل‌نهایی را در دقت مطلوب قرار داد.

۳-۲- روش Spring forward

این روش توسط Karafillis و Boyce برای جبران-سازی برگشت‌فنری معرفی شده‌است [۳ و ۴]. در این روش، نیروهای اعمالی در حین فرآیند به‌منظور جبران‌سازی برگشت-فنری و اصلاح شکل قالب بکار می‌روند. تکرار اول این روش در شکل (۱) نشان داده شده‌است. در مرحله اول، ورق روی قالب قرار گرفته و فرآیند پرسکاری مدل می‌شود، در لحظه‌ای که پانچ به آخر ضربه خود می‌رسد نیروهای وارد به‌پانچ از طرف ورق محاسبه می‌شود و بصورت یک میدان نیرو ذخیره می‌شود. برای جبران‌سازی برگشت‌فنری این میدان نیرو F به قطعه تولیدی در یک محاسبه اجزای‌محدود اعمال می‌گردد. ایده اصلی این راهبرد از این ناشی می‌گردد که وقتی ورق در داخل قالب محبوس است بخاطر میدان نیروی F ورق شکل خود را حفظ می‌کند. به محض‌اینکه ورق از قالب آزاد می‌شود، ورق بخاطر عملکرد نیروی متقابل F-، برگشت‌فنری رخ می‌دهد. حال با اعمال نیروی F به هندسه مرجع، شکل جدید قالب و پانچ حاصل می‌شود که باعث جبران‌سازی برگشت‌فنری می‌گردد. مزیت استفاده از این روش عبارت از این است که مسئله جبران-سازی برگشت‌فنری به‌صورتی انجام می‌شود که برگشت فنری ایجاد می‌گردد. مشکل این روش عموماً در کندبودن روند حل مسئله می‌باشد و یا اینکه در بعضی مواقع احتمال واگرا شدن مسئله نیز وجود دارد. همچنین این روش حساس شدیدی به چگونگی تعریف شرایط مرزی برای محاسبه برگشت‌فنری

می‌باشد. مسئله اصلی این است که هیچگونه هندسه مرجع ثابت وجود ندارد و روش ممکن است به جواب دیگری منتهی شود.

۳-۳- الگوریتم پیشنهادی

همانطور که اشاره رفت، روش‌های DA و SF هرکدام مزایا و معایبی را به‌همراه دارند. روش SF بیشتر برای اشکال ساده به‌کار برده می‌شود و هیچگونه تضمینی برای همگراشدن وجود ندارد. روش DA در عین سادگی، دارای الگوریتم مناسب و بسیار کاربردی می‌باشد. مهمترین عیب روش DA را می‌توان عدم وجود پایه علمی برای جابجایی شبکه‌ها و نیازمند حداقل ۴ مرحله تکرار برای نیل به جواب مناسب می‌باشد. اشاره شد که میزان انحراف بین شبکه‌های مرجع و برگشت‌فنری به‌منظور اصلاح شبکه قالب استفاده می‌گردد، بدین‌صورت که این میدان را در ضریب Over bending که عموماً ۱/۳- می‌باشد ضرب نموده و از شبکه قالب کم می‌شود. با این کار می‌توان شبکه قالب اصلاح‌شده را به دست آورد. بدیهی‌است که در این روش هیچگونه تفاوتی مابین شبکه‌ها درنظر گرفته‌نشده و رفتار تمامی اجزا مشابه درنظر گرفته شده‌است.

به‌منظور تشریح روش پیشنهادی شکل‌دهی یک کمان به شعاع r از ورقی با جنس و ضخامت مشخص را در نظرگرفته و با فرض اینکه مرحله پرسکاری انجام یافته، بشرح ذیل می‌توان شبکه برگشت‌فنری را بدست آورد. ورق در ابتدا به شکل قالب تغییرشکل می‌دهد اما بمحض باربرداری انحرافی در شکل آن ایجاد می‌گردد. پروفیل‌های مرجع و برگشت‌فنری را می‌توان با استفاده دو میدان گسسته‌ای که از اجرای برنامه اجزای محدود حاصل می‌شود تعیین می‌شوند. شکل (۲) این دو شبکه را باهم نشان می‌دهد.

