



## دوازدهمين كنفرانس مهندسي ساخت و توليد ايران

۶-۸ دی ماه ۱۳۹۰

بهينه‌سازي ابعاد بلانک در فرآيند كشش عميق ورق‌هاي  
دولايه مس- فولاد ضدزنگ 304Lفرشيد دهقاني<sup>۱\*</sup>، محمود سليمي<sup>۲</sup>، محمد مشايخي<sup>۳</sup>، عدالت شكري<sup>۴</sup>۱- كارشناس ارشد دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه آزاد اسلامي، واحد علوم و تحقيقات تهران *Dehghani.mechanic@yahoo.com*۲- استاد، دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي اصفهان، *Salimi@cc.iut.ac.ir*۳- استاديار، دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي اصفهان، *Mashayekhi@cc.iut.ac.ir*۴- كارشناس ارشد دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه آزاد اسلامي، واحد علوم و تحقيقات تهران *E.shokri@srbiau.ir*

## چكیده

در اين تحقيق بهينه‌سازي ابعاد بلانک در ورق‌هاي دولايه فلزي مس- فولاد ضدزنگ ۳۰۴L به صورت عددي و تجربي مورد بررسي قرار گرفته است. در ورق‌هاي دولايه فلزي، ناهمسانگري ورق‌هاي اوليه، جهت اتصال ورق‌ها در فرآيندهاي شكل دهی و عمليات حرارتي به منظور نفوذ عناصر شيميايي در مرز مشترك، رفتار ناهمسان ورق را در فرآيند كشش عميق به همراه دارد. از اين رو تعيين شكل اوليه گرده ورق برای رسيدن به شكل نهايي مطلوب از چالش‌هاي مهم در كشش عميق اين ورق‌ها به شمار می‌آيد. هدف از اين تحقيق، تعيين شكل اوليه گرده يك ورق دولايه با رفتار ناهمسانگري است تا محصول نهايي فرآيند كشش عميق به شكل مورد انتظار تبديل گردد. برای اين منظور ابتدا خواص مكانيكي ورق‌هاي دولايه مس- فولاد ضدزنگ ۳۰۴L و سپس پارامتر ناهمسانگري، R، به كمك آزمايش‌هاي تجربي استخراج شد و برای بهينه‌سازي از تكنيك Push/pull استفاده شده است. در اين روش به كمك برقراري ارتباط شكل اوليه گرده ورق و شكل نهايي محصول- كه به كمك شبیه‌سازي روش اجزای محدود به دست آمده است- می‌توان شكل بهينه اوليه ورق را تعيين نمود. در روش عددي به كار رفته برای ورق دولايه مس- فولاد ضدزنگ ۳۰۴L پس از پنج بار تکرار شكل اوليه مناسب به دست آمد. برای راستی آزمایی نتايج عددي، نمونه‌هاي اوليه گرده مطابق اين روش تهيه و فرآيند كشش عميق به روی آن‌ها صورت گرفت. نتايج تجربي نشان می‌دهد كه شكل اوليه پيشنهادهی برای گرده اوليه پس از فرآيند منجر به يك استوانه با ارتفاع تقريباً يكسان می‌گردد و اختلاف گوشواره‌ها در محصول نهايي به حداقل ممكن می‌رسد.

واژه‌هاي كليدي: بهينه‌سازي- بلانک- كشش عميق- ورق‌هاي دولايه

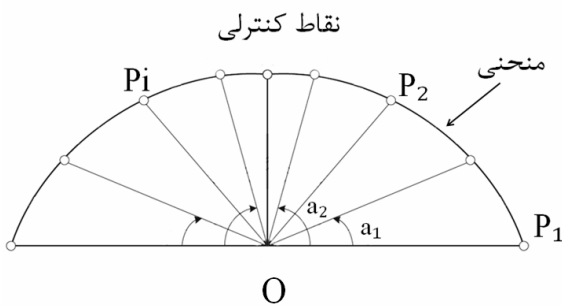
## ۱- مقدمه

ضدزنگ در نظر می‌گیرند چرا كه هدایت حرارتي فولاد ضدزنگ آستنيتي نسبت به مس پايين تر است، باعث نگه‌داری حرارت‌شده و اتلاف انرژی حرارتي كمتری را به دنبال دارد. در فرآيند كشش عميق ورق یا قطعه كار كه معمولاً با يك صفحه فشاری كنترل می‌شود، به وسيله يك سنبه به داخل ماتريس كشيده می‌شود تا شكل مورد نظر بدست آيد. اين فرآيند با عيوبی همراه است كه می‌توان به پارگی، چروكيدگی و گوشواره‌ای شدن اشاره كرد كه با تنظيم صحيح شرايط فرآيند مانند فشار ورق‌گیر، لقی موجود بين سنبه و ماتريس، شرايط اصطكاكي و شكل اوليه بلانک اين عيوب را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. علت وقوع گوشواره‌ای شدن ناهمسانگري ورق اوليه تحت كشش می‌باشد. پس از فرآيند كشش عميق جهت تصحيح قطعه نهايي، يك فرآيند اضافي برای برش گوشواره‌ها صورت می‌گیرد و از اين رو دور ريز

