



تحلیل عددی فرایند کشش عمیق داغ ورق ضخیم فولادی بدون استفاده از ورق گیر با قالب‌های تراکریکس و شبه تراکریکس

محمدعلی رسولی^{۱*}، سمانه رشیدی علویجه^۲ و سعید کاظم‌نادی^۳

^۱ استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
^۳ دانش‌آموخته، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

چکیده

فرایند کشش عمیق فرایندی است که معمولاً به صورت سرد انجام می‌شود، اما مواردی از کاربرد این فرایند در شرایط گرم به منظور کاهش نیروی شکل‌دهی نیز به چشم می‌خورد. استفاده از ورق گیر در فرایند شکل‌دهی منجر به افزایش نیروی شکل‌دهی شده و تغییرات ضخامت ورق را به ویژه در حالت گرم به دلیل افزایش اصطکاک به همراه دارد. از سوی دیگر، حذف ورق گیر نیز به دلیل بروز تنش‌های محیطی می‌تواند موجب چین‌خوردگی ورق شده و با افزایش عمق کشش این مشکل تشدید می‌گردد. در این پژوهش، تحلیل المان محدود برای شکل‌دهی کلاهک نیم‌کروی از ورق فولادی استحکام بالا در فرایند کشش عمیق داغ بدون استفاده از ورق گیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها برای دو نوع قالب تراکریکس و شبه‌تراکریکس تقریبی و ورق با ضخامت‌ها و قطرهای متفاوت انجام گرفته و نتایج آن با یکدیگر مقایسه می‌گردد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد با افزایش ضخامت و قطر ورق، نیروی موردنیاز سنبه برای شکل‌دهی افزایش می‌یابد. به طور کلی، در قالب تراکریکس به نیروی شکل‌دهی کمتری نیاز است و در عین حال تغییرات ضخامت کمتری به همراه دارد؛ همچنین، شکل‌دهی نیم‌کره‌های بدون دنباله‌ی استوانه‌ای در ضخامت‌های بالاتر از یک سانتی‌متر سالم و عاری از چین‌خوردگی خواهد بود.

کلمات کلیدی: تحلیل المان محدود؛ کلاهک نیم‌کروی؛ کشش عمیق داغ؛ قالب تراکریکس؛ قالب شبه تراکریکس تقریبی

Numerical Analysis of Hot Deep Drawing Process of Thick Steel Sheet without Using Blank Holder with Tractrix and Pseudo Tractrix Dies

M. A. Rasoli^{1,*}, S. Rashidi², S. Kazemnadi³

¹ Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran

² Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

³ Alumn, Department of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran

Abstract

Deep drawing is a process that is usually performed in cold conditions, but there are also cases of using this process in hot conditions to reduce the forming force. The use of a blank holder in the forming process leads to an increase in the forming force and changes the thickness of the sheet, especially in the hot state, due to the increase in friction. On the other hand, omission of blank holder will cause wrinkling of the sheet due to development of periferal stresses, and this problem is aggravated by increasing the depth of drawing. In this research, the finite element analysis for forming a hemispherical head from a high strength steel sheet in the hot deep drawing process without using a blank holder is studied. Simulations are done for two types of tractrix and pseudo tractrix dies and for sheets with different thicknesses and diameters, and the results are compared with each other. The results of the analyzes show that with the increase in the thickness and diameter of the sheet, the force required by the mandrel for forming increases. In general, less forming force is required in the tractrix die and at the same time it brings less thickness changes. Furthermore, the formation of hemispherical objects lacking cylindrical tiles in thicknesses higher than one centimeter will be healthy and free of wrinkles.

Keywords: Finite Element Analysis; Hemispherical Head; Hot Deep Drawing; Tractrix Die; Pseudo Tractrix Die

۱- مقدمه

برای شکل‌دهی ورق، فرایندهای مختلفی از قبیل کش عمیق، خم‌کاری، چرخ‌کاری و غیره جهت ساخت قطعات صنعتی وجود دارد که کاربرد آن‌ها بستگی به عواملی چون هندسه‌ی قطعه‌ی کار، جنس ورق، حجم تغییرشکل و غیره دارد. شکل‌دهی ورق توسط فرایند کش عمیق یکی از روش‌های متداول در صنایع مختلف به‌ویژه صنعت خودروسازی و هوافضاست. همواره محدودیت‌هایی در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌ها وجود دارد که تولید قطعات سالم و بدون عیب مستلزم رعایت آن‌هاست. فرایند کش عمیق نیز از این محدودیت‌ها مستثنا نیست. چین‌خوردگی ورق به سبب وجود تنش‌های فشاری در بخش‌هایی از قطعه، برگشت فنری و توزیع غیریکنواخت ضخامت از عیوبی است که عمدتاً در این فرایندها ایجاد می‌شود. مخازن کروی تحت فشار را می‌توان به کمک روش شکل‌دهی گل‌برگی و جوشکاری گل‌برگ‌ها، شکل‌دهی انفجاری، هیدروفورینگ و کش عمیق تولید کرد. در روش گل‌برگی، نواقص هندسی و خروج از فرم و نواقص ناشی از جوشکاری بسیار محتمل است که افزایش ضخامت پوسته به منظور جلوگیری از رخ‌داد کماتش زودهنگام را مطالبه می‌کند و بنابراین وزن سازه افزایش می‌یابد. در شرایطی که محدودیت‌های وزنی، همانند کاربردهای زیرسطحی وجود دارد، نمی‌توان از روش گل‌برگی استفاده کرد. در دو روش دیگر (شکل‌دهی انفجاری و شکل‌دهی هیدروفورینگ) با توجه به نیروی زیاد موردنیاز فرایند برای تولید قطعه‌ی نیم‌کره با ابعاد بزرگ، امکان ساخت آن با این دو روش به راحتی ممکن نیست. فرایند کش عمیق در اوایل سال ۱۸۸۰ میلادی در آمریکا توسط الی مانویل طراحی و اجرا گردید. در این فرایند، امکان توسعه‌ی عیوبی نظیر چین خوردگی، پارگی و ... وجود دارد. کاریما معضل ایجاد چروک در فرایند کش عمیق ورق‌های مدور برای تولید فنجان‌های استوانه‌ای را بررسی کرده و ایجاد چروک را به یک حد بحرانی از متغیر نسبت قطر صفحه به ضخامت آن ربط داد و یک حد برای ایجاد چروک معرفی کرد [۱]. مکی تأثیر شکل قالب بر عملکرد فرایند کش عمیق را در قالب فاقد ورق‌گیر بررسی و مشاهده کرد که شکل قالب

تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر نیروی موردنیاز فرایند دارد [۲]. یو و استرانگ از تئوری تغییر شکل‌های بزرگ^۱ برای تعیین زمان پیدایش چروک در یک ورق الاستیک دایره‌ای تحت بار وارده به وسیله یک سنبه کروی در مرکز آن استفاده کردند. آن‌ها عنوان کردند، چروک در صفحات نازک الاستیک تنها زمانی رخ می‌دهد که نسبت قطر به ضخامت صفحات بزرگتر از ۸۰ باشد و حاصل ضرب نسبت فوق و نسبت شعاع صفحه به شعاع سنبه بزرگتر از ۸ باشد [۳]. هاتچینسون و نیل با استفاده از آنالیز کماتش پلاستیک برای مودهای باریک با طول موج کوتاه، شرایط شروع چروک در صفحات فلزی دارای انحنای دوگانه را تعیین کردند [۴]. برز و همکاران برای شناخت مکانیزم‌های تشکیل چروک، آزمون‌های برشی با انواع پارچه‌های متشکل از الیاف شیشه و کربن و نیز با پارچه‌های آغشته شده به پلی‌آمید را بررسی و مشاهده کردند که تشکیل چروک به شدت به تنش‌های غشایی داخل پارچه مرتبط است [۵]. مانیش توسعه‌ی یک قالب تراتریکس برای تولید فنجان‌های مربعی و تعیین حد کشش برای صفحات آلومینیومی با ضخامت یک، دو و سه میلی‌متر را مورد مطالعه قرار داد. او گزارش داد که استفاده از روان‌ساز فقط روی قالب، بهترین نتیجه را بدست می‌دهد؛ همچنین، مشاهده کرد که پدیده‌ی چین‌خوردگی در ورق‌های با ضخامت یک و دو میلی‌متری شدید است و تولید فنجان بدون چین‌خوردگی با ورق‌های یک میلی‌متری امکان‌پذیر نیست [۶]. چو و ژو ایجاد چروک در کش عمیق فنجان را به صورت تئوری ارزیابی کردند و تأثیر عرض فلنج، نسبت‌های کشش، ویژگی‌های ماده و سخت شدن در اثر کرنش بر آغاز ایجاد چین‌خوردگی را مورد بررسی قرار دادند [۷]. قریب و همکاران یک مدل ریاضی مبتنی بر تفاضل‌های محدود با حل معادلات تعادل، پیوستگی و پلاستیسیته برای فرایند کشش فنجان را توسعه دادند و عنوان کردند از طریق بهینه‌سازی نیروی سنبه و ورق‌گیر می‌توان کار لازم برای کشش عمیق را کاهش داد و در عین حال از چروک شدن و پارگی ورق جلوگیری کرد [۸]. پرنیس استفاده از یک قالب کش عمیق با شکل تراتریکس را به عنوان شکل بهینه قالب مطرح کرد [۹]. لوگاناتان و نارایاناسامی ایجاد چروک در ورق‌های آلومینیوم را طی کشش عمیق در قالب تراتریکس بررسی و مشاهده کردند که بعضی گریدهای آلومینیوم با سخت

