

مطالعه‌ای بر روی شکل‌دهی قطعات ورقه‌ای با استفاده از فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای

وحید ریخته‌گر نظامی^۱، بهروز زارع^۲، عباس وفایی صفت^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۸

چکیده

در سالهای اخیر، فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای به علت انعطاف پذیری بالای آن، در جهت کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این روش سطح انحنای صلب موجود در قالبهای سستی با یک جفت مجموعه‌ای از پین‌های قابل تنظیم مقابل هم جایگزین می‌گردد. در این مقاله اصول بنیادی روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد بحث قرار گرفته و امکان شکل‌دهی یک قطعه ورقه‌ای با استفاده از این تکنیک به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شده است. چروکیدگی و تورفتگی از متداولترین عیوب بوجود آمده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشند. با تنظیم مناسب پارامترهای فرآیند می‌توان قطعات سالمی را با صافی سطح بالا و توزیع ضخامت یکنواخت شکل‌دهی کرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی در شکل‌دهی قطعات تکی با شکلهای هندسی متنوع مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی چند نقطه‌ای، شبیه‌سازی اجزای محدود، چروکیدگی، تورفتگی.

۱- مقدمه

هندسی خاص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین برای تولید قطعات مختلف نیاز به استفاده از قالبهای متفاوتی وجود خواهد داشت. طراحی و ساخت قالبهای جدید مستلزم صرف زمان و هزینه بالایی بوده و فضای زیادی برای نگهداری قالبها اشغال می‌شود. در نتیجه استفاده از روشهای فوق برای تولید قطعات تکی و قطعات دسته‌ای با تیراژ پایین غیراقتصادی خواهد بود. توسعه روشهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسبی در جهت رفع مشکلات فوق مطرح گردد. ایده استفاده از روشهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر دست کم به بیش از سی سال پیش بر می‌گردد [۱].

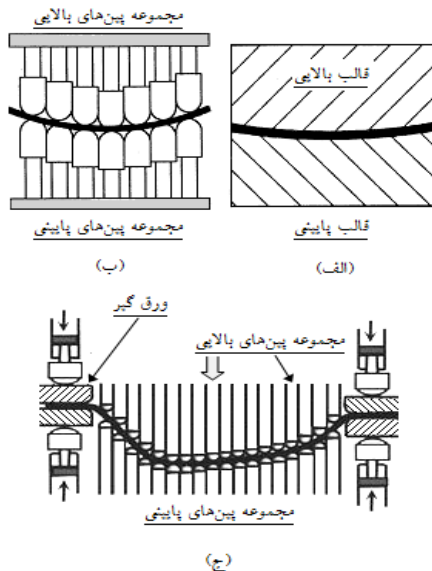
فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی از نظر تکنولوژیکی یکی از مهمترین شاخه‌های فرآیندهای شکل‌دهی فلزات محسوب می‌شوند بطوریکه اغلب قطعات بدنه خودرو، قسمت اعظم بدنه هواپیما و سایر محصولات صنعتی مشابه، با استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی متنوعی که بر روی ورقهای فلزی صورت می‌گیرد ساخته می‌شوند. در این فرآیندها با استفاده از مجموعه‌ای از قالبهای یکپارچه تغییر شکل پلاستیک مطلوب در یک ماده خام اولیه ایجاد می‌گردد. این قبیل قالبها عموماً با ماشینکاری و یا ریخته‌گری یک بلوک جامد با سطوح ویژه ساخته می‌شوند و تنها برای تولید یک قطعه با مشخصات

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل Zareh.behrooz@yahoo.com

۳- دانشیار دانشکده مکانیک - دانشگاه امام حسین (ع)

(۱) شکل‌دهی سنتی و روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای را بدون استفاده و با استفاده از ورق‌گیر نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، در این روش سنبه-ماتریس صلب موجود در قالب‌های سنتی با یک جفت مجموعه‌ای از المانهای مقابل هم جایگزین می‌گردد و ورق مابین این دو مجموعه شکل داده می‌شود.



شکل (۱): مفهوم فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای (الف)- روش شکل‌دهی سنتی (ب)- شکل‌دهی چند نقطه‌ای بدون ورق‌گیر (ج)- شکل‌دهی چند نقطه‌ای با استفاده از ورق‌گیر.

پین‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که مستقل از هم بوده و به آسانی قابل تنظیم می‌باشند بنابراین می‌توان با کنترل ارتفاع پین‌ها یک سطح کاری پیوسته‌ای را ایجاد کرد. با استفاده از این روش، شکل‌دهی قطعات با شکلهای هندسی متنوع تنها با استفاده از یک قالب مشابه امکان‌پذیر می‌باشد و نیاز به طراحی و ساخت قالبهای متعدد رفع می‌گردد که منجر به صرفه‌جویی زیادی در زمان و هزینه‌های تولید بویژه در زمینه تولید قطعات تکی و دسته‌ای با تیراژ پایین خواهد گردید.