برای تعیین شبکه اصلاح‌شده ابتدا، بااستفاده از روش DA ، بردار انحراف هر شبکه را از شکل(۲) تعیین و درنهایت با ضرب این بردار انحراف ضریب Over bending و کسر آن از شبکه مرجع، مطابق شکل (۳) شبکه اصلاح‌شده حاصل می‌شود.

بطویکه اشاره‌شد، این روش بدون‌توجه به جنس و ضخامت ورق اقدام به اصلاح قالب می‌نماید. تنها داده موردنیاز برای این روش شبکه مرجع و برگشت‌فنری می‌باشد. مشکل دیگر مطابق شکل (۳)، تغییرنمودن طول اجزا می‌باشد. با توجه به موقعیت گره‌ها طول یک جزء ممکن است در اثر انبساط و یا انقباض تغییر کند. به‌عنوان مثال طول شبکه مرجع و برگشت‌فنری برابر با ۰/۱۵۲۳ و طول شبکه اصلاح‌شده برابر ۰/۱۶۳۷ می‌باشد.

الگوریتم پیشنهادی به‌صورت دیگری عمل می‌نماید که بسیار کاراتر از الگوریتم DA می‌باشد. بدین‌صورت که سه گره از شبکه مرجع در نظر گرفته‌می‌شود، از این سه گره می‌توان کمانی به‌شعاع r عبور داده‌می‌شود، مطابق شکل (۴) و از رابطه زیر می‌توان شعاع این کمام را بدست آورد.

(۴)

$$cos\left(\frac{\theta}{2}\right)=\frac{L}{2r}\Rightarrow r=\frac{L}{2\,cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

این سه گره پس از باربرداری موقعیت‌های جدیدی را بخود می‌گیرند و زاویه بین خطوط رابط مابین آنها از θ به θ' تغییر می‌یابد و چه‌بسا طول این خطوط نیز تغییر یابد. حال باز از این سه گره کمانی عبور می‌کند که شعاع این کمان، r' از رابطه مشابه بدست می‌آید.

$$r'=\frac{L'}{2\,cos\left(\frac{\theta'}{2}\right)} \qquad (۵)$$

بدیهی‌است که شعاع کمان تغییرشکل‌یافته به پارامترهائی ازجمله مشخصات ورق و شرایط پرسکاری مثل اصطکاک و نیروی ورقگیر بستگی دارد که آنرا می‌توان به‌شکل ذیل نشان داد:

$$r' = f\left(k, n, r, t, F_{blankholder}, \mu\right) \quad (۶)$$

و یا:

$$r' = g\left(k, n, r, t\right).h\left(F_{blankholder}, \mu\right) \quad (۷)$$

در صورت خم‌کاری ساده، بدون اصطکاک و نیروی ورقگیر می‌توان رابطه بین r به r′ را بصورت زیر نوشت[۸]:

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} = A\frac{1}{t}\left(\frac{t}{2r}\right)^n \quad (۸)$$

$$A = k\left(\frac{1+r}{\sqrt{1+2r}}\right)^{n+1}\frac{3\left(1-\upsilon^2\right)}{E\left(1+n\right)} \quad (۹)$$

با بازنویسی روابط (۴) و (۵) می‌توان θ و θ′ را به‌هم مربوط نمود:

$$cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - cos\left(\frac{\theta'}{2}\right) = \frac{A}{2}\times\left(\frac{t}{L}\right)^{n-1}\times cos^n\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (۱۰)$$