^۱ Large deflection theory

شدن در مقابل کرنش و بهره‌ی تنش پایین و سرعت سخت شدن نرمالیزه زیاد، مقاومت بیشتری در مقابل چروک شدن دارند [۱۰]. لوگاناتان و نارایاناسامی تحقیق مشابهی نیز در مورد ورق‌های فولادی در صنایع اتومبیل سازی انجام دادند و مشاهده کردند که قالب‌های مخروطی و تراتریکس در مقایسه با قالب‌های مرسوم حد کشش بیشتری ایجاد می‌کند. هنگامی که از قالب‌های مذکور استفاده می‌شود، نیاز به ورق‌گیر از بین می‌رود و تمایل به چین خوردگی به ویژه در مراحل اولیه کشش ورق‌های نازک کاهش می‌یابد [۱۱]. آگروال و همکاران حداقل فشار مورد نیاز ورق‌گیر برای پیش‌گیری از ایجاد چروک در طی فرایند کشش عمیق را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج، آن‌ها با افزایش غیر همگنی ورق، تعداد چروک‌ها افزایش یافته و حداقل فشار مورد نیاز ورق‌گیر کاهش می‌یابد. برعکس با افزایش ضخامت، تعداد چروک‌ها کاهش و حداقل فشار مورد نیاز افزایش می‌یابد [۱۲]. صدیقی و راستی شبیه‌سازی عددی تولید مخازن آلومینیومی سی‌ان‌جی به روش کشش عمیق را انجام دادند و کارایی شبیه‌ساز را، ابتدا روی داده‌های تجربی موجود تست کردند و سپس برای تحلیل قالب‌های تخت، مخروطی و تراتریکس مورد استفاده قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که قالب تراتریکس کم‌ترین نیرو را نیاز داشته و تغییرات ضخامت ظرف در این نوع قالب کم‌تر از بقیه‌ی قالب‌هاست [۱۳]. مورواتی و همکاران چروک شدن یک ورق دو لایه متشکل از آلومینیوم و فولاد ضدزنگ در فرایند کشش عمیق را به روش تجربی و عددی با هدف به حداقل رساندن نیروی ورق‌گیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که نیروی بهینه ورق‌گیر وابسته به هندسه ورق، ویژگی‌های جنس آن و نیز هندسه‌ی قالب است و در صورتی که ورق آلومینیوم با سنبه در تماس باشد نیروی لازم بیشتر است [۱۴]. ساکسنا و دیکسیت از روش تحلیلی و تجربی حداکثر ارتفاع فنجان تولیدی، برای مقادیر مختلف متغیرهای هندسی و عملیاتی را محاسبه کردند [۱۵]. آگروال و همکاران نیز به همین روش، تشکیل چروک در فرایند کشش مرحله دوم یک ظرف استوانه‌ای دو عمقی با ترکیب روش‌های انرژی را بررسی کردند [۱۶]. کدخدائیان و مؤیدیان از مدل دو بعدی صفحه تنش و تابع دو شاخه شدن تئوری عمومی هیل برای بررسی چروک شدن الاستیک-پلاستیک یک ورق گرد استفاده کردند. آنها شرایط بحرانی برای ایجاد چروک‌های پلاستیک و

الاستیک یک ورق گرد طی فرایند کشش عمیق را بدست آوردند [۱۷]. پراکاش و کومار فرایند کشش عمیق را در نرم‌افزار فست فرم برای چند قطعه با شکل‌های مختلف شبیه‌سازی کردند و راهکارهایی برای پیشگیری از ایجاد چروک بدست آوردند [۱۸]. ردی و همکاران با استفاده از تحلیل اجزای محدود اثر عوامل مرتبط با ابزار از جمله شعاع گوشه قالب و شعاع گوشه سنبه را بر مقادیر حد نیروی ورق‌گیر برای چروک شدن و یا شکست بررسی کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که ضریب اصطکاک سطوح تماس ورق-ورق‌گیر و ورق-قالب بر حداقل نیروی ورق‌گیر برای پیش‌گیری از چروک اثر کمی دارد ولی بر حداکثر نیروی ورق‌گیر برای پیش‌گیری از شکست تأثیر زیادی دارد [۱۹]. دهابیان و همکاران فرایند کشش عمیق ورق گرد آلومینیومی درون یک قالب مخروطی بدون استفاده از ورق‌گیر را آزمایش و به روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند و توانستند فنجان بیضوی با نسبت حدی کشش $2/6$ را با موفقیت تولید کنند [۲۰]. آن‌ها همچنین در پژوهشی دیگر یک روش جدید برای تولید فنجان‌های بیضوی به روش کشش عمیق ارائه کردند. در این روش از یک قالب مخروطی و یک سنبه بیضوی با سر تخت استفاده شد. آن‌ها ورق را بدون ورق‌گیر و زائده روی قالب قرار داده و با یک حرکت سنبه به فنجان تبدیل کردند و توانستند یک فنجان بیضوی با نسبت کشش حدی $2/26$ را با موفقیت تولید کنند [۱۰]. هسان و همکاران استفاده از روش کشش عمیق تک ضربه‌ای بدون ورق‌گیر را برای تولید قطعات با سطح مقطع نامتقارن از قبیل مثلث، ستاره، گل رز و... بررسی و نتایج را با مدل‌سازی به روش اجزای محدود مقایسه کردند. استفاده از قالب مخروطی با کف دارای سوراخ منطبق با سنبه، موجب تولید موفقیت آمیز قطعات گردید [۲۱]. لی‌والد و همکاران با استفاده از داده‌های به‌دست آمده برای یک شکل گلگیر، مکانیزم‌های مختلف تولید چروک را بررسی کرده و یک منحنی حد چروک شدن را تعیین کردند که به کمک آن ایجاد چروک در هر ناحیه از ورق شکل‌دهی شده شناسایی می‌شود [۲۲]. صالح و علی سامانه‌ی جدیدی برای تولید فنجان گرد از ورق‌های نازک به روش کشش عمیق بدون استفاده از ورق‌گیر پیشنهاد کردند که در آن فنجان‌های گرد به صورت تک ضرب با نسبت کشش حدی $1/86$ تولید می‌شد [۲۳]. ماگرنو و همکاران یک روش مرکب از تجربه و تئوری را برای تعیین حد