۳- شبیه سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای از نرم‌افزار Abaqus 6.9.1 استفاده شده است. شکل ۲ مدل اجزای محدود ایجاد شده را بصورت انفجاری نشان می‌دهد.

والزیک و هاردت [۲] با ارائه مفهوم قالب قابل تغییر شکل، طراحی مکانیکی یک قالب گسسته را مورد مطالعه قرار دادند. والزیک و همکارانش [۳] به منظور کاهش زمان و هزینه‌های ساخت قالب، یک قالب گسسته قابل تغییر شکل را جهت شکل‌دهی قطعات بدنه هواپیما توسعه دادند. هاس و همکارانش [۴] قالب انعطاف پذیری را جهت شکل‌دهی قطعات تکی طراحی کرده و در ادامه با ساخت یک قالب اولیه، عملی بودن روش ارائه شده را بررسی کردند.

بکارگیری روش‌های شکل‌دهی انعطاف پذیر، با مفهوم فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای اولین بار توسط مینگزلی و همکارانش [۵] ارائه گردید. آنان با طبقه‌بندی مدهای مختلف شکل‌دهی چند نقطه‌ای، استفاده از روشهای فوق را در شکل‌دهی قطعات ورقه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. محققان مذکور همچنین روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای موضعی را برای شکل‌دهی سطوح ورقه‌ای با ابعاد بزرگ با استفاده از قالب‌های کوچک ارائه کردند [۵ و ۱].

با این وجود، اکثر تحقیقات ارائه شده از سوی محققان مختلف محدود به استفاده از این تکنیک در شکل‌دهی سطوح ورقه‌ای می‌باشد بطوریکه تحقیقات بسیار کمی در مورد به کارگیری این روش در کشش عمیق قطعات صنعتی صورت گرفته است. در این مقاله اصول بنیادی فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد بحث قرار گرفته است. به منظور بررسی فرآیند فوق مجموعه قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای طراحی و ساخته شده و امکان شکل‌دهی یک قطعه ورقه‌ای از جنس آلومینیومی A1100-O با استفاده از این تکنیک، به صورت تجربی و شبیه سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. عیوب به وجود آمده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای شناسایی و بحث گردیده و راهکارهای مناسب جهت شکل‌دهی قطعات سالم ارائه شده است.

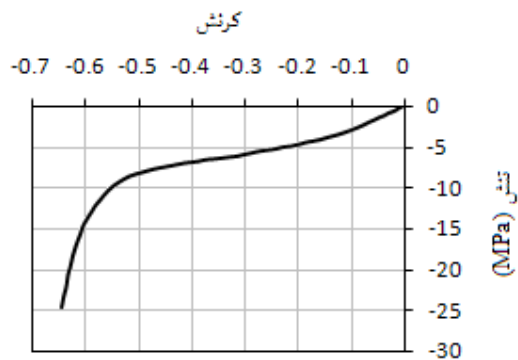
۲- اصول فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای

فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای یک روش انعطاف پذیر جهت تولید قطعات ورقه‌ای با هندسه سه بعدی می‌باشد [۱]. شکل

جدول (۲): خواص فیزیکی و مکانیکی ورق از جنس آلایز

آلومینیومی All 100-O.

مقدار	پارامتر
$t_0 = 1$	ضخامت اولیه (mm)
$\rho = 2710$	چگالی (kg/m^3)
$E = 71$	مدول الاستیسیته (GPa)
$\nu = 0.33$	ضریب پواسون
$\sigma = 41.80$	استحکام تسلیم (Mpa)
$n = 0.2446$	توان کرنش سختی
$K = 145.89$	ضریب استحکام (Mpa)

