بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود تأثیر خصوصیات مکانیکی لایه الاستیک بر روی برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای

بهروز زارع دژاری[۱] سعید حبیبی ینگجه[۲] بهنام داودی*[۳] عباس وفایی صفت[۴]

دانشکده مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تبریز دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران دانشگاه تبریز دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۲)

چکیده

در سال‌های اخیر روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای به‌عنوان یک روش انعطاف‌پذیر در کاهش زمان و هزینه شکل‌دهی ورق‌های فلزی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این فرایند به‌منظور یکنواخت‌سازی توزیع نیروی شکل‌دهی بر روی ورق، از یک لایه الاستیک مابین پین‌ها و ورق استفاده می‌شود. خواص مکانیکی و ضخامت لایه الاستیک به‌کار رفته می‌تواند شکل‌پذیری ورق فلزی را تحت‌تأثیر قرار دهد. در این پژوهش تأثیر خصوصیات مکانیکی و ابعادی لایه الاستیک بر روی برگشت فنری و دقت ابعادی قطعات شکل داده شده مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور شکل‌دهی قطعات با استفاده از لایه‌های الاستیک از جنس و ضخامت‌های متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که جنس و ضخامت لایه الاستیک مورد استفاده تأثیر بسزایی بر میزان برگشت فنری داشته و انتخاب مناسب آنها برای تولید قطعات با کیفیت و دقت ابعادی بالا بسیار مهم و اساسی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی چند نقطه‌ای، برگشت فنری، لایه الاستیک، شبیه‌سازی اجزای محدود، فولاد ضد زنگ SS304

Experimental Investigation and Finite Element Simulation of Effect of Mechanical Properties of Elastic Cushion on Spring-Back in Multi-Point Forming Process

B. Zareh-Desari
Faculty of Mechanical Engineering
University of Tabriz

S. Habibi-Yengejeh
Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering
Science and Research Branch,
Islamic Azad University, Tehran

B. Davoodi
Faculty of Mechanical Engineering
University of Tabriz

A. Vafaeesefat
Imam Hossein University

(Received: 30/January/2014; Accepted: 13/March/2014)

ABSTRACT

Multi-Point forming technology has gained a great attention in recent years, in order to reduce die design time and manufacturing costs of sheet metal parts. In this process an elastic cushion is used in order to distribute the loads applied on the sheet by the punch elements. Mechanical properties and thickness of the elastic cushion can affect sheet metal formability during the forming process. In this study, the effects of these parameters on spring-back and dimensional accuracy of formed parts have been investigated. The forming process has been examined by using different elastic cushions with different thickness. The obtained results indicated that mechanical properties and thickness of elastic cushion have considerable effect on the spring-back and in order to produce parts with good quality and high dimensional accuracy the appropriate selection of the elastic cushion is very important.

Keywords: Multi-Point Forming, Spring-Back, Elastic Cushion, Finite Element Simulation, SS304 Stainless Steel

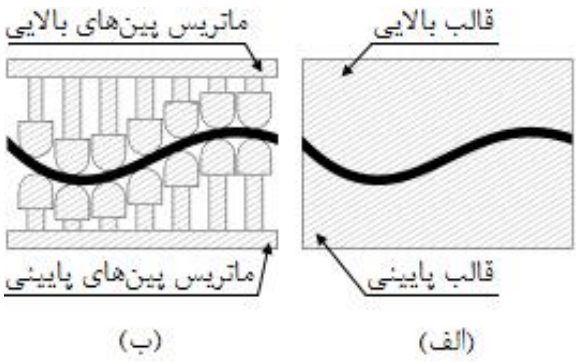
۱- دانشجوی دکتری: b.zareh@tabrizu.ac.ir
۲- کارشناس ارشد: habibiyen@yahoo.com
۳- دانشیار (نویسنده پاسخگو): b.davoodi@tabrizu.ac.ir
۴- استاد: avafaee@ihu.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

قطعات ورقه‌ای کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی، صنایع الکترونیکی و غیره دارند. در اغلب فرایندهای متداول مورد استفاده در شکل‌دهی قطعات ورقه‌ای، ورق با استفاده از مجموعه‌ای از قالب‌های صلب سنبه- ماتریس شکل داده می‌شود. طراحی و ساخت این قبیل قالب‌ها زمان‌بر و پر هزینه بوده و منجر به افزایش زمان انتظار پیش از تولید می‌گردد. از طرفی قالب‌های ساخته شده تنها می‌توانند برای تولید یک قطعه با مشخصات و ویژگی‌های هندسی خاص مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به ویژگی‌های بیان شده، استفاده از روش‌های فوق تنها زمانی از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار خواهند بود که برای تولید انبوه به‌کار گرفته شوند. از سوی دیگر با توجه به افزایش روزافزون تقاضا برای تولیدات تکی و سفارشی و در نظر گرفتن محدودیت بیان شده برای روش‌های سنتی شکل‌دهی، نیاز به ابداع و استفاده از روش‌های جدید شکل‌دهی بیش از پیش مورد نیاز می‌باشد. از میان روش‌های جدید ارائه شده، روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر همچون فرایند شکل‌دهی افزایشی [۱]، فرایند شکل‌دهی با استفاده از بالشتک لاستیکی [۲] و غیره مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. استفاده از قالب‌های قابل تغییر شکل یا همان روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای یکی دیگر از روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر می‌باشد که در این روش مطابق شکل **۱** قالب‌های بالایی و پایینی صلب موجود در روش‌های سنتی توسط پین‌هایی با فاصله مشخص جایگزین می‌گردند. ارتفاع هر یک از این پین‌ها که ساختاری ثابت و یا فعال دارند، جهت حصول انحناهای مختلف قابل تنظیم می‌باشد، بنابراین می‌توان قطعات با هندسه‌های مختلف را توسط یک قالب تولید کرد. شکل‌دهی چند نقطه‌ای نه تنها باعث کاهش چشم‌گیر هزینه و زمان در طراحی، ساخت و زمان انتظار پیش از تولید می‌شود بلکه علاوه بر آن می‌توان با کنترل مناسب مسیر شکل‌دهی کیفیت شکل‌دهی را نیز افزایش داد [۵-۳]. به‌علت مزایای قابل توجه فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، در طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده و روش‌های مختلفی همچون روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای موضعی [۶ و ۷]، شکل‌دهی چند نقطه‌ای ساندویچی [۸]، شکل‌دهی چند نقطه‌ای با استفاده از ورق‌گیر [۹]، شکل‌دهی چند نقطه‌ای مرحله‌ای [۱۰]، شکل‌دهی کششی چند نقطه‌ای [۱۱] و غیره ارائه شده‌اند.



شکل (۱): (الف) فرایند شکل‌دهی سنتی و (ب) فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای.