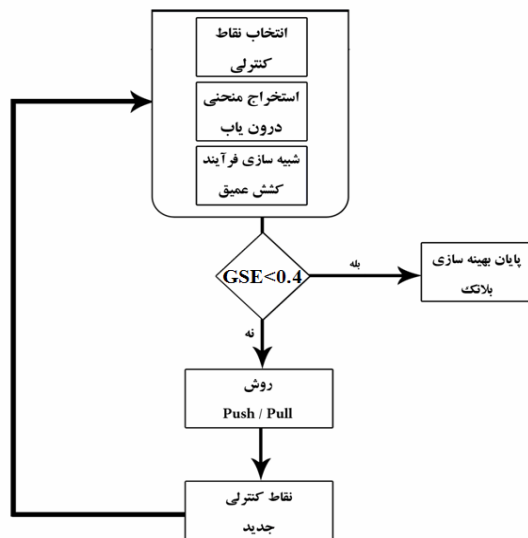
ورق‌هاي چندلایه دارای خواص مكانيكي، شيميايي و يا فيزيكي متفاوت در لایه‌هاي مختلف هستند از اين رو می‌توان خواصی نظير تنش تسليم بالا، کرنش الاستيك پلاستيك زياد، مقاومت در برابر رشد ترك، هدایت الكتريكي زياد، مقاومت خوردگی، مقاومت سايشی كه به صورت همزمان دريك فلز وجود ندارد را با تركيب فلزات مختلف و توليد يك ورق چندلایه بدست آورد. ورق‌هاي چندلایه را می‌توان برای ساخت قطعاتی كه نیاز است شرايط محيط داخلی و خارجي آن‌ها متفاوت باشد، استفاده نمود. یکی از کاربردهای ورق‌هاي دولايه مس و فولاد ضدزنگ شيرهاي انبساطی است. جنس لایه داخلی اتصالات را مس و جنس لایه خارجي را فولاد

## ۲- روش بهینه‌سازی Push/Pull

در این روش ابتدا فرآیند کشش عمیق بر روی شکل اولیه بلانک، که به صورت یک گرده است، توسط نرم افزار Abaqus شبیه‌سازی می‌گردد و منحنی پیرامون ارتفاع استوانه استخراج می‌شود. با مقایسه هندسه پس از کشش و شکل مطلوب قطعه، شکل اولیه اصلاح می‌گردد. در ادامه بلانک اصلاح شده نیز تحت فرآیند کشش عمیق، شبیه‌سازی شده و استوانه‌ای با ارتفاع متفاوت حاصل می‌شود. خطای شکل جهت اصلاح بلانک بین اختلاف ارتفاع استوانه هدف و ارتفاع استوانه به دست آمده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند تا زمانی که خطای شکل از مقدار تعیین شده بیشتر باشد، ادامه می‌یابد. این خطا بیان‌کننده مقدار انحراف ارتفاع تغییر شکل یافته محصول از ارتفاع هدف می‌باشد. در این تحقیق با توجه به نامتقارن بودن گوشواره‌ها، ۸ نقطه در زوایای صفر، ۲۲/۵، ۴۵، ۶۷/۵، ۹۰، ۱۱۲/۵، ۱۳۵، ۱۵۷/۵ درجه به عنوان نقاط مرجع انتخاب شدند. منحنی تعداد نقاط در شکل (۱) و الگوریتم این روش در شکل (۲) آمده است.



شکل ۱- مدل به کار رفته برای تعداد نقاط واقع بر منحنی



شکل ۲- روش اجرای بهینه‌سازی بلانک در نرم افزار Abaqus

در صورتی که موقعیت اولیه یک نقطه را  $X_i^{init}$ ، موقعیت مطلوب آن را  $X_i^{target}$  و موقعیت پس از تغییر شکل را  $X_i^{final}$  نام‌گذاری شود، موقعیت نقطه اصلاح شده برای هر یک از نقاط با رابطه زیر قابل محاسبه است:

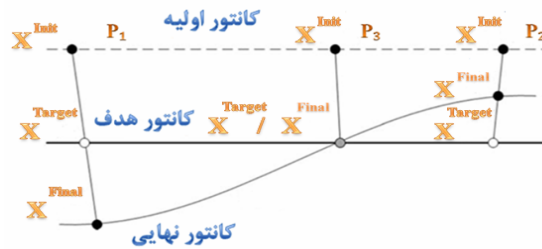
$$P_i = X_i^{init} + \xi (X_i^{target} - X_i^{final}) \quad (1)$$

ماده اجتناب ناپذیر است. این فرآیند تکمیلی سرعت تولید قطعه نهایی را نیز کاهش می‌دهد و هزینه تولید قطعه را افزایش می‌دهد. از این‌رو تعیین ابعاد بهینه بلانک می‌تواند موجب کاهش هزینه، کاهش چروکیدگی، افزایش کیفیت قطعات، کاهش مراحل فرآیند کشش عمیق شود. تا کنون تحقیقات قابل توجهی در زمینه بهینه‌سازی ابعاد بلانک برای ورق‌های چندلایه صورت نگرفته، اما بهینه‌سازی ابعاد بلانک برای ورق‌های تک‌لایه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

حبابی پارسا و همکاران روشی را بر اساس اجزای محدود معکوس، برای رسیدن به بلانک اولیه قطعات مستطیلی شکل ارائه کردند. اساس این روش بر پایه محاسبه گرادینان تغییر شکل در هر مرحله بر پایه یک فرمول‌بندی ساده‌شده است. نتایج حاصل از این روش را با نتایج تجربی مقایسه و تطابق خوبی ملاحظه شده است [۱]. آگروال و همکاران با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت ورق و به کمک تئوری حد بالا، بهینه‌سازی ابعاد بلانک را برای قطعات دایره‌ای شکل مورد بررسی قرار دادند. این روش ناحیه‌های تغییر شکل را به ناحیه‌های کوچک‌تر تقسیم کرده و سرعت میدان‌های جنبشی قابل قبول را برای هر ناحیه متناسب با شرایط مرزی پیشنهاد می‌کند [۲]. لین و همکاران با به کارگیری از یک شبکه استدلالی و ارتباط آن با روش اجزای محدود، بهینه‌سازی بلانک را برای قطعات بیضی‌شکل مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به بررسی خصوصیات مواد جاری در شرایط متفاوت می‌پردازد و شبکه استدلالی به کار گرفته شده اطلاعات بدست آمده از نتایج عملی را با شبیه‌سازی ترکیب می‌کند. [۳]. همای و همکاران با استفاده از نرم افزار آباکوس و ارتباط آن با کاهش ارتفاع گوشواره‌ها به بهینه‌سازی ابعاد بلانک پرداختند. الگوریتم مورد استفاده را برای قطعات مستطیلی شکل مورد استفاده قرار داده و تطابق خوبی ملاحظه نمودند [۴]. چامه و همکاران با استفاده از شبکه عصبی بهینه‌سازی ابعاد بلانک را مورد بررسی قرار دادند. شبکه عصبی مورد استفاده را برای قطعات مستطیلی شکل مورد استفاده قرار داده و تطابق خوبی ملاحظه نمودند [۵]. آرزوی و همکاران با استفاده از روش اجزای محدود و الگوریتم بهینه‌سازی، به بهینه‌سازی بلانک برای قطعات استمپینگ پرداختند. در این الگوریتم ابتدا با یک حدس اولیه بر اساس روش Inverse Approach شکل اولیه بلانک را مشخص می‌کند، سپس بلانک جدید را با ترکیبی از تکرار الگوریتم و مدل اجزای محدود در هر مرحله محاسبه می‌کند. نتایج این الگوریتم برای قطعه استمپینگ خودرو به کار گرفته شده است [۶].

در این تحقیق بهینه‌سازی ابعاد بلانک برای ورق‌های دولایه، صورت گرفته است. در این پژوهش سعی شده با در نظر گرفتن ناهمسانگردی هر یک از ورق‌ها، جهت اتصال ورق‌ها به یکدیگر در جوشکاری انفجاری و جهت نورد سرد، عملیات حرارتی به منظور نفوذ در مرز مشترک که از عوامل مؤثر در شکل‌گیری، مکان و ارتفاع گوشواره‌ها می‌باشند، روشی مورد بررسی قرار گیرد که هم دارای نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های موجود باشد و امکان مدل‌سازی و شرایط فرآیند را بدون تئوری‌های پیچیده فراهم سازد.