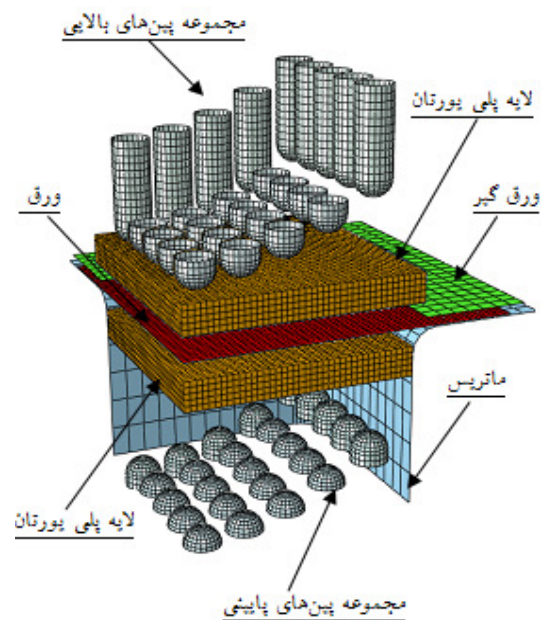


شکل (۳): نمودار تنش کرنش پلی یورتان با سختی SA ۸۰

به علت مقاومت بالای پلی یورتان در برابر سایش و روغن، در انجام آزمایشات و شبیه‌سازی‌ها از دو لایه پلی یورتان با سختی SA ۸۰ استفاده شده است. شکل (۳) نمودار تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش فشار (ASTM D575-91) لایه پلی یورتان استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد که داده‌های بدست آمده از نمودار فوق به نرم افزار معرفی گردید. از المانهای C3D8R برای مش بندی لایه‌های پلی یورتان استفاده گردیده است. سایر تجهیزات قالب به صورت پوسته‌ای صلب مدل شده‌اند و مش بندی آنها با استفاده از المانهای R3D4 انجام گرفته است. جهت مدل کردن اصطکاک مابین سطوح اجزای مختلف قالب و ورق از مدل اصطکاکی کولمب استفاده گردیده است. مطابق با مرجع [۶] ضریب اصطکاک مابین سطح ورق و سطوح اجزای قالب، سطح ورق با لایه پلی یورتان و لایه پلی یورتان با سطح بین‌ها به ترتیب ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۲ فرض شده است.

جدول (۱): مشخصات ابعادی اجزای قالب

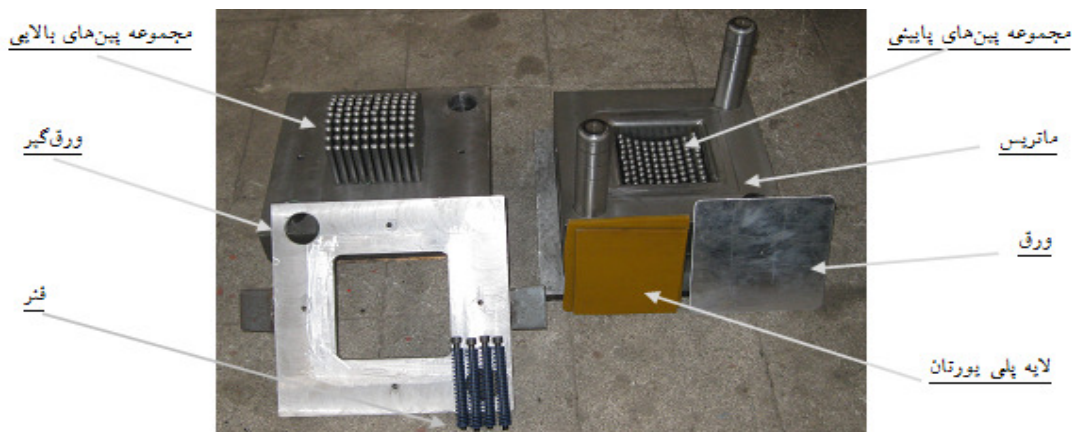
پارامتر	اندازه (mm)
قطر بین	۱۲
شعاع ورودی قالب	۷
ابعاد حفره ماتریس	۱۵۰×۱۵۰
ابعاد اولیه ورق	۲۲۰×۲۲۰
ضخامت لایه پلی یورتان	۱۰



شکل (۲): مدل اجزای محدود ایجاد شده جهت شبیه سازی فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای

به علت تقارن و به منظور کاهش زمان شبیه سازی، فقط ۱/۴ ورق و سایر اجزای قالب مدل‌سازی شده است. مشخصات ابعادی اجزای مختلف قالب در جدول (۱) ارائه شده است. ورق به صورت پوسته‌ای تغییر شکل پذیر مدل شده و برای مش بندی آن از المانهای چهار گرهی S4R استفاده شده است. جنس ورق مورد استفاده در آزمایشات و شبیه‌سازی، آلایز آلومینیومی All100-O می باشد، که خواص فیزیکی این ماده، به همراه خواص مکانیکی بدست آمده از آزمون کشش در جدول (۲) نشان داده شده است.

در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، خصوصیات لایه الاستیک اثر قابل توجهی بر روی رفتار تغییر شکل ورق فلزی دارد.

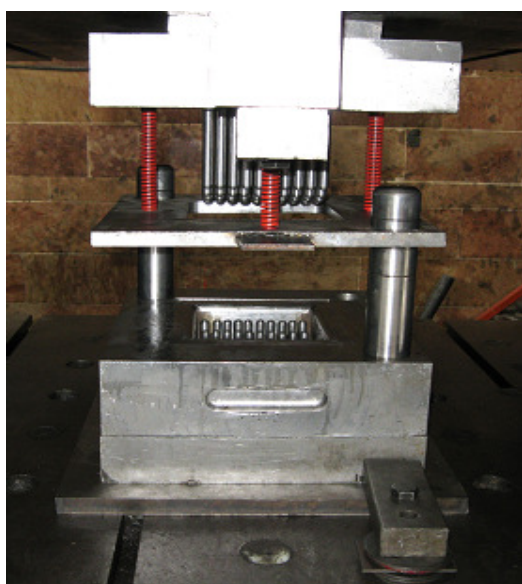


شکل (۴): مجموعه قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای ساخته شده جهت آزمایشات تجربی.