کاهش و جبران برگشت فنری ایجاد شده در قطعه‌کار در وهله اول می‌تواند با اصلاح پارامترهای شکل‌دهی همچون پارامترهای مواد، پارامترهای هندسی و غیره صورت گیرد و در وهله دوم می‌توان با ایجاد تغییرات و اصلاحات هندسی در قالب ساخته شده میزان برگشت فنری را کاهش داد. استفاده از راهکار دوم یعنی اصلاح هندسه قالب در فرایندهای شکل‌دهی سنتی بیشتر مبتنی بر سعی و خطا بوده و با افزایش قابل ملاحظه هزینه‌ها همراه می‌باشد، در حالی‌که در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای ایجاد تغییرات هندسی در قالب به آسانی و بدون افزایش هزینه‌ها امکان‌پذیر می‌باشد، که با استفاده از این قابلیت، راهکارهای مختلفی برای جبران برگشت فنری قطعات شکل داده شده در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای ارائه شده است. لی[1] و همکاران [۱۲ و ۱۳] با ترکیب قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای با نرم‌افزارهای CAD/CAM/CAE و همچنین مجهز کردن آن به تجهیزات اندازه‌گیری آنی، فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای با استفاده از قالب دیجیتالی حلقه بسته را پیشنهاد دادند. در این روش بعد از اتمام فرایند شکل‌دهی و حذف نیروها، هندسه قطعه‌کار تولید شده اندازه‌گیری شده و اختلاف آن با هندسه هدف به‌عنوان بازخورد به سامانه کنترل دستگاه فرستاده می‌شود. در ادامه بر اساس خطای اندازه‌گیری شده، سطح‌کاری قالب تغییر می‌یابد و فرایند شکل‌دهی دوباره روی قطعه‌کار انجام می‌گیرد. این چرخه تا زمانی تکرار می‌گردد که میزان خطای قطعه شکل داده شده، در محدوده قابل قبولی قرار گیرد. محققان مذکور نشان دادند که با استفاده از این روش و تنها با چند مرحله تکرار فرایند می‌توان قطعه‌کار مطلوب با خطای هندسی مجاز را تولید کرد.

1- Li

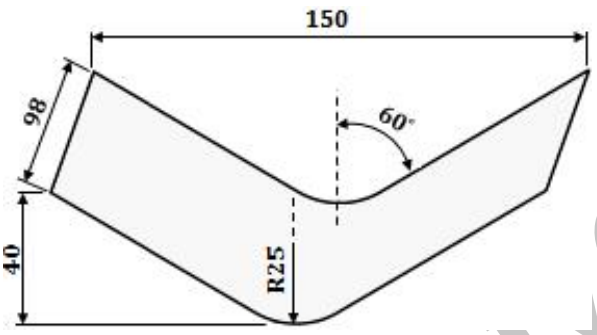
Archive of SID

www.SID.ir

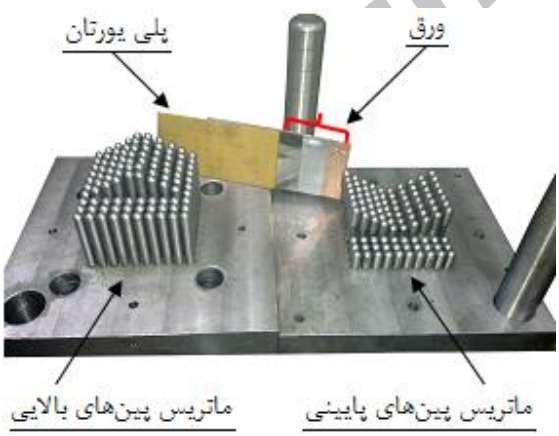
در زمینه تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر روی برگشت فنری قطعات شکل داده شده با روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای، تنها می‌توان به کارهای تحقیقاتی کای[1] و همکارانش [۱۴] اشاره کرد. آنان تأثیر پارامترهای هندسی را بیشتر مورد توجه قرار داده و نشان داده‌اند که مشابه با فرایند شکل‌دهی سنتی، در این فرایند نیز با افزایش شعاع قطعه‌کار میزان برگشت فنری افزایش می‌یابد. همان‌طور که بیان گردید در اغلب تحقیقات صورت گرفته در زمینه برگشت فنری قطعات شکل داده شده با روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای، بیشتر جنبه انعطاف‌پذیری فرایند مدنظر قرار گرفته است. برای توسعه و گسترش این روش در زمینه‌های مختلف صنعتی لازم است که تأثیر پارامترهای شکل‌دهی همچون پارامترهای مواد و پارامترهای فرایندی نیز بر روی میزان برگشت فنری مورد مطالعه و تحلیل کامل قرار گیرد. یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای خصوصیات مکانیکی و ابعاد هندسی لایه الاستیک مورد استفاده در حین شکل‌دهی می‌باشد. هدف مقاله حاضر بررسی تأثیر پارامترهای لایه الاستیک بر روی میزان برگشت فنری، دقت ابعادی و همچنین سایر عیوب ایجاد شده در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشد. به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای فوق بر روی عیوب و میزان برگشت فنری قطعات شکل داده شده، شکل‌دهی یک قطعه با هندسه V شکل با استفاده از ورق‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن SS304 با ضخامت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌متر و تحت شرایط مختلف شکل‌دهی به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مراحل آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر میزان برگشت فنری، شکل‌دهی قطعه با هندسه V شکل مورد مطالعه قرار گرفته است. هندسه قطعه‌کار مورد مطالعه در شکل **۲** نشان داده شده است. دلیل انتخاب هندسه V شکل به‌علت مواردی همچون سادگی (با توجه به تعداد پین زیاد به‌کار رفته در قالب، زمان تنظیم ارتفاع پین‌ها کاهش می‌یابد) و امکان کنترل و خنثی نمودن تأثیر سایر پارامترها هنگام بررسی تأثیر یک پارامتر مشخص می‌باشد. شکل **۳** قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در ساخت قالب فوق مجموعاً از ۲۰۰ عدد پین سر نیم‌کروی استفاده شده است که هریک از پین‌ها مستقل از هم بوده و به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ارتفاع هر یک از آنها به آسانی قابل تنظیم می‌باشد. بنابراین با تنظیم ارتفاع آنها می‌توان به انحناهای مختلفی دست یافت. یکی از نکات حایز اهمیت در قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای انتخاب مناسب قطر پین‌های مورد استفاده می‌باشد. با کاهش قطر پین‌ها سطح قالب با دقت ابعادی بالاتری تخمین زده شده و قطعه تولید شده از دقت ابعادی بالاتری برخوردار خواهد بود. از سوی دیگر کاهش بیش از اندازه قطر پین‌ها می‌تواند منجر به افزایش پیچیدگی و هزینه‌های ساخت قالب ۵ گردد. بر اساس نتایج تحقیقات و شبیه‌سازی‌های قبلی انجام شده توسط نگارندگان مقاله حاضر [۱۵ و ۱۶] مقدار بهینه قطر پین‌ها ۱۲ میلی‌متر انتخاب شده است. برای انجام آزمایشات از یک پرس هیدرولیکی میکرو سوئیچ‌دار با توان ۱۵۰ تن استفاده شده است.



شکل (۲): ابعاد هندسی قطعه‌کار V شکل مورد مطالعه.



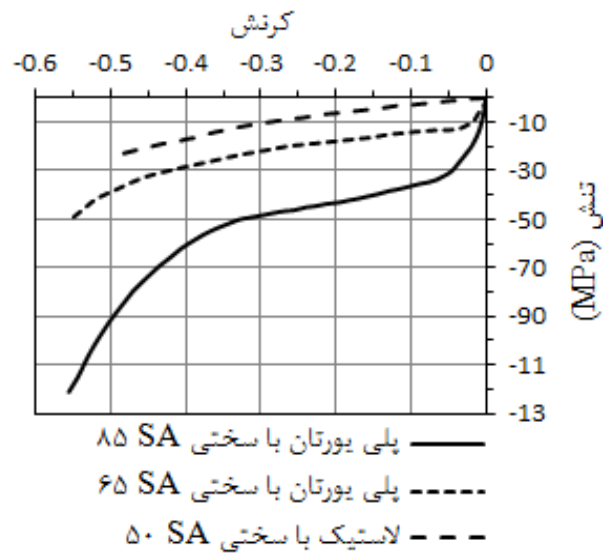
شکل (۳): اجزای قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد استفاده در آزمایشات تجربی.