در این رابطه ضریب  $\xi$ ، ضریب میرایی می باشد که  $0.4$  در نظر گرفته شده است. جابجایی نقاط با استفاده از این روش در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳- روش Push/ Pull برای استخراج منحنی پیرامون بلانک

### خطای شکل هندسی:

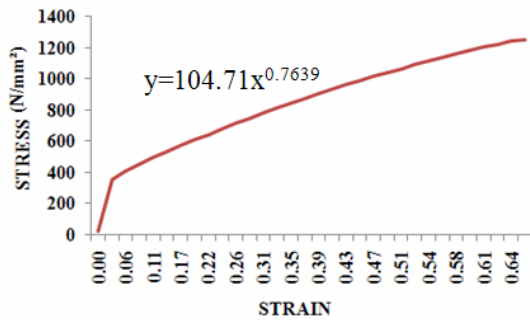
خطای شکل هندسی یا GSE به صورت اختلاف ارتفاع هدف  $H^{Final}$  و ارتفاع پس از تغییر شکل  $H^{Target}$ ، در هر مرحله تعریف می شود.

$$GSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left| H_i^{Target} - H_i^{Final} \right|^2} \quad (2)$$

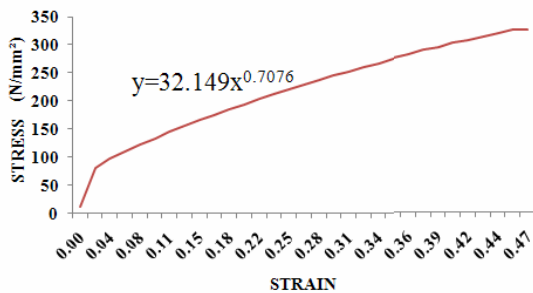
این خطا با محاسبه فاصله بین نقاط گرهی ارتفاع تغییر شکل یافته قطعه و نقاط گرهی مربوطه در ارتفاع هدف، محاسبه می شود. در پایان خطای بهینه سازی بلانک باید کمتر از مقدار مجاز باشد.

### ۳-۱ مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از روش جوش انفجاری برای تولید ورق های دولایه مس- فولاد ضدزنگ  $304L$  هر کدام با ضخامت یک میلی متر استفاده شد. برای یکنواختی سطح ورق های دولایه، فرآیند نورد سرد با کاهش ضخامت حدود  $5\%$  انجام گرفت. اتصال ورق ها در جوش انفجاری و جهت نورد سرد، یکسان با جهات نورد اولیه ورق ها انجام گرفته شد. برای ایجاد اتصال متالورژیکی، افزایش شکل پذیری و آزاد نمودن تنش های پسماند، ورق ها به مدت زمان  $32$  ساعت در دمای  $300^\circ C$  عملیات حرارتی شدند. در ادامه ورق های دولایه مس- فولاد ضدزنگ، با لایه داخلی مس و لایه خارجی فولاد ضدزنگ، تحت فرآیند کشش عمیق قرار گرفتند. برای به دست آوردن خواص مکانیکی هر یک از لایه ها در ورق های دولایه، به روی ورق های مس و فولاد ضدزنگ هر کدام به ضخامت یک میلی متر کاهش ضخامت  $5\%$  انجام داده شد سپس همانند ورق های دولایه عملیات حرارتی شدند. پس از ساخت نمونه ها، مطابق با استاندارد ASTM-E8M-04 آزمایش کشش تک محوری در سه جهت صفر- $45$ - $90$  درجه انجام گرفت، در نهایت تنش- کرنش مؤثر حقیقی محاسبه و برای شبیه سازی استفاده گردید. شکل های (۴) و (۵) نمودارهای تنش- کرنش مؤثر حقیقی را برای ورق های مس- فولاد ضدزنگ نشان می دهند. خواص مکانیکی و مقادیر ناهمسانگرد برای هر یک از لایه ها در ورق های دولایه در جدول (۱) آمده است. ابعاد هندسی قالب و متغیرهای فرآیند در جدول (۲) آمده است.



شکل ۴- تنش- کرنش مؤثر حقیقی برای ورق های فولاد ضدزنگ



شکل ۵- تنش- کرنش مؤثر حقیقی برای ورق های مس

جدول (۱) خواص مکانیکی و مقادیر ناهمسانگرد برای هر یک از لایه ها در

#### ورق های دولایه

n	K (N/mm <sup>2</sup> )	ضخامت (mm)	R <sub>90</sub>	R <sub>45</sub>	R <sub>0</sub>	جنس ماده
۰.۷۶۳	۱۰۴.۷	۰.۹۵	۰.۲۹۶	۰.۵۰۴	۰.۳۹۸	فولاد ضدزنگ
۰.۷۰۷	۳۲.۱۴	۰.۹۵	۰.۳۷۷	۰.۶	۰.۲۲۸	مس