اغلب پژوهش‌های انجام شده در خصوص مطالعه‌ی تأثیر متغیرهای مختلف بر مقدار تنش محیطی اعمالی به ورق، عیوب تغییرات ضخامت ورق پس از انجام فرایند، چین‌خوردگی ورق در حین فرایند، نیروی لازم جهت کشش ورق در فرایند، مقدار نیروی آستانه چروک شدن در حضور و نیز در غیاب ورق‌گیر است. این متغیرها شامل شکل سنبه، سرعت حرکت سنبه، قطر ورق، ضخامت ورق، جنس ورق، همگنی ورق، شکل قالب و شکل لبه قالب است. در این مقاله، فرایند کشش عمیق داغ ورق‌های فولادی در قالب‌های بدون ورق‌گیر تحلیل و بررسی می‌شود. برای این منظور هندسه‌ی مناسبی برای قالب در فرایند کشش عمیق داغ با دمای ثابت ۱۱۰۰ کلوین پیشنهاد می‌گردد، تا بتوان ورق‌های فولادی از جنس HY۱۰۰ را با حداقل نیرو و عاری از عیوب رایج در زمان ثابت ۱۵ ثانیه به شکل نیم‌کره تولید کرد.

در این تحلیل، مقدار تنش محیطی اعمالی به ورق، عیوب تغییرات ضخامت ورق پس از انجام فرایند و چین‌خوردگی ورق در حین فرایند و همچنین نیروی لازم جهت کشش ورق در فرایند کشش عمیق داغ ورق‌های فولادی برای تولید قطعات کروی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور با کمک روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس فرایند به‌طور کامل شبیه‌سازی و نتایج حاصل از روش المان محدود در قالب‌ها و ورق‌های مختلف مقایسه شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی متغیرهای مسأله

متغیرهای مسأله به سه دسته‌ی کلی شامل متغیرهای فرایند، قالب و قطعه‌ی کار تقسیم می‌شوند. در جدول ۱ متغیرهای ورودی مربوط به هر دسته مشاهده می‌شود.

جدول ۱- متغیرهای لازم برای تعریف مسأله

متغیرهای فرایند کشش عمیق	متغیرهای قالب	متغیرهای قطعه کار
اصطکاک بین سطوح	هندسه ماتریس	قطر ورق اولیه
دما	هندسه سنبه	ضخامت ورق اولیه
سرعت فرایند		جنس قطعه

قابلیت شکل‌پذیری با چروک شدن در شکل‌دهی به صفحات فلزی تعیین کردند [۲۴]. صالح و همکاران روش جدید کشش عمیق معکوس بدون استفاده از ورق‌گیر، با حرکت تک‌مرحله‌ای سنبه جهت تولید یک فنجان بیضوی با استفاده از یک قالب بیضوی را توسعه دادند و تأثیر لقی بر برخی متغیرها از قبیل نیروی مورد نیاز فرایند، تنش، کرنش، و توزیع ضخامت را بررسی کردند. آن‌ها عنوان کردند لقی موجب کاهش چروک و ایجاد یک حداقل گوشواره‌ای شدن در قطعه می‌شود [۲۵]. سیفی و عباسی ایجاد چین‌خوردگی در فرایند کشش عمیق دوفلزی با روش تحلیلی و استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود را شبیه‌سازی و نتایج آن را با نمونه‌های تجربی مقایسه کردند. آن‌ها بیان کردند که دو متغیر میزان لقی ورق‌گیر و شرایط تماس ورق‌ها بیشترین تأثیر را بر تعداد چین‌خوردگی‌ها دارند و تنها متغیر تأثیرگذار بر ارتفاع چین‌ها، اندازه‌ی لقی ورق‌گیر است [۲۶]. برز و همکاران، روش‌های مختلف محاسبه‌ی حد بحرانی آستانه‌ی چروک شدن شامل روش دوشاخه‌ای شدن و روش مبتنی بر تئوری انرژی را با کمک محاسبات با نرم‌افزار اتوفر^۱ و مشاهدات تجربی مقایسه کردند [۲۷]. وی‌پینگ و همکاران روش عددی دینافور^۲ را برای شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق قطعات استوانه‌ای استفاده کردند. آن‌ها توزیع ضخامت، تنش و کرنش در طی کشش چند مرحله‌ای و نیز عیوب احتمالی در این مرحله در حضور و در غیاب ورق‌گیر را مقایسه و ادعا کردند که این روش عددی می‌تواند برای طراحی قالب و نیز پیش‌گویی و کنترل عیوب احتمالی مورد استفاده قرار گیرد [۲۸].

آشتیانی و ارجنکی فرایند کشش عمیق گرم برای ورق نازک آلومینیومی را در دماهای مختلف به صورت تجربی و شبیه‌سازی المان محدود بررسی نموده و دریافتند که افزایش دمای شکل‌دهی و کاهش سرعت فرایند منجر به کاهش نیروی لازم برای انجام فرایند خواهد شد [۲۹]. عبدالمجید و همکاران فرایند کشش عمیق بدون استفاده از ورق‌گیر را بررسی و برای این منظور نسبت حدی کشش در غیاب ورق‌گیر را در شرایط مختلف، برای ورق به ضخامت سه میلی‌متر از جنس برنز و آلومینیوم اندازه‌گیری کردند. آن‌ها گزارش دادند که روان‌کننده، وجود خش روی سطح سنبه و سرعت حرکت آن، عوامل مؤثر بر نسبت حدی کشش هستند [۳۰].