یکی از متداول‌ترین عیوب ایجاد شده در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، عیب فرورفتگی می‌باشد. با توجه به اینکه در این

1- Cai

www.SID.ir

فرایند سطح قالب از کنار هم قرار گرفتن مجموعه‌ای از المان‌های گسسته تشکیل می‌شود، بنابراین در حین فرایند شکل‌دهی، به‌دلیل عدم تماس یکنواخت بین ابزار شکل دهنده و ورق، نیروی پین‌ها به‌صورت نقطه‌ای و متمرکز به ورق وارد می‌شود که نتیجه آن وقوع عیب فرورفتگی در ورق خواهد بود. با به‌کارگیری یک لایه الاستیک مابین ورق و پین‌ها نیروی شکل دهنده بر روی ورق توزیع شده و بدین ترتیب می‌توان از ایجاد عیب فرورفتگی در قطعه شکل داده شده جلوگیری کرد. خصوصیات لایه الاستیک مورد استفاده تأثیر قابل توجهی بر روی شکل‌پذیری ورق فلزی داشته و پارامترهایی همچون جنس، سختی و ضخامت لایه الاستیک می‌توانند دقت ابعادی، توزیع ضخامت و سایر خصوصیات قطعه شکل داده شده را تحت تأثیر قرار دهند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای فوق‌الذکر بر روی میزان برگشت فنری، دقت ابعادی و سایر عیوب ایجاد شده در قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک از جنس لاستیک و پلی‌یورتان، با سختی و ضخامت‌های مختلف به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر این پارامترها بر عیوب ذکر شده بررسی شده است. برای تعیین خواص لایه‌های الاستیک مورد استفاده در آزمایشات، برای هر جنس طبق استاندارد ASTM D575-91 آزمایش فشار بر روی یک نمونه استوانه‌ای شکل انجام گرفته است. شکل **۴** نمودارهای تنش-کرنش به‌دست آمده از آزمایش فشار را برای سه نوع لایه الاستیک نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمودار تنش- کرنش لایه‌های الاستیک مورد استفاده.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فوق، ورق‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن SS304 با ضخامت‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق مورد استفاده طبق استاندارد ASTM B557m آزمون کشش تک محوره انجام گردید. نتایج حاصل از این آزمایش جهت تعیین خواص مکانیکی ورق مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مکانیکی به‌دست آمده در جدول **۱** ارائه شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی ورق مورد استفاده.

پارامتر	مقدار
چگالی (kg/m^3)	ρ = ۷۹۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	E = ۱۹۴
ضریب پواسون	υ =۰/۳۳
استحکام تسلیم (MPa)	σ_y = ۳۲۳
توان کرنش سختی n	n =۰/۲۵
ضریب استحکام (MPa)	K = ۵۶۵
ضخامت (mm)	t = ۰/۵ ،۱

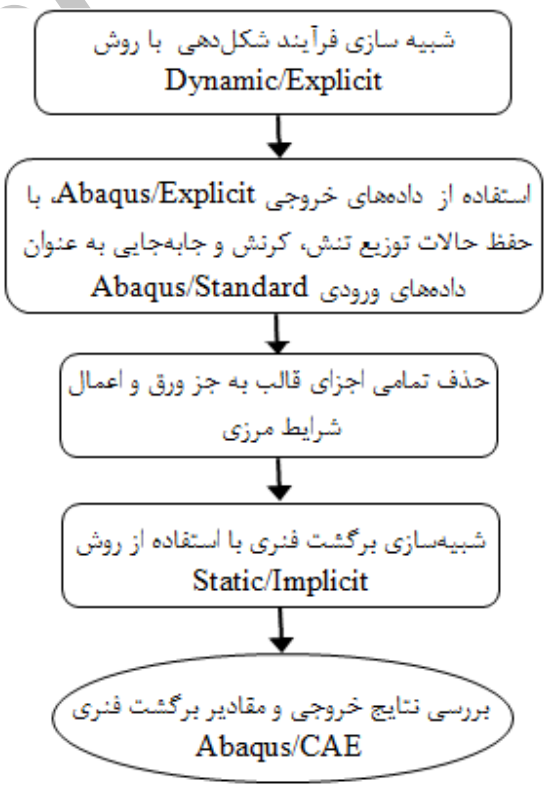
۳- شبیه‌سازی اجزاء محدود

برای اجرای شبیه‌سازی‌ها از کد تجاری Abaqus نسخه 6.9.3 استفاده شده است. شکل **۵** ترتیب مراحل انجام شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق به‌علت دقت و سرعت بالای روش Dynamic/Explicit در حل مسایل تماسی پیچیده ابتدا با استفاده از این روش فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای شبیه‌سازی شده و در ادامه برای شبیه‌سازی پدیده برگشت فنری، از روش Static/Implicit استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً بیان گردید برای مطالعه تأثیر پارامترها بر میزان برگشت فنری، قطعه‌کار با هندسه V شکل در نظر گرفته شده است. شکل **۶** مدل اجزای محدود ایجاد شده برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به‌علت تقارن هندسی قطعه مورد نظر و به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی، مطابق شکل **۶** تنها ۱/۴ ورق و سایر اجزای قالب مدل شده‌اند. با توجه به تقارن هندسی استفاده شده، چرخش حول محورهای تقارن ورق و لایه‌های الاستیک و همچنین حرکت در راستای عمود بر این محورها محدود گردیده است. ورق به‌عنوان یک ماده الاستیک- پلاستیک تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شده و از المان‌های پوسته‌ای چهار گرهی S4R برای شبکه‌بندی آن استفاده شده است. جهت معرفی خواص ورق‌های مورد استفاده نتایج

Archive of SID

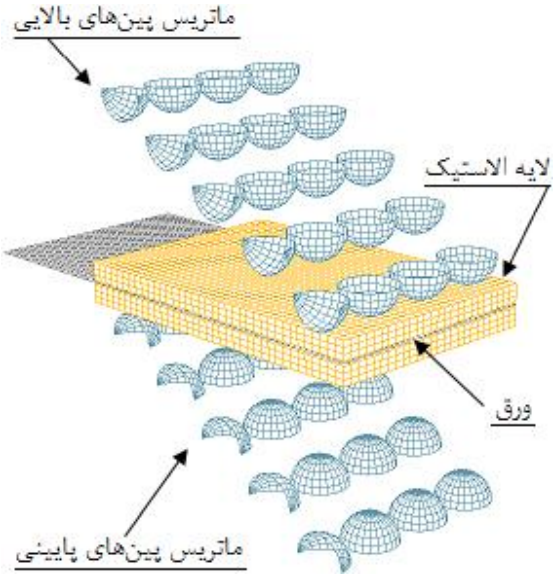
www.SID.ir

به‌دست آمده از تست کشش ورق به‌صورت جدول تنش- کرنش به نرم‌افزار وارد گردید. لایه‌های الاستیک به‌صورت تغییر شکل‌پذیر هایپر الاستیک مدل شده و داده‌های به‌دست آمده از نمودار شکل **۴** به‌طور مستقیم به نرم‌افزار معرفی گردیده است. مدل مونی- ریولین[1] به منظور توصیف خصوصیات ماده الاستیک در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۷]. از المان ۸ گرهی C3D8R برای شبکه‌بندی لایه‌های الاستیک استفاده شده است. مجموعه پین‌های بالایی و پایینی به‌صورت پوسته‌ای صلب مدل شده‌اند و تنها در جهت عمودی آزادی حرکت دارند. شبکه‌بندی پین‌ها با استفاده از المان‌های R3D4 انجام گرفته است. نوع تماس اجزای قالب با یکدیگر از نوع سطح به سطح انتخاب شده و برای تعریف شرایط اصطکاکی مابین سطوح پین‌ها و لایه الاستیک و همچنین ورق با لایه الاستیک از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. ضریب اصطکاک سطح تماس مابین ورق و لایه الاستیک و لایه الاستیک با سطح پین‌ها به‌ترتیب ۰/۱ و ۰/۲ می‌باشد.