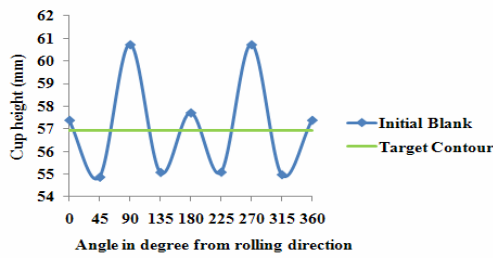
#### جدول (۲) متغیرهای قالب و قطر گرده

قطر گرده (mm)	ماتریس سنبه (mm)	شعاع سنبه (mm)	شعاع فشار ورق گیر (MPa)	قطر دهانه (mm)	ماتریس سنبه (mm)
۵۰	۵۴.۵۶	۱۰	۰.۸۷۵	۱۱۵	۵۰

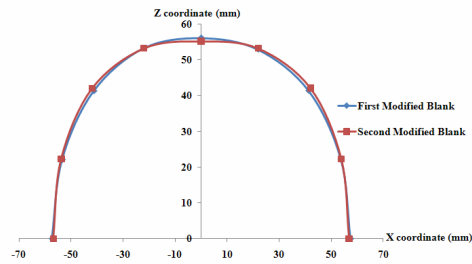
### ۳-۲ شبیه سازی فرآیند

مدل اجزای محدود فرآیند کشش عمیق در شکل (۶) آمده است. در این مدل ورق اولیه- با توجه به دولایه بودن ورق ها و ناهمسانگردی هر یک از لایه ها، مقادیر گوشواره ها به صورت غیر متقارن بوده- به صورت یک قرص کامل و انعطاف پذیر مدل سازی شد. سایر اجزاء قالب به صورت صلب مدل سازی شدند. خواص مکانیکی بدست آمده از نمودار تنش- کرنش مؤثر حقیقی، برای هر یک از لایه های مس و فولاد ضدزنگ به صورت مجزا تعریف گردید. در مدل سازی فرآیند کشش عمیق، ماتریس در یک مرحله برابر  $\gamma = 0.7$  به سمت پایین حرکت می کند. سطوح تماس در این فرآیند سنبه با ورق، ورق گیر با ورق، ماتریس با ورق و ورق گیر هستند. ضریب اصطکاک در حالت خشک  $0.15$  و روغن کاری شده  $0.05$  در نظر

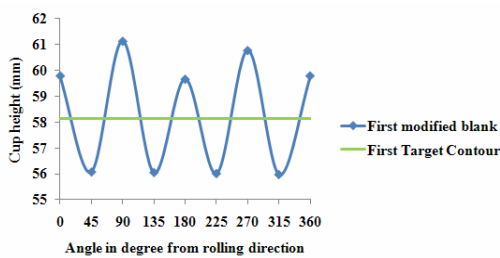
گرفته شد. برای اعمال شرایط اتصال بین دو ورق از قید گره (جابجایی یکسان در نقاط اتصال) استفاده گردید. برای ورق گیر فشار معادل  $87500 \text{ Pa}$  بر سطح پایین ورق گیر اعمال شد. برای شبکه بندی ورق در در ضخامت از ۸ المان و در سطح از ۳۱۵۹ المان هشت گره ای با نقاط انتگرال گیری کاهش یافته و برای ورق گیر در عرض از ۵ المان و در طول از ۱۵ المان چهار گره ای استفاده شد.



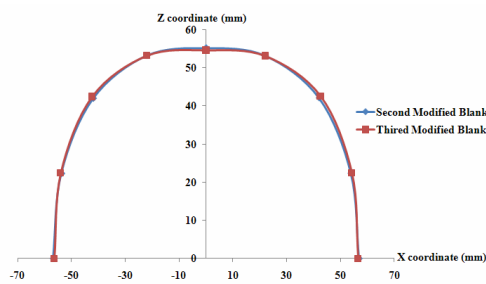
شکل ۸- اختلاف ارتفاع بین گرده اولیه با کانتور هدف



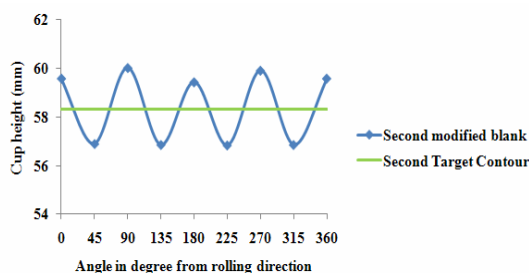
شکل ۹- هندسه بلانک اصلاح شده در مرحله اول و دوم