² Dynaform numerical method

¹ Autoform

۲-۱-۱- اصطکاک بین سطوح

انتخاب سیستم‌های روانکاری در فرآیند شکل‌دهی داغ، بسیار محدود است. متداول‌ترین سیستم‌های روانکاری شامل دی سولفات مولیبدن (MoS₂)، گرافیت، روانکار مصنوعی و شیشه است. محلول روانکار در هنگام تماس با اجزای قالب، تبخیر شده و آن‌ها را خنک می‌کند. از این رو، اجزای قالب در مقابل افزایش سایش ناشی از نرم‌شدگی حرارتی، محافظت می‌شود [۹]. برای تعریف رفتار اصطکاکی میان سطوح مشترک اجزای فرآیند، مدل کولمب با ضریب اصطکاک ثابت^۱، مطابق رابطه‌ی (۱) در نظر گرفته شده است.

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (1)$$

رابطه‌ی فوق نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک (μ) برابر با نسبت تنش برشی اصطکاکی (τ) به تنش عمودی (σ_n) است. از سوی دیگر، ماکزیمم تنش برشی را می‌توان با استفاده از قانون اصطکاک برشی طبق رابطه‌ی (۲) تعیین کرد [۳۱].

$$\tau = \frac{m}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} = \frac{m(\sigma_y + \sigma_{uts})}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

مقدار میانگین عامل برشی (m) برای وضعیت بدون اصطکاک، برابر با صفر و در وضعیت اصطکاک چسبنده، برابر با یک می‌باشد. تحت شرایط شکل‌دهی داغ و با توجه به روانکار پایه گرافیتی، مقدار m برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۳۲].

۲-۱-۲- دمای انجام فرایند

در این پژوهش فرایند کشش عمیق در حالت داغ انجام گرفته است. در این حالت ورق را حرارت داده و پس از رسیدن به دمای لازم و مورد نظر آن را روی ماتریس قرار داده و فرایند کشش انجام شد. دمای انجام فرایند برای ماده‌ی مورد نظر ثابت و ۱۱۰۰ کلوین است [۳۲].

۲-۱-۳- زمان انجام فرایند

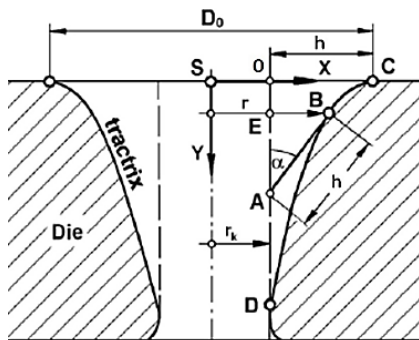
زمان انجام فرایند ثابت و برابر با ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.

۲-۱-۴- هندسه‌ی ماتریس

فرایند کشش عمیق در دو حالت با ورق گیر و بدون ورق گیر انجام می‌گیرد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته در حالت با ورق گیر، این فرایند به پرس با تناژ خیلی زیاد نیاز دارد [۱۴، ۲۲]؛ لذا در این پژوهش، استفاده از قالب‌های بدون ورق گیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرم هندسی ماتریس در فرایندهای بدون ورق گیر به دو صورت تراتریکس و مخروطی (شبه تراتریکس) است.

الف- قالب تراتریکس

تصویر قالب‌های تراتریکس در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایشی از قالب تراتریکس [۳۳]

متغیرهای قالب تراتریکس برای مدل‌سازی در این شکل قابل مشاهده است. در منحنی تراتریکس، طول هر خط مماس بر منحنی که از نقطه‌ی تماس بر منحنی تا یک خط مستقیم (منطبق بر دیواره سنبه) امتداد می‌یابد، ثابت است. این طول ثابت با نماد h مشخص و با عنوان ثابت تراتریکس مشخص شده است. اگر زاویه‌ی میان خط مماس بر منحنی (AB) و راستای افقی (OC) با نماد α معرفی شود، رابطه‌ی (۳) برقرار است:

$$\frac{-dy}{dx} = \tan \alpha = \frac{\sqrt{h^2 - x^2}}{x} \quad (3)$$

با انتگرال‌گیری از طرفین معادله دیفرانسیل فوق، معادله‌ی منحنی تراتریکس به دست می‌آید:

¹ Penalty method

قطر بزرگتر خواهد بود. برای تخمین قطر ورق اولیه می‌توان مطابق رابطه‌ی (۵) از مساوی قرار دادن مساحت قطعه‌ی تولیدی و ورق اولیه استفاده کرد [۳۱].

$$A_b = A_c \Rightarrow \frac{\pi D^2}{4} = \frac{1}{2} \pi d^2 \Rightarrow D = \sqrt{2}d \quad (5)$$

گاهی برای انطباق هندسی مناسب قطعه‌ی تولیدی و شکل مناسب آن و یا نیاز به تولید نیم‌کره با دنباله‌ی استوانه‌ای، نیاز به استفاده از ورق اولیه با قطر بیشتر است؛ لذا در این پژوهش، یکی از متغیرها که جهت بررسی فرایند کشش و کیفیت قطعه‌ی تولیدی استفاده شده قطر ورق اولیه است که در پنج مقدار $\frac{3}{2}$ و $\frac{3}{4}$ و $\frac{3}{6}$ ، $\frac{3}{8}$ و $\frac{3}{4}$ متر بررسی شده است.