شکل (۵): مراحل شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای و پدیده برگشت فنری.

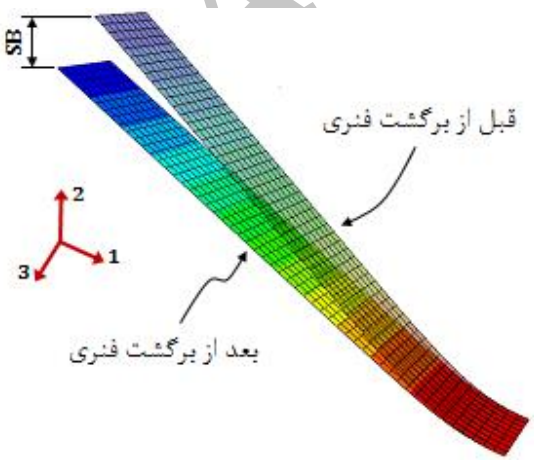
1- Mooney Rivlin



شکل (۶): مدل اجزای محدود مورد استفاده در شبیه‌سازی قطعه V شکل.

۴- نتایج و بحث

شکل‌دهی قطعه‌کار V شکل تحت شرایط مختلف شکل‌دهی مورد آزمایش قرار گرفت که در این آزمایش‌ها از ورق‌های فولاد ضد زنگ SS304 با ضخامت‌های مختلف، لایه‌های الاستیک با جنس، ضخامت و سختی متفاوت استفاده گردید و تأثیر این پارامترها جهت شکل‌دهی قطعه‌ای با کیفیت و دقت ابعادی مناسب و کمترین میزان برگشت فنری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل هندسی قطعه مورد مطالعه، به منظور مقایسه مقادیر برگشت فنری مطابق شکل **۷** تغییر ارتفاع قطعات شکل داده شده مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.



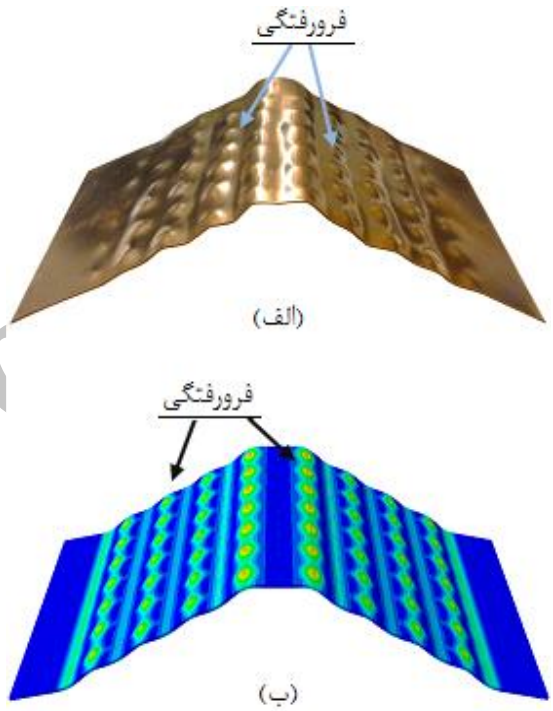
شکل (۷): نحوه اندازه‌گیری میزان برگشت فنری.

Archive of SID

www.SID.ir

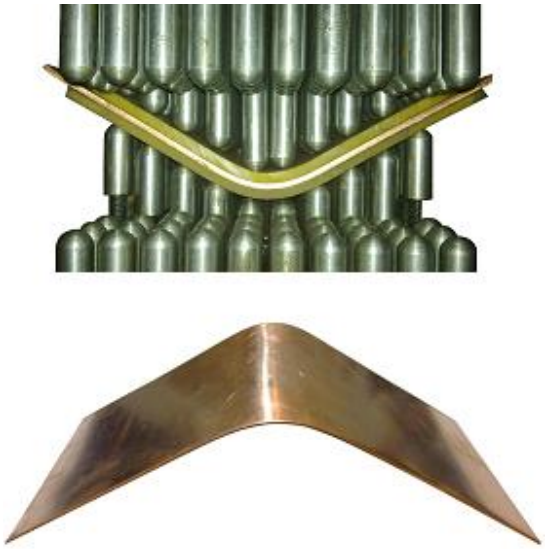
۴-۱- پدیده فرورفتگی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره گردید در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای به‌دلیل عدم تماس یکنواخت بین ابزار شکل دهنده و ورق، نیروی پین‌ها به‌صورت نقطه‌ای و متمرکز به ورق وارد می‌شود. نتیجه حاصل از نیروی نقطه‌ای و متمرکز، شکل‌دهی موضعی و ایجاد عیب فرورفتگی در قطعه‌کار می‌باشد. شکل **۸** وقوع این عیب را در نمونه شکل داده شده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد.



شکل (۸): ایجاد فرورفتگی به‌دلیل تماس مستقیم پین‌ها با ورق (الف) آزمایش تجربی و (ب) شبیه‌سازی.

برای جلوگیری از ایجاد عیب فرورفتگی، استفاده از یک ماده انعطاف‌پذیر (لایه الاستیک) مابین سطح ورق و سطح پین‌ها در حین عملیات شکل‌دهی ضروری می‌باشد. معمولاً به‌علت مقاومت بالای پلی‌یورتان در برابر سایش و روغن، از این جنس به‌عنوان لایه الاستیک استفاده می‌شود. شکل **۹** نمونه‌ای از قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک از جنس پلی‌یورتان با سختی Shore-A ۸۵ و ضخامت ۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطعه شکل داده شده از کیفیت سطح بسیار مناسبی برخوردار می‌باشد.

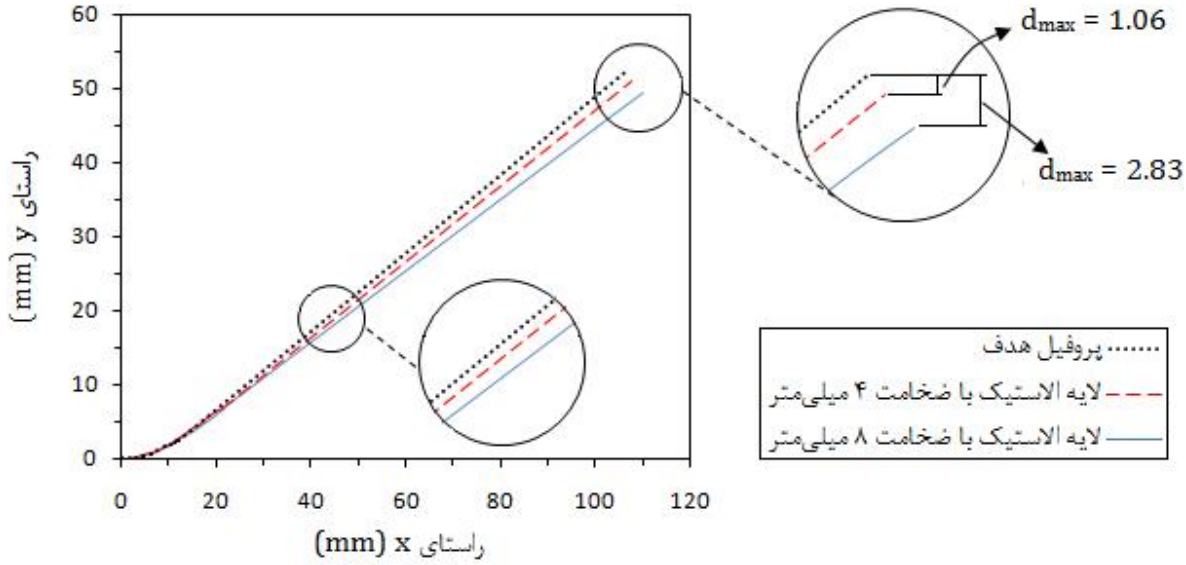


شکل (۹): قطعه شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک از جنس پلی‌یورتان با سختی Shore-A ۸۵.