شکل ۱۰- اختلاف ارتفاع بین بلانک اولیه اصلاح شده با کانتور هدف

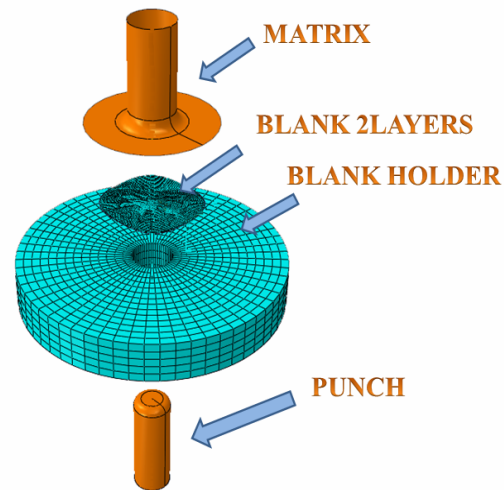


شکل ۱۱- هندسه بلانک اصلاح شده در مرحله دوم و سوم



شکل ۱۲- اختلاف ارتفاع بین بلانک اصلاح شده با کانتور هدف در مرحله

دوم

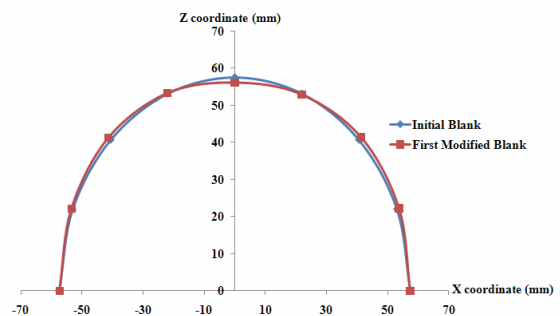


شکل ۶- قطعات مدل شده کشش عمیق در نرم افزار اجزای محدود

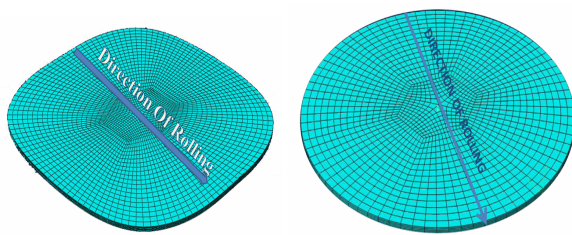
مرحله نهایی دارای مقدار خطای مجاز کمتر از  $0.4$  میلی متر برای عمق کشش  $60$  میلی متر (استوانه ای بدون لبه) می باشد.

#### ۴- نتایج

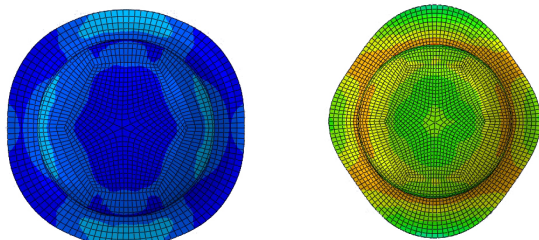
فرآیند بهینه سازی بلانک قطعه استوانه ای شکل با توجه به خطای شکل مورد نظر در پنج مرحله انجام گرفت. شکل (۷) هندسه گرده اولیه با بلانک اصلاح شده و شکل (۸) اختلاف ارتفاع بین گرده اولیه با کانتور هدف را نشان می دهد. همان طور که در شکل های ۷- ۱۷ نشان داده شده است، در مرحله اول تا پنجم با اصلاح بلانک یعنی، جایجا کردن محیط پیرامون بلانک به اندازه اختلاف ارتفاع هدف و ارتفاع تغییر شکل یافته، بلانک بهینه به صورت گام به گام که دارای خطای شکل کمتر از حد مجاز می باشد، به دست می آید.



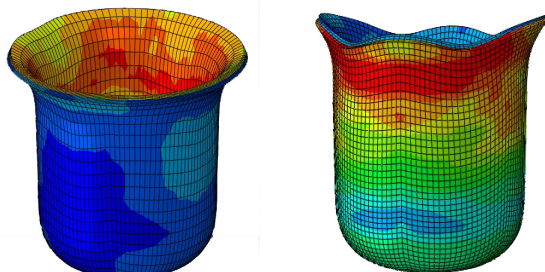
شکل ۷- هندسه گرده اولیه با بلانک اصلاح شده در مرحله اول



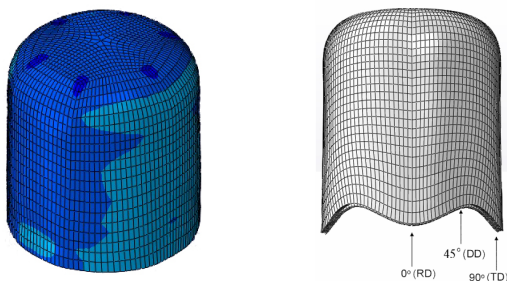
شکل ۱۸- بلانک اولیه قبل و پس از بهینه سازی