نوع تماس مابین سطح ورق با سطح لایه پلی یورتان و سطوح قالب از نوع سطح به سطح انتخاب شده است.

۴- طراحی و ساخت قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای

شکل (۴) مجموعه قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای ساخته شده در این پژوهش را به صورت مجزا از هم نشان می‌دهد. ابتدا قبل از شروع ساخت، اندازه‌های مطلوب اجزای مختلف قالب فوق با اجرای یکسری شبیه‌سازی تعیین گردید. قطر پین یکی از مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشد، از نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها این نتیجه‌گیری حاصل شد که استفاده از پین با قطر ۱۲ میلی‌متر منجر به شکل‌گیری قطعه با کیفیت مناسبتری خواهد گردید. بنابراین در ساخت قالب فوق مجموعاً از ۲۰۰ عدد پین سر کروی با قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده شده است. سایر اجزای قالب بر طبق مقادیر ارائه شده در جدول (۱) ساخته شده است. پین‌ها مستقل از هم بوده و ارتفاع هر یک از آنها به آسانی قابل تنظیم می‌باشد. بنابراین می‌توان با تنظیم ارتفاع هریک از پین‌ها سطوح با انحنای متفاوتی را بدست آورد. از ۴ عدد فنر برای تامین نیروی ورق‌گیر استفاده شده است. با استفاده از فنرهایی با مشخصات متفاوت، امکان اعمال نیروهای ورق‌گیر متفاوت در آزمایشات وجود داشت. برای انجام آزمایشات از یک پرس هیدرولیکی مدل T.S.S با ظرفیت ۲۰۰ تن استفاده شد. شکل (۵) قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای را در حالت نصب بر روی دستگاه پرس نشان می‌دهد.

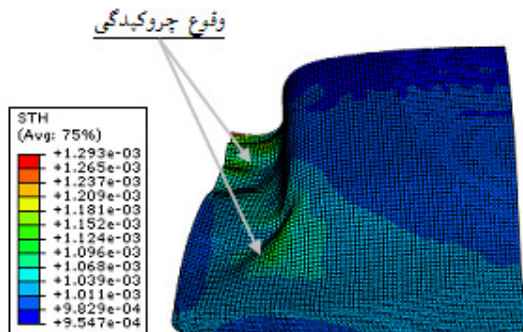


شکل (۵): مجموعه قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای در حالت نصب بر روی دستگاه پرس

۵- نتایج و بحث

شکل‌دهی یک قطعه ورقه‌ای شکل با سطح مقطع مربعی و شعاع انحنای ۱۰۰ میلی‌متر تحت شرایط مختلف شکل‌دهی مورد آزمایش قرار گرفت و بدین ترتیب عیوب بوجود آمده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای شناسایی شده و شرایط لازم جهت تولید قطعات سالم با استفاده از این تکنیک مورد بررسی قرار گرفت. عیوب بوجود آمده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای را به دو دسته کلی می‌توان تقسیم بندی کرد. دسته اول عیوبی هستند که مابین فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای و سایر فرآیندهای شکل‌دهی مشترک می‌باشند که می‌توان به عیوب چروکیدگی و پارگی

اعوجاج شدیدی در ورق ایجاد شده است. نتایج تحقیقات گزارش شده از سوی محققان مختلف نشان می‌دهد که ورق گیر یک نقش کلیدی را در کنترل جریان فلز در فرآیند کشش عمیق معمولی دارد و با انتخاب مناسب نیروی ورق گیر می‌توان از ایجاد چروکیدگی جلوگیری کرده و وقوع پارگی را به تاخیر انداخت [۷]. بنابراین شکل‌دهی قطعات تحت اعمال نیروهای ورق گیر متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته است. همانگونه که در بخش قبل ذکر شد برای تامین نیروی ورق گیر از ۴ عدد فنر استفاده شده است که در حین شکل‌دهی با فشردن شدن فنرها به تدریج نیروی اعمال شده افزایش یافته و به حداکثر می‌رسد.



(الف)



(ب)

شکل (۷): نمونه شکل داده شده با اعمال نیروی ورق گیر ۳۰۰ N (الف)-

شبیه سازی (ب)- تجربی

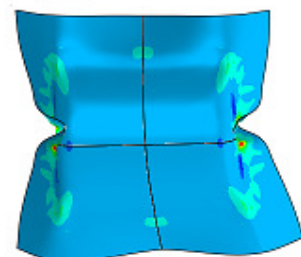
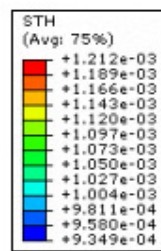
اشاره کرد. دسته دوم عیوبی هستند که مختص فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشند که عیب تورفتگی یکی از متداولترین عیوب بوجود آمده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشد.