یکی از پارامترهای مهمی که در به‌کارگیری لایه الاستیک باید مدنظر قرار گیرد ضخامت لایه الاستیک می‌باشد. استفاده از لایه الاستیک با ضخامت بیش از حد علاوه بر افزایش هزینه‌ها می‌تواند دقت ابعادی قطعه تولید شده را تحت تأثیر قرار دهد. از طرفی، استفاده از لایه الاستیک با ضخامت کم منجر به عدم رفع کامل عیب فرورفتگی و تولید قطعه با کیفیت سطح نامناسب شده و همچنین خرابی و پارگی زودرس لایه الاستیک را در پی خواهد داشت. بنابراین، می‌بایستی یک مقدار مطلوبی برای ضخامت لایه الاستیک انتخاب شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده از بررسی کیفیت سطح و توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی، حداقل ضخامت لازم لایه پلی‌یورتان برای تولید قطعات سالم همراه با کیفیت سطح و دقت ابعادی مناسب ۴ میلی‌متر می‌باشد. در شکل **۱۰** پروفیل قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه‌های الاستیک با ضخامت‌های متفاوت مورد مقایسه قرار گرفته است. در این شکل پروفیل قطعات شکل داده شده قبل از برگشت فنری مورد مقایسه قرار گرفته و d_{max} نشان‌دهنده حداکثر اختلاف ابعادی پروفیل قطعه‌کار شکل داده شده با پروفیل هدف می‌باشد. همان‌گونه که می‌توان مشاهده کرد با افزایش ضخامت لایه الاستیک، دقت ابعادی قطعه‌کار کاهش می‌یابد بنابراین برای تولید قطعات با دقت ابعادی بالاتر مناسب‌تر آن است که ضخامت لایه الاستیک حداقل مقدار لازم برای جلوگیری از وقوع عیب فرورفتگی در نظر گرفته شود.

Archive of SID

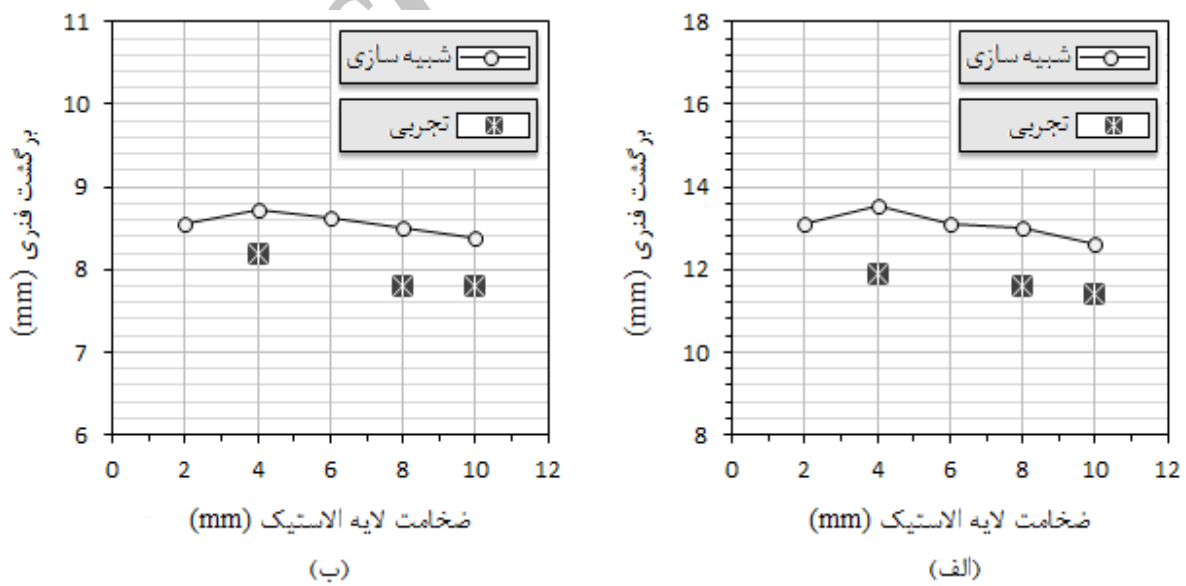
www.SID.ir



شکل (۱۰): پروفیل قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه‌های الاستیک با ضخامت‌های متفاوت (شبیه‌سازی- پیش از برگشت فنری).

۴-۲- تأثیر ضخامت لایه الاستیک بر روی برگشت فنری

همان‌طور که در بخش قبل بیان گردید در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای برای جلوگیری از وقوع عیب فرورفتگی در قطعات شکل داده شده و تولید قطعاتی با دقت ابعادی بالا ضخامت لایه الاستیک یک فاکتور کلیدی در فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشد. در این بخش تأثیر پارامتر مذکور بر میزان برگشت فنری قطعات شکل داده شده مورد بررسی قرار گرفته است. شکل **۱۱** منحنی تغییرات میزان برگشت فنری را نسبت به تغییرات ضخامت لایه الاستیک نشان می‌دهد. لایه الاستیک به‌کار رفته پلی‌یورتان با سختی ۸۵ SA بوده و آزمایشات بر روی ورق‌هایی از فولاد زنگ نزن SS304 با ضخامت ۰/۵ و ۱ میلی‌متر انجام گرفته است. مشاهده می‌شود که در حالت کلی با افزایش ضخامت لایه الاستیک میزان برگشت فنری ایجاد شده در قطعه‌کار کاهش می‌یابد. این روند در هر دوی نتایج به‌دست آمده از آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۱۱): منحنی تغییرات میزان برگشت فنری با تغییرات ضخامت لایه الاستیک الف) ضخامت ورق: ۰/۵ میلی‌متر و ب) ضخامت ورق: ۱ میلی‌متر.