۲-۱-۶- ضخامت ورق اولیه

یکی از متغیرهای مؤثر در فرایند کشش عمیق، ضخامت ورق اولیه است که با تغییر آن میزان ضخامت ورق پس از انجام فرایند، ماکزیم نیروی مورد نیاز سنبه و انطباق هندسی قطعه تولیدی با سنبه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این پژوهش، با تغییر ضخامت ورق اولیه در اندازه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ سانتی‌متر، میزان اثرپذیری فرایند کشش عمیق و کیفیت قطعه‌ی تولیدی بررسی شده است.

۲-۱-۷- جنس قطعه کار و توصیف رفتار آن تحت تغییر

شکل

جنس محفظه‌ی نیم‌کروی از فولاد HY۱۰۰ است که به عنوان فولاد کم‌کربن کوئنچ و تمپر شده شناخته می‌شود [۳۱]. از جمله موارد استفاده این فولاد می‌توان به کاربرد آن در ساخت مخازن تحت فشار، تجهیزات سنگین و سازه‌های فولادی بزرگ، ساخت بدنه‌ی کشتی و زیردریایی‌ها و سازه‌های ساحلی اشاره نمود. استحکام کششی بالا، شکل‌پذیری خوب، مقاومت به خوردگی و جوش‌پذیری از جمله ویژگی‌های این فولاد است. جدول ۲ خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد HY۱۰۰ را نشان می‌دهد.

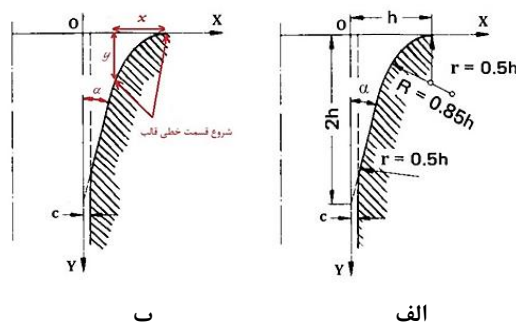
جنس ورق مورد استفاده در این پژوهش از مدل ساختاری جانسون-کووک تبعیت می‌کند [۳۴]. مدل ساختاری جانسون-کووک به صورت گسترده‌ای به عنوان مدل تنش سیلان وابسته به کرنش، نرخ کرنش و دما برای انواع مواد در بازه‌ی مختلفی

$$y = h \ln \left(\frac{h + \sqrt{h^2 - x^2}}{x} \right) - \sqrt{h^2 - x^2} \quad (4)$$

متغیر h در رابطه (۴) همان ثابت قالب تراتریکس تحت عنوان خط مماس بر منحنی است. با تغییر ثابت قالب، فرم و شکل سر قالب تغییر می‌کند. برای تحلیل و بررسی این نوع قالب با تغییر در ثابت قالب (متغیر h)، تأثیر تغییر این متغیر روی قطعه‌ی تولیدی و فرایند تولید بررسی شده است. لازم به ذکر است، در قالب‌های با ثابت بالاتر از $\frac{0}{5}$ متر طول قالب خیلی زیاد می‌شود (در حدود ۴ متر) و ثوابت کمتر از $\frac{0}{3}$ متر نیز به دلیل فرم‌دهی سریع نیاز به نیروی زیاد سنبه بوده و مناسب تحلیل نیست؛ بنابراین، تحلیل‌ها برای سه مقدار h برابر $\frac{0}{3}$ ، $\frac{0}{4}$ و $\frac{0}{5}$ انجام گرفته است.

ب- قالب تراتریکس تقریبی

قالب تراتریکس تقریبی شبیه قالب تراتریکس است با این تفاوت که تکه‌ای از فرم قالب به صورت خط مستقیم است. به این نوع قالب‌ها، قالب‌های مخروطی نیز می‌گویند. فرم قالب‌های مخروطی در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- قالب‌های تراتریکس تقریبی [۳۳] (الف) شکل

کلی قالب و (ب) معرفی متغیرهای قالب

در تحلیل انجام گرفته با تغییر زاویه‌ی قالب در مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درجه، تأثیر مقادیر مختلف این متغیر بررسی شده است.

۲-۱-۵- قطر ورق اولیه

قطر ورق در فرایند، تابع شکل هندسی تولید شده در آن است. در صورت تولید نیم‌کره بدون دنباله، قطر قطعه مشخص است، ولی در صورت نیاز به تولید نیم‌کره‌های دارای دنباله‌ی استوانه‌ای با توجه به افزایش عمق کشش، نیاز به ورق اولیه با

جدول ۳- مقادیر ثوابت فولاد HY۱۰۰ در مدل جانسون-کوک در دمای محیط [۳۱]

مقدار	توصیف متغیر	متغیر
MPa۷۵۸	ثابت مدل (تنش تسلیم)	A
MPa۴۰۲	ثابت مدل (ضریب استحکام)	B
۰/۰۱۱	ثابت مدل	C
۱/۱۳	ثابت مدل	m
۰/۲۶	ثابت مدل (توان کرنش سختی)	n

۲-۲- تحلیل عددی فرایند شکل‌دهی با روش اجزاء محدود

همان‌طور که بیان شد، در این پژوهش برای انجام تحلیل عددی فرایند شکل‌دهی از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار ABAQUS 6.18 استفاده شده است.