۱-۵ چروکیدگی در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای

در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، میزان ماده جریان یافته به محفظه قالب می‌تواند کیفیت قطعه شکل داده شده را تحت تاثیر قرار دهد. جریان بیش از حد ماده به داخل قالب منجر به ایجاد چروکیدگی در قطعه می‌گردد در حالیکه عدم جریان کافی فلز منجر به ایجاد پارگی در قطعه کار خواهد گردید. همانطور که در بخش ۲ اشاره گردید فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌تواند به دو صورت استفاده از ورق گیر و بدون استفاده از ورق گیر اجرا گردد.



(الف)

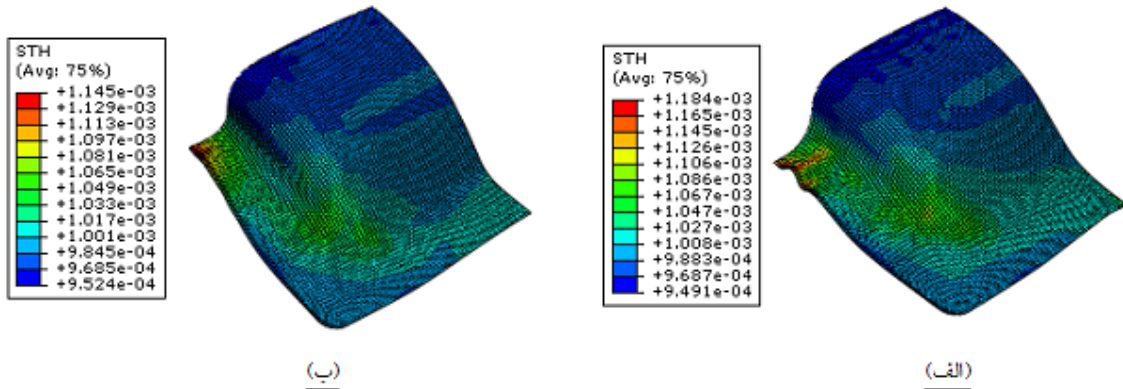


(ب)

شکل (۶): نمونه شکل داده شده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای بدون

استفاده از ورق گیر (الف)- تجربی (ب)- شبیه سازی

در این پژوهش شکل‌دهی قطعات تحت دو حالت فوق مورد آزمایش قرار گرفته است. شکل (۶) نمونه شکل داده شده در آزمایشات و شبیه سازی را بدون استفاده از ورق گیر نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در اثر عدم استفاده از ورق گیر،



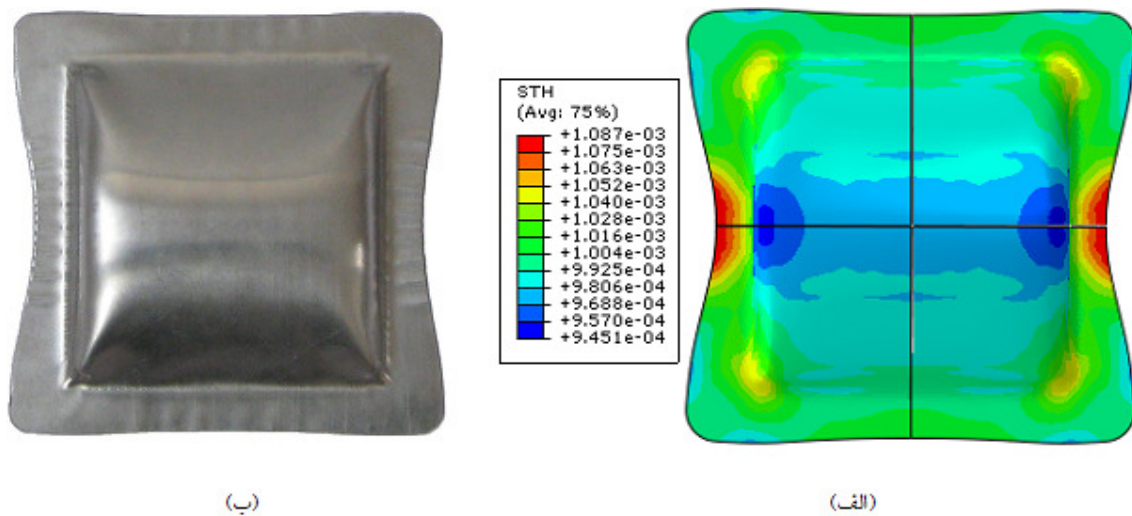
شکل (۸): قطعات شکل داده شده با اعمال نیروی ورگیر (الف) - 600 N (ب) - 900 N .

نمونه شکل داده شده تحت اعمال نیروی ورق گیر 1 KN در شکل (۹) نشان داده شده است که مطابق شکل فوق، مطابقت قابل قبولی مابین نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد و اعمال نیروی ورق گیر پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی منجر به شکل‌گیری قطعه سالمی در آزمایشات گردیده است.