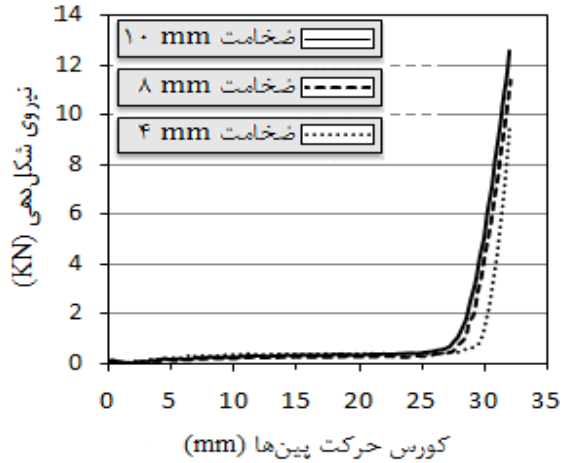
Archive of SID

www.SID.ir

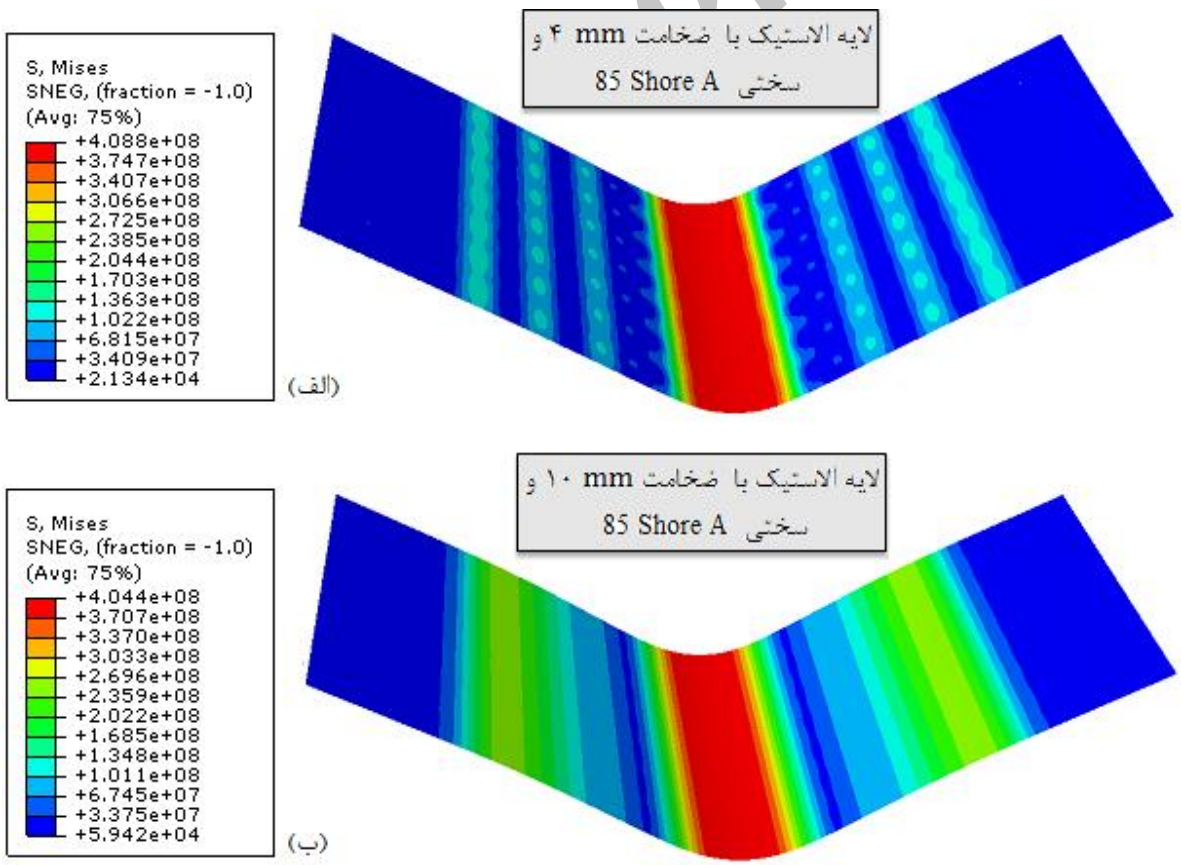
دلیل کاهش میزان برگشت فنری با افزایش ضخامت لایه الاستیک را می‌توان این گونه بیان کرد که مطابق شکل **۱۲** با افزایش ضخامت لایه الاستیک مقدار نیروی لازم برای شکل‌دهی افزایش یافته و در نتیجه منجر به ایجاد تغییر شکل پلاستیک بیشتر در قطعه به‌ویژه در مراحل پایانی شکل‌دهی خواهد شد. همچنین با افزایش ضخامت لایه الاستیک توزیع تنش قطعه یکنواخت‌تر بوده و این امر نیز می‌تواند در کاهش برگشت فنری مؤثر باشد. توزیع تنش در قطعه شکل داده شده با دو ضخامت متفاوت لایه الاستیک در شکل **۱۳** مورد مقایسه قرار گرفته است.

۴-۳- تأثیر سختی لایه الاستیک بر روی برگشت فنری

خصوصیات مکانیکی لایه الاستیک بکار رفته در آزمایشات تأثیر قابل توجهی بر روی شکل‌پذیری ورق فلزی دارد. مهمترین خصوصیت مکانیکی لایه الاستیک سختی آن می‌باشد. در این پژوهش از سه لایه الاستیک با سختی‌های متفاوت شامل لایه لاستیکی با سختی ۵۰، لایه پلی‌یورتان با سختی ۶۵ و لایه پلی‌یورتان با سختی ۸۵ برای انجام آزمایشات استفاده شده و تأثیر این پارامتر بر روی مقدار برگشت فنری قطعات شکل داده شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱۲): منحنی نیروی شکل‌دهی قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه‌های الاستیک با ضخامت متفاوت.

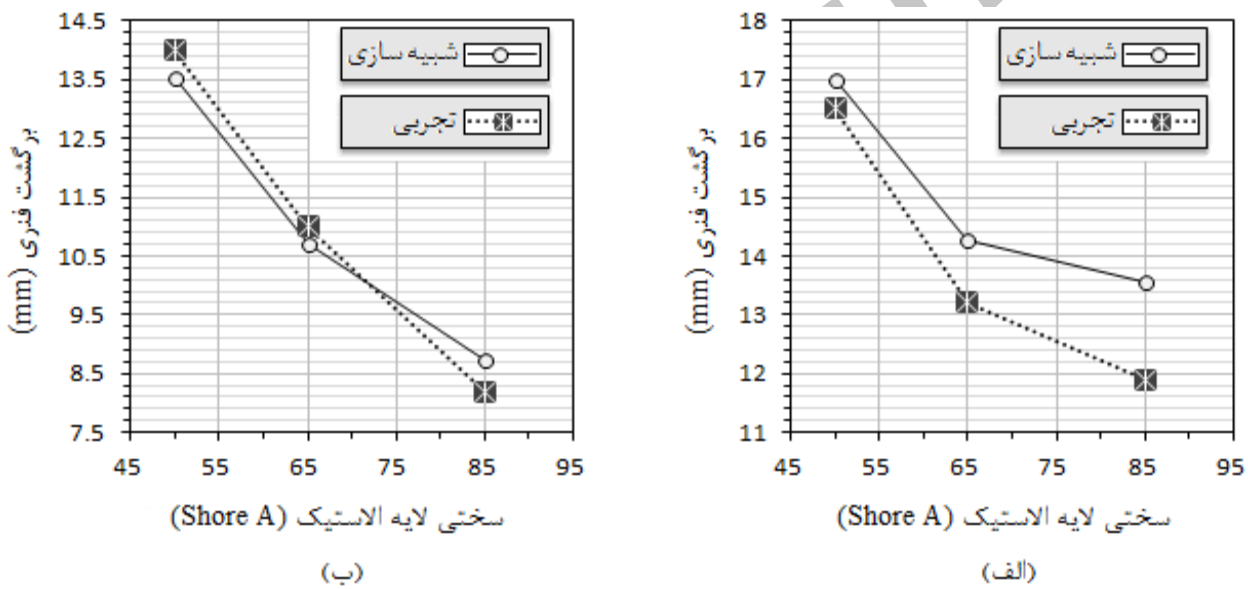


شکل (۱۳): توزیع تنش نمونه‌های شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک با ضخامت الف) ۴ میلی‌متر و ب) ۱۰ میلی‌متر.