رابطه فوق بیان می‌دارد که اگر سه گره را که در ابتدا روی یک خط مستقیم واقع بودند طوری تغییر شکل دهند که خطوط رابط بین‌آنها زاویه θ باشد، پس از باربرداری این زاویه به θ′ تغییر می‌یابد. حال در شکل‌دهی یک کمان واقعی که عوامل مختلفی در آن اثر دارد، این رابطه صادق نمی‌باشد. از اولین اجرای برنامه اجزای محدود دو شبکه مرجع و برگشت‌فنری حاصل می‌شود. بااستفاده از این دو شبکه می‌توان زاویه بین خطوط مجاور روی هر دو شبکه را بدست آورد. در صورت نبود عوامل دیگر زاویه بین دوخط روی شبکه مرجع و زاویه متناظر روی شبکه برگشت‌فنری می‌باید در رابطه فوق صدق کند ولی بدلیل عوامل مختلف این رابطه صدق نمی‌کند. برای اینکه اثر عوامل دیگر را لحاظ نماییم، بطوریکه این رابطه برای هرگره صدق کند می‌توان از یک ضریب ثابت، c در رابطه فوق استفاده کرد:

$$cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - cos\left(\frac{\theta'}{2}\right) = c\frac{A}{2}\times\left(\frac{t}{L}\right)^{n-1}\times cos^n\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (۱۱)$$

از نتایج حاصل از اجرای اجزای محدود در تکرار اول می‌توان با معلوم‌بودن زاویه بین دو خط روی شبکه مرجع، θ و زاویه بین خطوط متناظر روی شبکه برگشت‌فنری، θ′، می‌توان از رابطه (۱۱) ضریب c را بدست آورد. اگر تعداد اجزا، n باشد به تعداد n-1 خط رابط مابین آنها وجود دارد که با معلوم بودن این تعداد زاویه θ و θ′، می‌توان n-1 ضریب c را محاسبه کرد. حال با اصلاح رابطه (۱۰) با c مربوطه می‌توان زاویه اصلاح شده را بدست آورد. باتوجه به پروفیل آرمانی می‌توان زاویه مرجع یا مطلوب بین خطوط را بدست آورد. در تکرار اول قالب طوری ساخته می‌شود که به شکل پروفیل مطلوب باشد و زاویه بین خطوط متناظر زاویه مرجع می‌گردد. ملاحظه می‌شود که پس از باربرداری این زاویه تغییر می‌کند. بااستفاده از این نتیجه، رابطه برای هر گره اصلاح می‌شود. باتوجه به شکل (۵) هدف تعیین زاویه θ_2 است بطوریکه پس از باربرداری این زاویه به θ_r تغییر یابد. با جایگزینی θ_r در رابطه (۱۱) بجای θ′، می‌توان θ_2 را بدست آورد:

$$cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) - cos\left(\frac{\theta_r}{2}\right) = c\frac{A}{2}\times\left(\frac{t}{L}\right)^{n-1}\times cos^n\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \quad (۱۲)$$

با تعیین این زاویه برای هریک از گره‌ها، می‌توان شبکه اصلاح‌شده را بدست آورد.

برای اینکه کارایی این روش را در مسائل عملی نشان داده‌شود، شکل‌دهی U بررسی می‌شود. دراین شکل‌دهی‌تحت شرایط کرنش صفحه‌ای، ورق برگشت‌فنری زیادی را پس از باربردای متحمل می‌شود. جبران‌سازی این مسئله را با دو روش پیشنهادی و DA انجام می‌شود و نتایج باهم مقایسه می‌شود.

شکل (۶) فرم قطعه مطلوب و جدول (۱) مشخصات ورق و قالب را نشان می‌دهند. بطوریکه قبلاً اشاره‌شد، برای مدلسازی فرآیند از بسته نرم‌افزاری ABAQUS استفاده می‌شود. برای انجام این منظور مراحل ذیل طی می‌شوند:

- ابتدا ورق، سنبه و ماتریس، در نرم‌افزار works Solid مدلسازی شده و وارد ABAQUS می‌گردد. بلحاظ اینکه جنس سنبه و ماتریس بسیار سخت‌تر از ورق می‌باشد، دور از واقعیت نیست که آنها به صورت صلب درنظر گرفته‌شوند
- مشخصات جنس، دیاگرام تنش- کرنش و پارامترهای دیگر ورق وارد برنامه می‌گردد.
- مراحل مختلف انجام پروسه مثلاً نگهداشتن ورق، حرکت سنبه به پایین و غیره مشخص می‌شوند
- انجام شبکه‌بندی

پس از مدلسازی مسئله در محیط ABAQUS و اجرای اولین مرحله تکرار می‌توان مطابق شکل (۷) شبکه برگشت‌فنری را بدست آورد. حال می‌باید بردار جابجایی هر گره (موردنیاز برای الگوریتم DA)، اندازه خطوط رابط بین گره‌ها و زاویه بین آنها در هر دو شبکه مرجع و برگشت‌فنری (موردنیاز برای اجرای الگوریتم پیشنهادی) را مطابق شکل (۸) و (۹) بدست آورد. حال با معلوم بودن این داده‌ها می‌توان برای هر دو روش پروفیل جبران‌شده را بدست آورد. نتایج هر دو روش برای اصلاح قالب در شکل (۱۰) نشات داده‌شده است. با استفاده از این پروفیلهای اصلاح‌شده باز برنامه اجزای‌محدود اجرا می‌شود تا اینکه شبکه برگشت‌فنری در دو حالت حاصل شود. برای ارزیابی چگونگی عملکرد این روش‌ها معیار متوسط مجموع مربعات خطاها مورد استفاده قرار گرفت:

$$error = \sqrt{\frac{\sum_{n} d_i^{\,2}}{n}} \qquad (۱۳)$$

در رابطه فوق d_i انحراف هر گره می‌باشد. در جدول (۲) متوسط مجذور خطا برای هر دو الگوریتم درج شده‌است. بطوریکه ملاحظه می‌شود که الگوریتم پیشنهادی بسیار موفق تر عمل می کند و دقت الگوریتم جدید بسیار بالا می‌باشد. شکل (۱۲) چگونگی همگرایی در روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، ارائه الگوریتم جدید برای بهینه‌سازی سطح ابزار در فرآیند کشش عمیق به‌منظور جبران‌سازی خاصیت برگشت فنری می‌باشد بطوریکه دسترسی با یک دقت دلخواه به محصول نهایی میسر گردد. بدین‌منظور در ابتدا، الگوریتم‌های رایج در این زمینه از قبیل DAM و SFM موردبررسی قرار گرفتند. سپس با توجه به مزایا و معایب هر دو روش الگوریتم اصلاح‌شده‌ای ارائه شد. این الگوریتم راهکار متفاوتی را برای جبران‌سازی برگشت‌فنری ارائه می‌کند، بطوریکه درهر مرحله، برای جبران‌سازی، با توجه به جنس، ضخامت و رفتار ورق اقدام به اصلاح شکل قالب می‌نماید. این الگوریتم همچنین، اثرات اصطکاک و نیروی ورقگیر را مد نظر قرارداده که همین امر موجب تسریع در همگرایی حل می‌گردد. در این الگوریتم به شکلی که برگشت‌فنری در قطعه اتفاق می‌افتد، جبران‌سازی انجام می‌شود. با عبور یک کمان از هر سه گره مجاور در روی شبکه مرجع و برگشت‌فنری و اصلاح رابطه رابطه برگشت‌فنری (رابطه ۱۱) می‌توان کمان اصلاح شده را بدست آورد. با تکرار این عمل برای تمام گره‌های شبکه ورق می‌توان یک توده‌ای از نقاط شبکه اصلاح‌شده را بدست‌آورد. این روش باعث کاهش زمان انجام مسئله می‌گردد و نیاز به مراحل تکرار کمتری دارد.

۵- مراجع

[1] Carden, W.P. and Wagoner, R.H., (2002), "Simulation of Spring Back", Int. J. of Mech. Sciences, Vol. 44, pp 103–122.