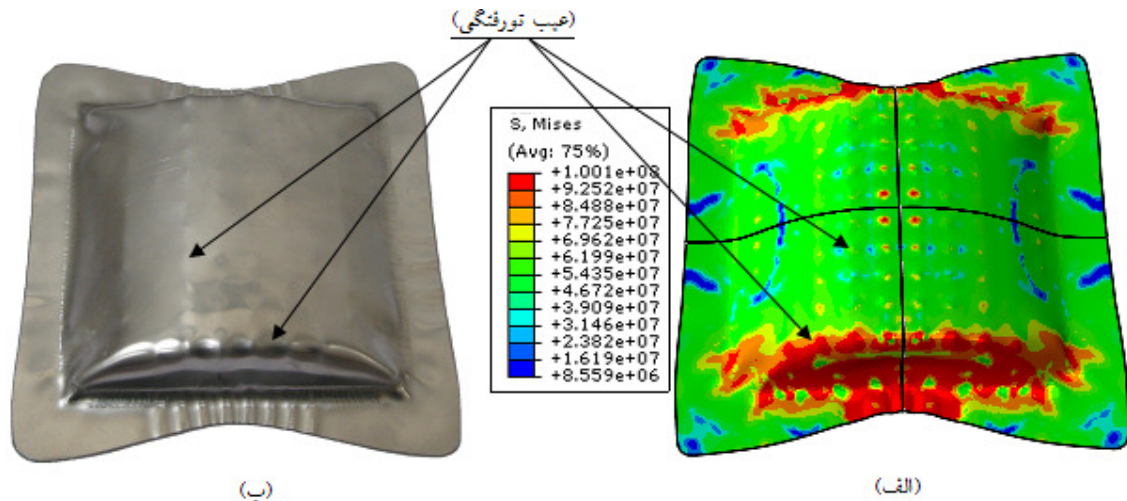
۵-۲ عیب تو رفتگی

مزیت اصلی فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای در مقایسه با روشهای سنتی، انعطاف پذیری بالای آن می‌باشد. ولی استفاده از این تکنیک نیز معایبی را به همراه دارد.

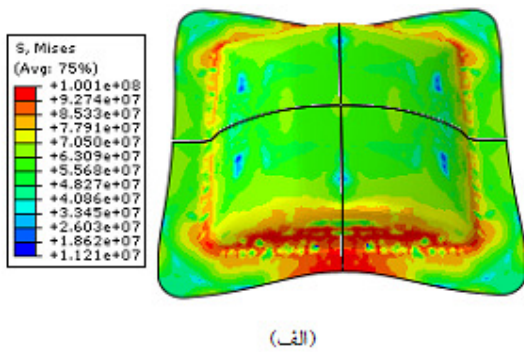
شکل (۷) نمونه شکل داده شده تحت اعمال حداکثر نیروی ورق گیر 300 N را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد به علت پایین بودن میزان نیروی ورق گیر اعمال شده و در نتیجه جریان بیش از حد ورق، چروکیدگی شدیدی در قطعه رخ داده است. به منظور بدست آوردن نیروی ورق گیر مطلوب اجرای شبیه‌سازی‌ها با اعمال نیروهای ورق‌گیر با مقادیر بالاتر ادامه یافت. شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی قطعات شکل داده شده با اعمال نیروی ورق‌گیر 600 N و 900 N را نشان می‌دهد که مطابق انتظار و مشابه کشش عمیق معمولی با افزایش نیروی ورق‌گیر از میزان چروکیدگی‌ها کاسته می‌شود. براساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با اعمال نیروی ورق‌گیر بالاتر از 1 KN می‌توان قطعات سالم و عاری از چروکیدگی را شکل داد.



شکل (۹): نمونه شکل داده شده تحت اعمال نیروی ورق‌گیر 1 KN (الف) - شبیه‌سازی (ب) تجربی.



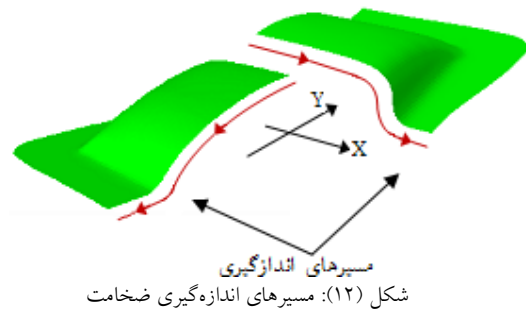
شکل (۱۰): وقوع تورفتگی در اثر تماس مستقیم و ناپیوسته بین‌ها با سطح ورق (الف)- شبیه سازی (ب) تجربی (تحت اعمال نیروی ورق گیر 700 N).