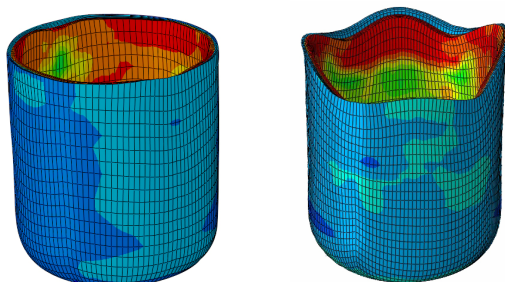
شکل ۱۹- شبیه سازی در حین فرآیند، H=40mm



شکل ۲۰- شبیه سازی در حین فرآیند، H=55mm

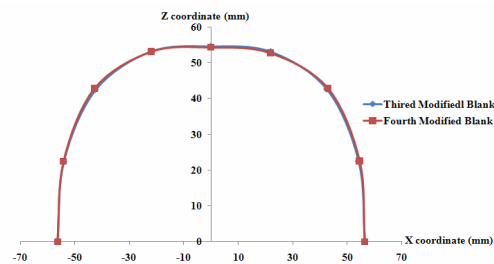


شکل ۲۱- پایان فرآیند شبیه سازی، H=70mm

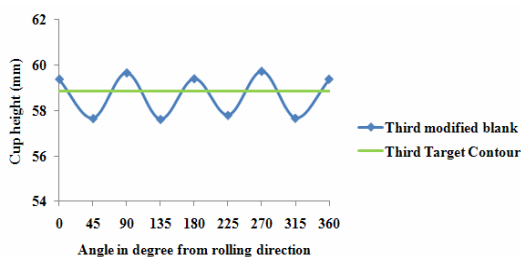


شکل ۲۲- حداقل شدن گوشواره ها در نمونه بهینه سازی شده

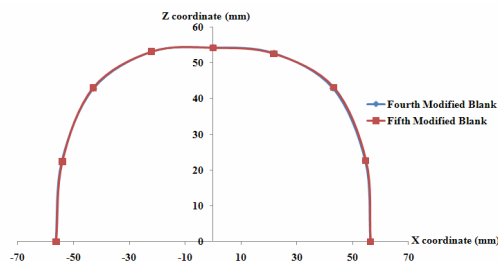
در شکل (۲۳) مراحل تکرار بهینه سازی با اختلاف شکل هندسی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بعد از تکرار پنجم خطای بوجود آمده کمتر از اختلاف مجاز ۰,۴ میلی متر است. چندین تکرار نیز بعد از



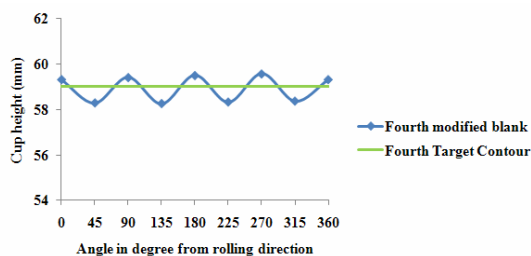
شکل ۱۳- هندسه بلانک اصلاح شده در مرحله سوم و چهارم



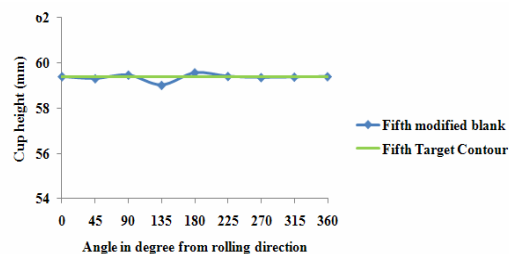
شکل ۱۴- اختلاف ارتفاع بین بلانک سوم اصلاح شده با کانتور هدف



شکل ۱۵- هندسه بلانک اصلاح شده در مرحله چهارم و پنجم



شکل ۱۶- اختلاف ارتفاع بین بلانک چهارم اصلاح شده با کانتور هدف



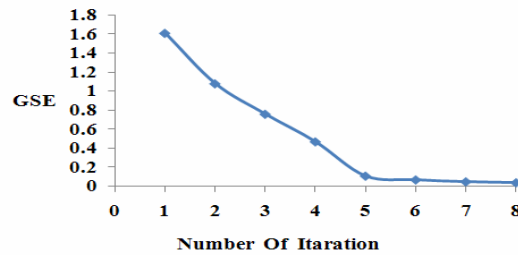
شکل ۱۷- اختلاف ارتفاع بین بلانک پنجم اصلاح شده با کانتور هدف

مراحل شبیه سازی فرآیند برای گرده اولیه و بلانک اصلاح شده در مراحل مختلف و پایان فرآیند در شکل های ۱۸-۲۲ آورده شده است. نتایج شبیه سازی در این مرحله نشان دهنده یک استوانه با ارتفاع تقریباً یکسان می باشد.