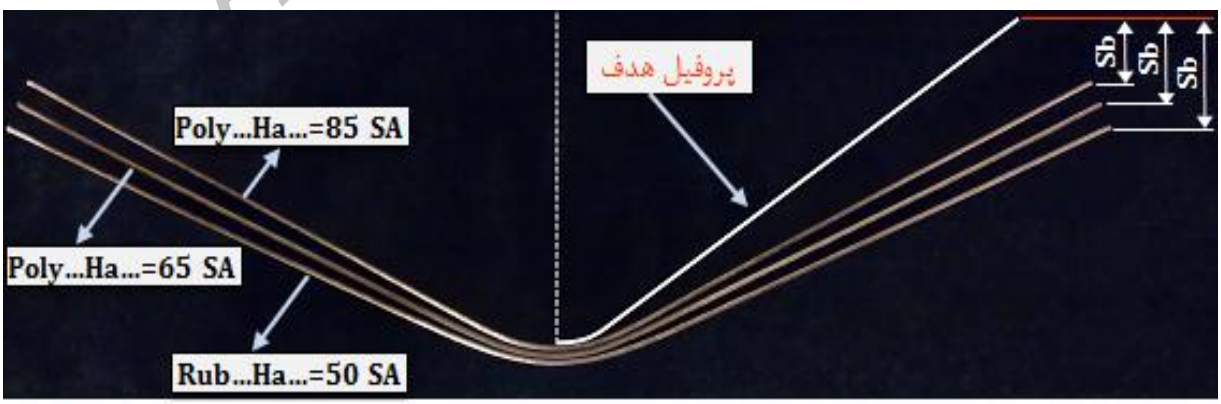
www.SID.ir

شکل **۱۴** مقادیر برگشت فنری قطعه V شکل را برای لایه الاستیک با سختی‌های مختلف به‌ازای ضخامت‌های متفاوت ورق نشان می‌دهد. نمونه‌ای از قطعات شکل داده شده در آزمایشات تجربی در شکل **۱۵** نشان داده شده است.

شکل‌های فوق نشان می‌دهند که برای ضخامت‌های مختلف ورق، با افزایش سختی لایه الاستیک، مقدار برگشت فنری به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این امر افزایش تغییر شکل پلاستیک کل ایجاد شده در قطعه‌کار در نتیجه افزایش نیروی شکل‌دهی با افزایش سختی لایه الاستیک می‌باشد. شکل **۱۶** منحنی نیروی شکل‌دهی را برای لایه الاستیک با سختی‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق با افزایش سختی لایه الاستیک، مقدار نیروی لازم برای شکل‌دهی قطعه‌کار به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در شکل **۱۷** توزیع ضخامت در قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک با سختی Shore-A ۵۰ و Shore-A ۸۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با استفاده از لایه الاستیک سخت‌تر، قطعه‌کار در ناحیه شعاع خم که تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در این منطقه اهمیت بسیار بالایی در میزان برگشت فنری قطعه‌کار دارد دچار کرنش ضخامتی بیشتری شده است در نتیجه با افزایش مقدار تغییر شکل پلاستیک در جهت ضخامت و کاهش باند الاستیک، مقدار برگشت فنری ایجاد شده در قطعه‌کار شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک با سختی بالاتر، پایین‌تر خواهد بود.

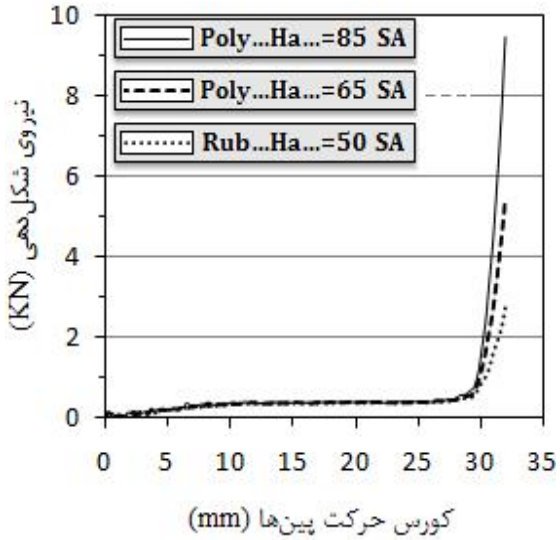


شکل (۱۴): منحنی تغییرات میزان برگشت فنری با تغییرات سختی لایه الاستیک (الف) ضخامت ورق: ۰/۵ میلی‌متر (ب) ضخامت ورق: ۱ میلی‌متر.



شکل (۱۵): نمونه‌ای از قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک با سختی‌های مختلف (ضخامت ورق: ۱ میلی‌متر).