شکل (۱۱): نمونه شکل داده با استفاده از دو لایه پلی یورتان با سختی SA ۸۰ (الف)- شبیه سازی (ب)- تجربی

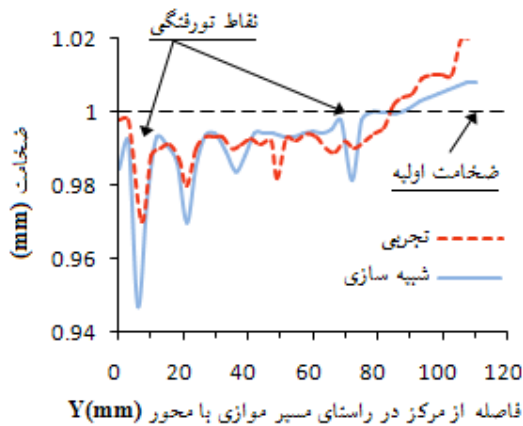
عیب تورفتگی از جمله عیوب مختص فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشد. همانطور که در بخشهای قبلی ذکر شد در این تکنیک سطح پیوسته قالب‌های صلب سستی با مجموعه‌ای از پین‌های گسسته قابل تنظیم جایگزین می‌گردد. عیب تورفتگی در اثر تماس مستقیم و ناپیوسته بین ورق و پین‌ها ایجاد می‌شود. هر یک از پین‌ها یک نیروی متمرکز را بر روی ورق اعمال می‌کنند که این نیروهای متمرکز گسسته منجر به ایجاد تغییر شکل موضعی شدیدی در ورق می‌شوند. شکل (۱۰) وقوع عیب تورفتگی را در آزمایش تجربی و شبیه سازی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در نقاط تماس پین‌ها با ورق تغییر شکل به صورت موضعی رخ داده و وضعیت تنش در این نقاط نسبت به سایر قسمت‌های قطعه بحرانی‌تر است. برای جلوگیری از ایجاد عیب تورفتگی میبایستی نیروهای وارد شده از طرف پین‌ها بر کل سطح ورق توزیع شود، که برای این منظور، دو لایه پلی یورتان با سختی SA ۸۰ مابین سطوح ورق و مجموعه پین‌های بالایی و پایینی قرار داده شده است. نمونه شکل داده شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در شکل (۱۱) قابل مشاهده می‌باشد. مطابق شکل مذکور نمونه شکل داده شده دارای صافی سطح بسیار مناسبی بوده و هیچگونه عیب تورفتگی در قطعه مشاهده نمی‌شود. همچنین توزیع تنش یکنواختی در نقاط مختلف قطعه اتفاق افتاده است.

جهت محورهای تقارن بریده شده و توزیع ضخامت در دو مسیر نشان داده شده در شکل (۱۲) اندازه‌گیری شده است. شکل (۱۳) منحنی‌های توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه سازی نمونه شکل داده شده بدون استفاده از لایه پلی یورتان را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل فوق ملاحظه می‌شود به علت عدم استفاده از لایه پلی یورتان، نمونه شکل داده شده، در راستای هر دو مسیر اندازه‌گیری دارای توزیع ضخامت غیر یکنواختی می‌باشد و نقاط تورفتگی بوضوح بر روی منحنی قابل تشخیص می‌باشند بطوریکه در این نقاط در نتیجه اعمال نیروی متمرکز از طرف پین‌ها و ایجاد تغییر شکل موضعی، کاهش ضخامت شدیدی رخ داده است.

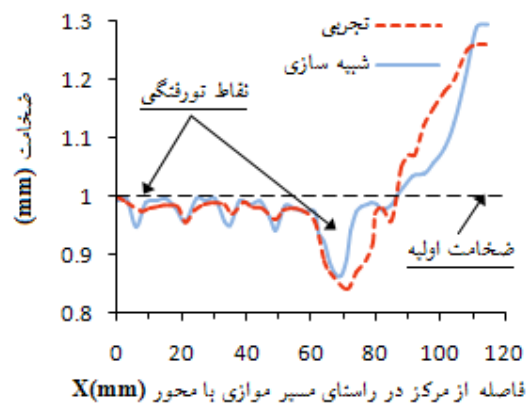


۳-۵ بررسی توزیع ضخامت

یکی از مهمترین مشخصه‌های کیفی مورد بررسی در قطعات ورقه‌ای شکل داده شده به روشهای مختلف شکل‌دهی، توزیع ضخامت قطعه‌کار نهایی شکل داده شده می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده، نمونه‌ها در

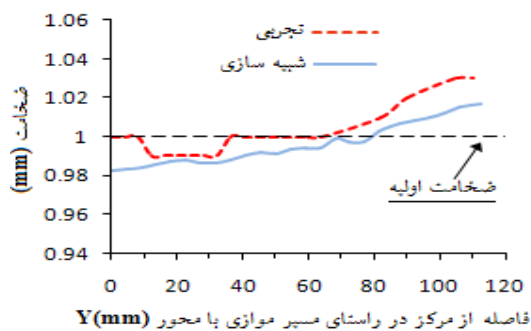


(ب)