[2] Rosochowski, A., (2001), "Die Compensation Strategy to Negate Die Deflection and Component Spring Back", Int. J. of mech. Sciences, Vol. 115, pp 187-191.

[3] Gan, W. and Wagoner, R.H., (2004), "Die Design Method for Sheet Spring Back",

Int. J. of Mech. Sciences, Vol. 46, pp 1097–1113.

[4] Lingbeek, R. and Weiher, J., (2005). “The Development of a FE Based Spring Back Compensation Tool for Sheet Metal Products”, J. of Materials Processing Technology, Vol. 169, pp 115–125.

[5] Weiher, J., Rietman, B., Kose, K. , Ohnimus, S. and Petzoldt, M., (2004), “Controlling Spring Back with Compensation Strategies”, Proc. of NUMIFORM2004, Columbus, pp 1011–1015.

[6] Wagoner, R., (2003), “Design of Sheet Forming Dies for Spring Back Compensation”, Proc. of ESAFORM2003, Salerno, pp. 7–14.

[7] Wagoner, R., (2002), “Fundamental Aspects of Spring Back in Sheet Metal Forming”, Proc. of NUMISHEET200, pp 13–19.

[8] Samuel. M., (2000), “Experimental and Numerical Prediction of Spring Back and Side Wall Curl in U-bending of Anisotropic Sheet Metals”, J. Materials Processing Technology, Vol. 105, pp 382-393.

[9] Chou, N. and Hung, C., (1999), “FE Analysis and Optimization on Spring Back Reduction”, Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp 517–536.

[10] Livatyali, H. and Kinzel, G.L., (2003), “CAD of Straight Flanging Using Approximate Numerical Analysis”, J. of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp 532–543.

[11] Choi, K.K. and Kim, N.H., (2002), “Design Optimization of Spring Back in a Deep Drawing Process”, AIAA J., Vol. 40, No. 1, Jan.

[12] Wu, L., (1997), “Tooling Mesh Generation Technique for Iterative FEM Die Surface Design Algorithm to Compensate for Spring Back in Sheet Metal Stamping”. Engineering Computations, Vol., 14, pp 630–48.

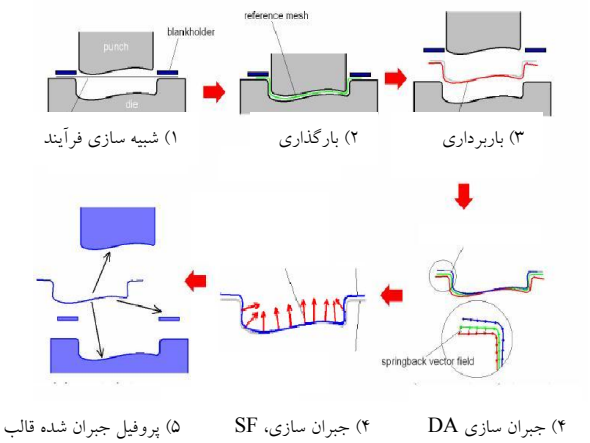
[13] ABAQUS User Manual, Ver. 5.8.

جدول(۱): مشخصات ورق، سنبه و پانج

نام پارامتر	علامت اختصاری	مقدار عددی	واحد
حد تسلیم	K	۶۸۱	Mpa
نمای عددی	n	۰/۲۱۸	-
ضریب یانگ	E	۷۰	Gpa
ضریب دالامبر	ν	۰/۳	-
ضخامت ورق	t	۵	mm
شعاع پانچ	R_p	۵۰	mm
شعاع سنبه	R_d	۵۰	mm
طول ضربه پانچ	L	۱۴۰	mm