۲-۲-۱- مدل‌سازی و مش‌بندی

با توجه به تقارن محوری بلنک و اجزای قالب، مدل‌سازی مسأله به صورت متقارن محوری انجام شده است. مدل المان محدود شامل یک ورق دایروی، یک سنبه سر نیم‌کروی و یک ماتریس است. لقی میان اجزای قالب بر اساس معادله تجربی که توسط اهلر و کایزر [۳۷] پیشنهاد شده تنظیم و با توجه به ثابت بودن قطر نیم‌کره‌ی تولیدی، به ابعاد سنبه اعمال شده است.

$$C = t_0 + 0.07\sqrt{10t_0} \quad (۹)$$

در معادله‌ی (۹) مقدار ضخامت ورق اولیه است. با اعمال لقی به سنبه، قطر سنبه از رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آید:

$$d_s = d_a - 2 \times (C + t_0) \quad (۱۰)$$

در این رابطه، d_s قطر سنبه و d_a قطر ماتریس به کار رفته در قالب کشش عمیق است. مدل سنبه و ماتریس به صورت پوسته صلب تحلیلی و پوسته صلب گسسته در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، مدل ورق به صورت پوسته مسطح و تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نمایی از چیدمان قطعات مشاهده می‌گردد.

از نرخ کرنش و دمای تغییر شکل استفاده شده است [۳۵، ۳۶]. مدل اصلی جانسون-کوک توسط رابطه‌ی (۶) بیان می‌شود:

$$\bar{\sigma} = [A + B \bar{\epsilon}^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - \frac{\dot{\epsilon}}{T^{*m}}] \quad (۶)$$

نسبت نرخ کرنش بدون بعد از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود:

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (۷)$$

دمای معادل نیز از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید:

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \quad (۸)$$

در این پژوهش، فرض شده که فرآیند کشش عمیق داغ به صورت هم‌دما انجام و نرخ کرنش در طی فرایند، ثابت است. مقدار ثوابت رابطه‌ی جانسون-کوک مربوط به ماده‌ی مذکور در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد HY۱۰۰ در دمای محیط [۳۱]

مقدار	خاصیت
$\rho = 7746 (kg/m^3)$	چگالی
$T_m = 1520^\circ C$	دمای ذوب
$\sigma_y = 721 \text{ Mpa}$	تنش تسلیم
$\sigma_{uts} = 816 \text{ Mpa}$	استحکام نهایی کشش
$E = 207 \text{ Gpa}$	مدول الاستیسیته
$\nu = 0.3$	ضریب پواسون
٪۱۸/۶	درصد ازدیاد طول
$k = 34 (W/m \cdot k)$	ضریب هدایت
$\alpha = 14 \times 10^{-6} (1/k)$	ضریب انبساط حجمی
$c = 502 (J/kg \cdot k)$	گرمای ویژه

۲-۲-۲- تعریف رفتار ماده

همان‌طور که در بخش ۲-۷-۱ ذکر شد، ماده‌ی مورد نظر در این پژوهش فولاد HY۱۰۰ در نظر گرفته شده که خواص ساختاری و حرارتی مربوط به آن مطابق با مدل ساختاری جانسون-کوک و با ضرایب ارائه شده در جدول ۲ در نرم‌افزار وارد شده است.

۲-۲-۳- تعریف شرایط تماس سطوح مشترک

برای تعریف رفتار اصطکاکی میان سطوح مشترک اجزای فرآیند، مدل پنالتی با ضریب اصطکاک ذکر شده در بخش ۲-۱-۱ که برابر با ۰/۳ است، تعریف شده است.

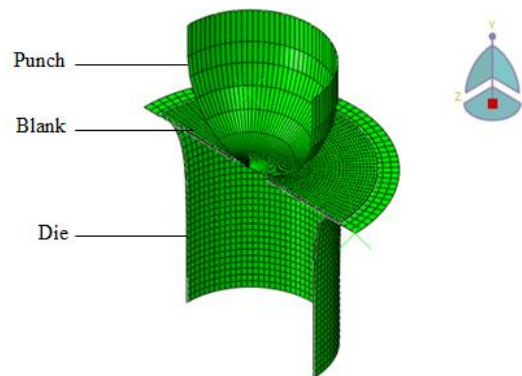
۲-۲-۴- تعریف روش حل و شرایط مرزی

در شکل‌دهی فلزات، تغییر شکل‌های بزرگ می‌تواند منجر به این شود که یک المان، تغییرشکل بسیار زیادی داشته باشد؛ هم‌چنین تماس بین قطعه و قالب شبیه‌سازی را پیچیده‌تر می‌نماید؛ لذا در این پژوهش، روش حل به صورت صریح و از نوع دینامیک انتخاب شده است. درجات آزادی ماتریس با استفاده از شرایط مرزی، قیدگذاری شده و با توجه به تقارن محوری ورق، اجازه جابجایی عمودی به ورق داده شده است. میزان جابه‌جایی لازم به سنبه داده شده و قیود لازم به آن اعمال شده است. دمای ورق با توجه به شرایط ایزوترمال فرآیند، مساوی 1100 K به صورت ثابت در طی فرآیند شکل‌دهی در نظر گرفته شده است؛ هم‌چنین، تابع جابجایی سنبه نسبت به زمان، به صورت هموار^۳ تعریف شده است.