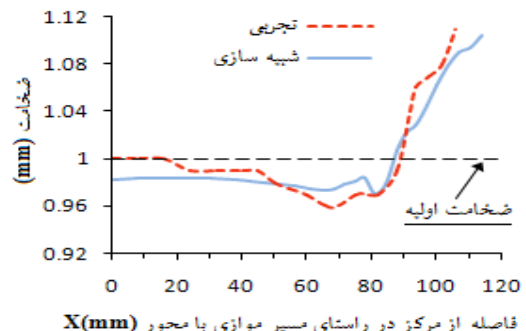


(الف)

شکل (۱۳): منحنی توزیع ضخامت نمونه شکل داده شده بدون استفاده از لایه پلی یورتان در راستای (الف)- مسیر موازی محور X (ب)- مسیر موازی محور Y



(ب)



(الف)

شکل (۱۴): منحنی توزیع ضخامت نمونه شکل داده شده با استفاده از لایه پلی یورتان در راستای (الف)- مسیر موازی محور X (ب)- مسیر موازی محور Y

چروکیدگی جلوگیری کرد. عیب تورفتگی در نتیجه تماس مستقیم و ناپیوسته پینها با سطح ورق و ایجاد تغییر شکل موضعی شدید در نقاط تماس پینها با ورق بوجود می‌آید. با استفاده از دو لایه الاستیک و در نتیجه توزیع نیروهای متمرکز پینها به کل سطح ورق می‌توان قطعات سالم و با صافی سطح بالایی را شکل دهی کرد.

۳- بررسی توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در دو حالت استفاده از لایه پلی یورتان و عدم استفاده از آن نشان داد که در صورت عدم استفاده از لایه پلی یورتان، نمونه شکل داده شده دارای توزیع ضخامت غیر یکنواختی خواهد بود. استفاده از لایه الاستیک منجر به شکل‌گیری قطعه با توزیع ضخامت یکنواخت می‌گردد و کاهش ضخامت بسیار کمی در قطعه بوجود خواهد آمد.

۴- با توجه به انعطاف‌پذیری بالای فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، این روش می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد اقتصادی برای تولید قطعات تکی با انحنای متفاوت، بویژه در زمینه هوا و فضا مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نتایج آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی با نتایج شبیه‌سازی دارد. بنابراین شبیه‌سازی اجزای محدود می‌تواند به عنوان یک ابزار پیشگویانه قوی برای مطالعه بیشتر فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

شکل (۱۴) منحنی‌های توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی نمونه شکل داده شده با استفاده از لایه پلی یورتان را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق، استفاده از لایه پلی یورتان منجر به شکل‌گیری نمونه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت گردیده است و هیچ‌گونه نازک‌شدگی موضعی در قطعه مشاهده نمی‌شود که علت این امر، توزیع یکنواخت نیروهای متمرکز وارد شده از طرف پینها بر روی ورق، در نتیجه استفاده از لایه پلی یورتان می‌باشد. همچنین از شکل‌های (۱۳) و (۱۴) می‌توان مشاهده کرد که مطابقت نسبتاً خوبی مابین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی‌ها برقرار است که نشان‌دهنده صحت مدل اجزای محدود توسعه داده شده می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اصول بنیادی فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد بحث قرار گرفت. با طراحی و ساخت یک قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای، امکان شکل‌دهی یک قطعه ورقه‌ای با استفاده از تکنیک فوق به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- چروکیدگی و تورفتگی از متداولترین عیوب به وجود آمده در شکل‌دهی قطعات ورقه‌ای با روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای می‌باشند. با اعمال نیروی ورق‌گیر مناسب می‌توان از وقوع

مراجع

- [1] Li, M.Z., Liu, Y., Su, Sh., Li, G., "Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 277-280, 1999.
- [2] Walczyk, D.F., Hardt, D.E., "Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 17(6), pp.436-454. 1998.
- [3] Walczyk, D.F., Lakshmikanthan, J., Kirt, D.R., "Development of a reconfigurable tool for forming aircraft body panels", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 17(4), pp.287-296, 1998.
- [4] Haas, E., Schwarz, C.R., Papazian, J.M., "Design and Test of a Reconfigurable Forming Die", Journal of Manufacturing processes, Vol. 4(1), pp.77-85, 2002.
- [5] Li, M.Z., Cai, Z.Y., Sui, Z., Yan, Q.G., "Multi-point forming technology for sheet metal", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp 333-338, 2002.
- [6] Wang, Sh., Cai, Zh., Li, M., " Numerical investigation of the influence of punch element in multi-point stretch forming process" Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 49, pp.475-483, 2010.
- [7] Obermeyer, E.J., Majlessi, S.A., "A review of recent advances in the application of blank-holder force towards improving the forming limits of sheet metal parts", Journal of Material Processing Technology, Vol. 75, pp. 222-234, 1997.