جدول (۲): متوسط مجموع مجذورات خطاها

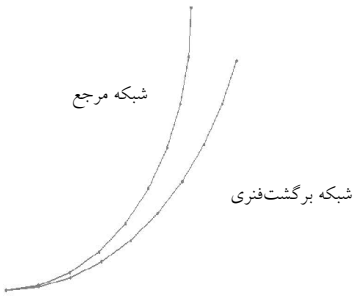
نام الگوریتم	تکرار اول	تکرار دوم
الگوریتم پیشنهادی	۰/۰۱۶	۰/۰۱۰۷
روش DA	۰/۰۱۶	۰/۰۱۳



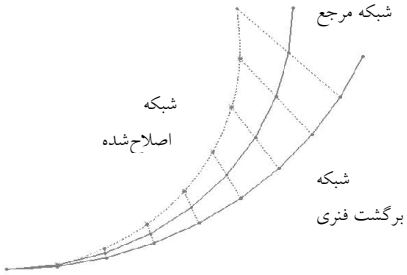
۱) شبیه سازی فرآیند ۲) بارگذاری ۳) باربرداری

۴) جبران سازی DA ۴) جبران سازی، SF ۵) پروفیل جبران شده قالب

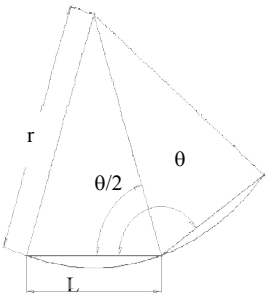
شکل(۱): جبران‌سازی با استفاده از روش SF , DA [۳]



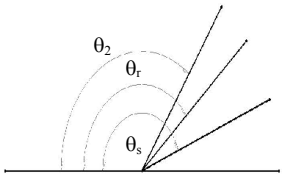
شکل (۲) : شبکه مرجع و برگشت‌فنری یک شکلدهی کمان



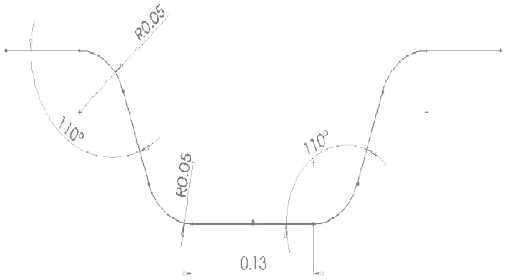
شکل (۳) : شبکه مرجع و برگشت‌فنری یک شکل‌دهی کمان