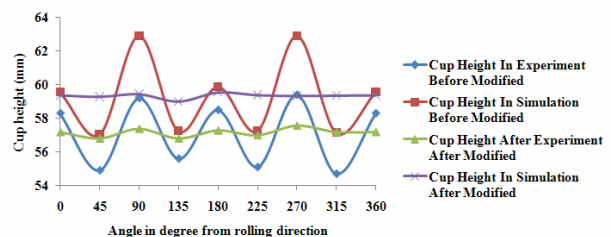
وجود آمده در شبیه‌سازی قبل از بهینه‌سازی ورق ۱,۶۱mm برابر با اختلاف ارتفاع گوشواره‌های ۵,۸۷mm می‌باشد و بعد از بهینه‌سازی خطای شکل هندسی به ۰,۱۱mm برابر با اختلاف ارتفاع گوشواره‌ها ۰,۷۲mm می‌باشد. اختلاف ارتفاع گوشواره‌ها در آزمایش‌های تجربی قبل از بهینه‌سازی ۴,۳ mm می‌باشد و بعد از بهینه‌سازی برابر با ۰,۸mm می‌باشد. بنابراین با یک مرحله بهینه‌سازی می‌توان حدود ۸۰ درصد ارتفاع گوشواره‌های تشکیل شده در ناحیه لبه فنجان را کاهش داد. نتایج حاصل توانایی تکنیک Push/Pull را برای طراحی بلانک اولیه ورق‌های دولایه با کمترین درصد خطا نشان می‌دهد.

مرحله پنجم نیز صورت گرفت که اختلاف شکل هندسی چندانی با تکرار در مرحله پنجم نداشت.



شکل ۲۳- خطای شکل هندسی با بلانک‌های بهینه‌سازی شده

انجام فرآیند تجربی بر روی ورق‌های دولایه مس - فولاد ضد زنگ نشان می‌دهد که اختلاف ارتفاع بین گوشواره‌ها برای گرده اولیه در نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی در حد قابل قبولی قرار دارد ( شکل ۲۴). تفاوت موجود را می‌توان به خواص مواد، ضرائب اصطکاک و ساده‌سازی‌های انجام گرفته‌شده در فرآیند نسبت داد. بنابراین منحنی بهینه‌سازی بلانک اصلاح‌شده در آزمایش‌های تجربی اختلاف جزئی با منحنی شبیه‌سازی دارد، که پس از چندین آزمایش منحنی بهینه در نتایج تجربی حاصل گردید. نکته قابل توجه رسیدن به ارتفاع‌های تقریباً یکسان در آزمایش‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی است.



شکل ۲۴- نتیجه بهینه‌سازی در نتایج تجربی

نتیجه بهینه‌سازی از آزمایش‌های تجربی در شکل (۲۵) آمده است.



شکل ۲۵- نتیجه بهینه‌سازی در نتایج تجربی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش Push/Pull بهینه‌سازی بلانک اولیه در ورق‌های دولایه انجام گرفته شد. در روش استفاده شده با در نظر گرفتن متغیر ناهمسانگردی ورق و ارتباط آن با شبکه اجزای محدود، جواب به دست آمده دارای دقت قابل قبول است. خطای شکل هندسی

## مراجع

- [1] Mohammad Habibi Parsa , Payam pournia , "Optimization of initial blank shape predicted based on inverse finite element method", pp.218-233, Finite Elements in Analysis and Design, 2007
- [2] Anupam Agrawal, N. Venkata Reddy, P.M. Dixit, "Optimal blank shape prediction considering sheet thickness variation: An upper bound approach", in Proc. pp 249-258 ,journal of materials processing technology , 2008
- [3] Ching-Tien Lin, Chin-Tarn Kwan, "Application of abductive network and FEM to predict the optimal blank contour of an elliptic cylindrical cup from deep drawing", journal of materials processing technology, 2008
- [4] W. Hammami, R. Padmanabhan, M. C. Oliveira, H. BelHadjSalah, J. L. Alves, L. F. Menezes, "A deformation based blank design method for formed parts" pp. 303-314, Vol. 5 International Journal of Mechanics and Materials, 2009
- [5] A. Chamekh, S. BenRhaïem, H. Khaterchi, H. BelHadjSalah, R. Hambli, "An optimization strategy based on a meta model applied for the prediction of the initial blank shape in a deep drawing process", pp. 93100 ,Vol. 50 International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010.
- [6] M. Azaouzi, S. Belouettar, G. Rauchs , "A numerical method for the optimal blank shape design" , pp. 756-765, Vol. 32 , Materials and Design , 2010