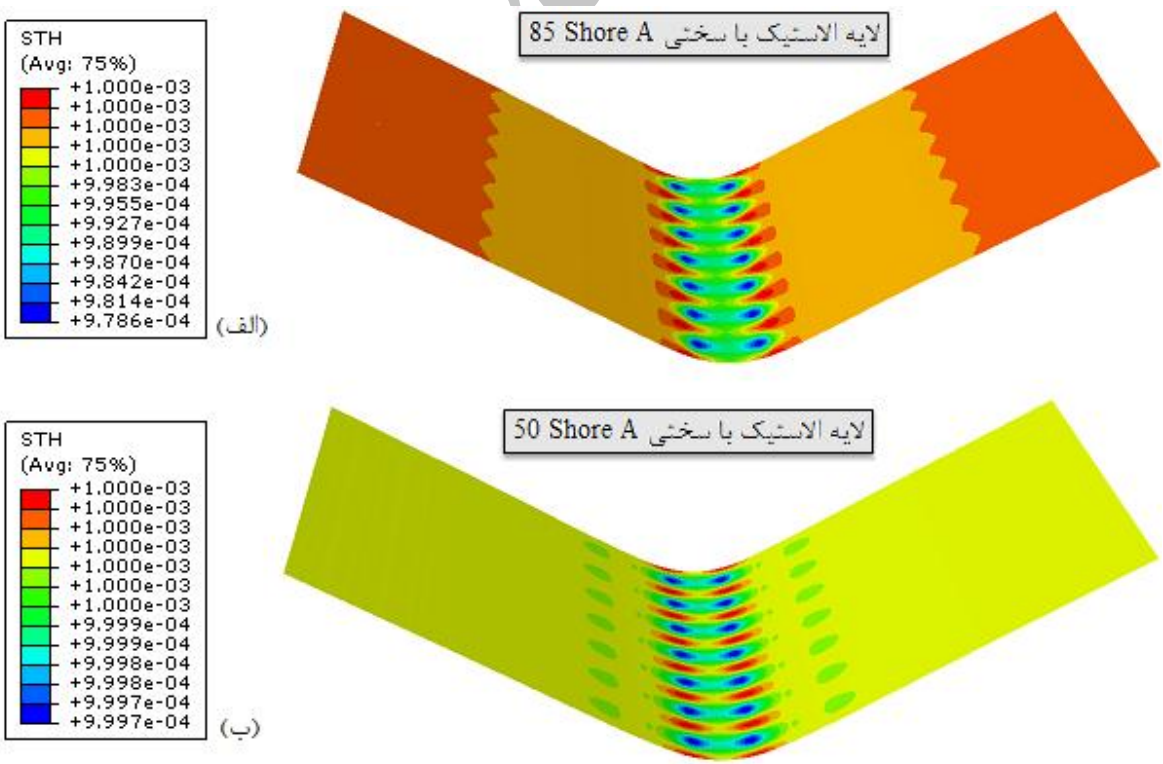
www.SID.ir



شکل (۱۶): منحنی نیروی شکل‌دهی کل قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک با سختی‌های متفاوت.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر خواص مکانیکی و ابعادی لایه الاستیک بر روی میزان برگشت فنری، دقت ابعادی و عیوب ایجاد شده در قطعات شکل داده شده با فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود و آزمایشات تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور شکل‌دهی قطعه‌کار با هندسه V شکل از جنس فولاد ضد زنگ SS304 و ضخامت‌های متفاوت تحت شرایط مختلف شکل‌دهی (استفاده از لایه الاستیک با جنس، سختی و ضخامت‌های مختلف) مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر بیانگر آن است که: فرورفتگی در سطح قطعات شکل‌دهی شده توسط قالب چند نقطه‌ای، اولین چالش هنگام به‌کارگیری این روش شکل‌دهی است. برای رفع عیب فرورفتگی از لایه الاستیک بین پین‌ها و ورق فلزی استفاده می‌شود. انتخاب صحیح سختی و ضخامت لایه الاستیک از پارامترهای مؤثر در کنترل عیب فرورفتگی است. ضخامت لایه الاستیک یکی از پارامترهایی است که باید به‌صورت بهینه انتخاب شود. استفاده از لایه الاستیک با ضخامت کم علاوه بر کاهش عمر لایه الاستیک، موجب عدم رفع کامل عیب فرورفتگی می‌شود در صورتی‌که استفاده از لایه الاستیک با ضخامت بالا علاوه بر افزایش هزینه موجب کاهش دقت ابعادی قطعه قبل از برگشت فنری خواهد شد.



شکل (۱۷): توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده با استفاده از لایه الاستیک با دو سختی الف) Shore-A ۸۵ و ب) Shore-A ۵۰.

www.SID.ir

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه الاستیک، میزان برگشت فنری در محصول نهایی کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، افزایش نیروی شکل‌دهی با افزایش ضخامت لایه الاستیک و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک بیشتر در ورق فلزی است.

با توجه به نوع تأثیر ضخامت لایه الاستیک بر روی دو پارامتر میزان برگشت فنری و دقت ابعادی (کاهش برگشت فنری و کاهش دقت ابعادی با افزایش ضخامت لایه الاستیک) باید مقدار مناسبی برای ضخامت لایه الاستیک انتخاب شود. نتایج حاصل شده نشان می‌دهند که در نظر گرفتن دقت ابعادی به‌عنوان معیار در انتخاب ضخامت لایه الاستیک، نتیجه بهتری، نسبت به حالتی که مقدار برگشت فنری به‌عنوان معیار انتخاب ضخامت لایه الاستیک قرار گیرد خواهد داد. بنابراین حداقل ضخامت لایه الاستیک که منجر به شکل‌دهی قطعه‌کار بدون عیب فرورفتگی و با توزیع ضخامت یکنواخت می‌شود به‌عنوان ضخامت بهینه لایه الاستیک در نظر گرفته خواهد شد.

نتایج به‌دست آمده از قطعات شکل داده شده با استفاده از لایه‌های الاستیک با سختی متفاوت نشان می‌دهد که با افزایش سختی لایه الاستیک، مقدار برگشت فنری در قطعه شکل داده شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این موضوع افزایش تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در قطعه‌کار در نتیجه افزایش نیروی شکل‌دهی با سختی لایه الاستیک می‌باشد.

۶- مراجع

1. Yamashita, M., Gotoh, M., and Atsumi, Sh.Y. "Numerical Simulation of Incremental Forming of Sheet Metal", J. Materials Proc. Tech., Vol. 199, pp. 163-172, 2008.
2. Liu, Y., Hua, L., Lan, J., and Wei, X. "Studies of the Deformation Styles of The Rubber-Pad Forming Process Used For Manufacturing Metallic Bipolar Plates", J. Power Sources, Vol. 195, pp. 8177-8184, 2010.
3. Walczyk, D.F., Lakshmikanthan, J., and Kirt, D.R. "Development of a Reconfigurable tool for forming Aircraft Body Panels", J. Manufacturing Sys., Vol. 17, No. 4, pp. 287-296, 1998.
4. Walczyk, D.F. and Hardt, D.E. "Design and Analysis of Reconfigurable Discrete Dies For Sheet Metal Forming", J. Manufacturing Sys., Vol. 17, No.6, pp. 436-454, 1998.
5. Li, M., Liu, Y., Su, Sh., and Li, G. "Multi-point Forming: A Flexible Manufacturing Method For a 3-d Surface Sheet", J. Materials Proc. Tech., Vol. 87, pp. 277-280, 1999.
6. Li, M.Z., Cai, Z.Y., Sui, Z., and Yan, Q.G. "Multi-Point Forming Technology For Sheet Metal", J. Materials Proc. Tech., Vol. 129, pp. 333-338, 2002.
7. Chen, J.J., Li, M.Z., Liu, W., and Wang, C.T. "Sectional Multipoint Forming Technology For Large-Size Sheet Metal", J. Advance Manufacturing Tech., Vol. 25, pp. 935-939, 2005.
8. Zhang, Q., Dean, T.A., and Wang, Z.R. "Numerical Simulation of Deformation in Multi-Point Sandwich Forming", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 699-707, 2006.
9. Sun, G., Li, M.Z., Yan, X.P., and Zhong, P.P. "Study of Blank-Holder Technology on Multi-Pointforming of Thin Sheet Metal", J. Materials Proc. Tech., Vol's. 187-188, pp. 517-520, 2007.
10. Qian, Z.R., Li, M.Z., and Tan, F.X. "The Analyse on the process of multi-point forming for Dish Head", J. Materials Proc. Tech., Vol. 187-188, pp.471-475, 2007.
11. Cai, Z.Y., Wang, S.H., Xu, X.D., and Li, M.Z. "Numerical Simulation for the Multi-Point stretch forming process of Sheet Metal", J. Materials Proc. Tech., Vol. 209, pp. 396-407, 2009.
12. Li, M.Z., Cai, Z.Y., and Liu, C.G. "Flexible Manufacturing of Sheet Metal Parts Based on Digitized-Die", J. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, pp. 107-115, 2007.
13. Liu, C., Li, M.Z., and Fu, W. "Principles and Apparatus of Multi-Point forming for Sheet Metal", J. Advance Manufacturing Tech., Vol. 35, pp. 1227-1233, 2008.
14. Cai, Z.Y., Wang, S., and Li, M.Z. "Numerical Investigation of Multi-Point Forming Process for Sheet Metal: Wrinkling, Dimpling and Springback", J. Advance Manufacturing Tech., Vol. 37, pp. 927-936, 2008.
15. Zareh, B., Vafaei-Sefat, A., and Rikhtergar-Nezami, V. "Experimental and Numerical Investigation of Sheet Metal Forming Using Multi-point Forming Process", Aerospace Mech. J., Vol. 8, No. 4, pp. 75-87, 2013 (In Persian).
16. Rikhtergar-Nezami, V., Zareh, B., and Vafaei-Sefat, A. "A Study on the Forming of Sheet Metal Parts Using Multi-point Forming Technology", J. Modern Processes in Manufacturing Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 51-59, 2010 (In Persian).
17. Wang, S., Cai, Z.Y., and Li, M.Z. "Numerical Investigation of the Influence of Punch Element in Multi-Point Stretch Forming Process", J. Advance Manufacturing Tech., Vol. 49, pp. 475-483, 2010.

Archive of SID

www.SID.ir