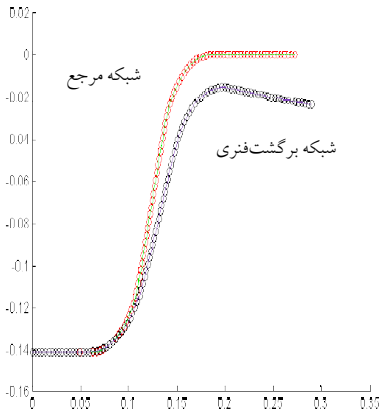
شکل۴: کمان عبوری از سه گره



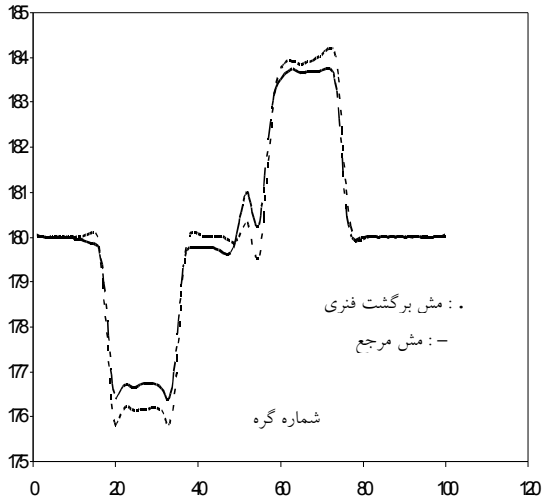
شکل (۵): جبران سازی زاویه بین خطوط



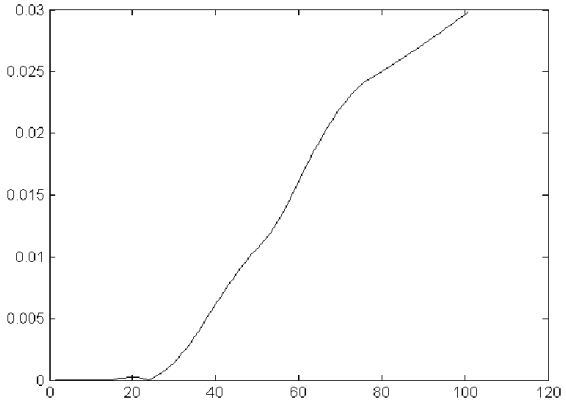
شکل (۶): نمایی از قطعه مطلوب



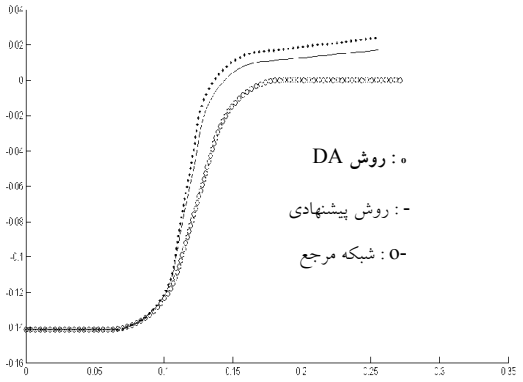
شکل (۷): شبکه مرجع و برگشت‌فنری



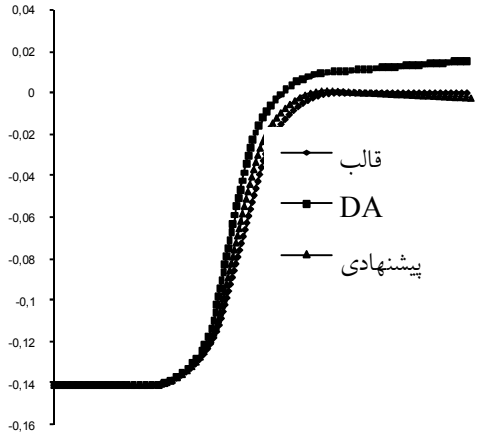
شکل (۸): زاویه بین خطوط روی دو شبکه مرجع و برگشت‌فنری



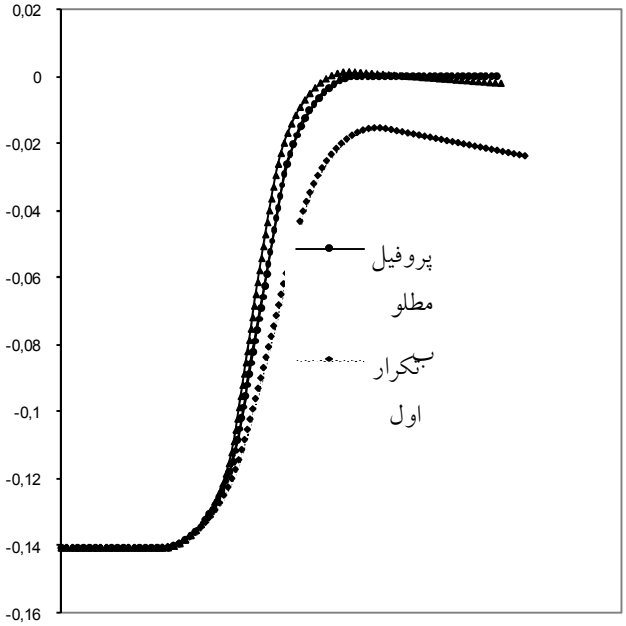
شکل (۹): جابجایی گره‌ها پس از باربرداری در تکرار اول



شکل (۱۰): نتایج جبران‌سازی شکل قالب در تکرار اول



شکل (۱۱) : نتایج برگشت‌فنری قالب اصلاح شده



شکل (۱۲): نتایج برگشت‌فنری قالب اصلاح شده با الگوریتم پیشنهادی