۲-۲-۵- ملاحظات همگرایی تحلیلی

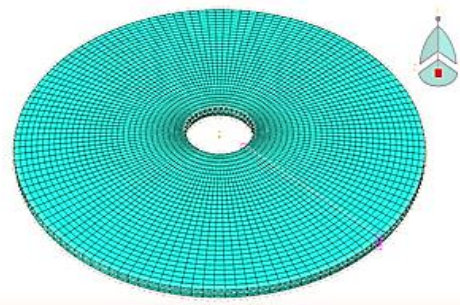
دقت در تحلیل‌ها همراه با سرعت حل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طی تحلیل‌های متعدد و بررسی نتایج حاصل، نکات زیر در خصوص دستیابی به همگرایی پاسخ صحیح استنتاج شده است:

- مدل مسأله‌ی مورد نظر یک مدل متقارن محوری است ولی چین خوردگی در لبه‌های ورق به صورت متقارن رخ نمی‌دهد؛ لذا نمی‌توان مسأله‌ی متقارن محوری یا حتی



شکل ۳- نمایشی از چیدمان اجزای قالب در فرایند کشش عمیق بدون ورق‌گیر

با توجه به مدل در نظر گرفته شده برای سنبه، این قطعه نیاز به مش‌بندی ندارد. در مورد ماتریس با توجه به مدل آن (پوسته صلب گسسته) باید مش‌بندی انجام گیرد که با توجه شکل ظاهری و اندازه، مش‌بندی لازم روی آن اعمال شده است. برای ورق، مش‌بندی از نوع مدل مکعبی هشت گره‌ای ($C3D8R^1$) روی آن اعمال شده است. اندازه‌ی مناسب المان بر اساس همگرایی تحلیلی برای حداکثر تنش فون‌مایز انتخاب شده، به گونه‌ای که ریز شدن المان‌ها بیش از حد نباشد و منجر به زیاد شدن بی‌جهت زمان و حجم محاسبات نگردد. در راستای ضخامت حداقل تعداد المان جهت ایجاد نشدن پدیده قفل برشی^۲، تعداد سه المان است که در راستای ضخامت با ریز کردن مش‌بندی، سه یا چهار المان ایجاد شده است. در شکل ۴ تصویر ورق با مش‌بندی منظم و اندازه‌ی المان ۰/۰۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمایشی از مش‌بندی مدل ورق

² Shear locking

³ Smooth step

¹ An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control

۳- نتایج تحلیل اجزاء محدود

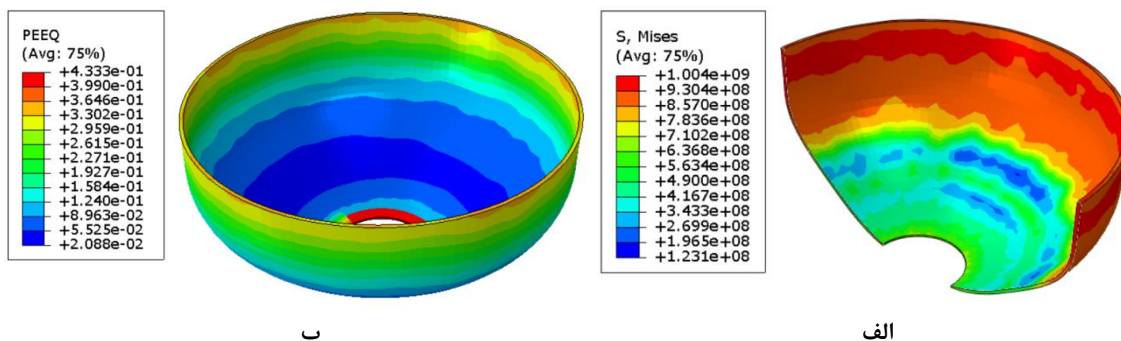
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در شبیه‌سازی‌ها با تغییر پارامترهای ورودی (ضخامت ورق، قطر اولیه ورق و مؤلفه‌های هندسی قالب)، مقدار نیروی مورد نیاز سنبه، چین‌خوردگی ورق و تغییر ضخامت آن بررسی شده است.

۳-۱- شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق داغ با قالب تراتریکس

پس از اعمال ملاحظات و اصلاحات ذکر شده در بخش ۲-۲-۵ برای قالب و فرایند کشش عمیق، شبیه‌سازی سه بُعدی در قالب‌های مختلف و با تغییر پارامترهای مورد بررسی انجام شده است. در این بخش، نتایج حاصل برای نوع قالب تراتریکس ارائه شده است. نمونه‌ای از نتایج توزیع تنش محیطی ورق پس از انجام کامل فرایند شکل‌دهی برای ورق با شعاع ۱/۷ متر و ضخامت دو سانتی‌متر در شکل ۵ قابل مشاهده است.

بخشی از آن را به صورت یک چهارم یا نصف مدل‌سازی کرد.

- مش‌بندی بلنک حتما باید به صورت متقارن و منظم باشد؛ زیرا هرگونه عدم تقارن در مش‌بندی موجب متفاوت شدن سختی در بخش‌های مختلف و بروز چین‌خوردگی غیرواقعی و زود هنگام می‌گردد.
- با توجه به بزرگ بودن هندسه‌ی کره‌ی موردنظر می‌توان به جای تحلیل صفحه‌ی کامل از تحلیل صفحه‌ی سوراخ‌دار استفاده کرد. شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داد، وجود یک سوراخ در حدود ۱۰ درصد قطر بلنک هیچ تأثیری در نیروی فرایند، تنش‌های محیطی و بروز عیوب نداشته و زمان شبیه‌سازی را حدود ۲۰ درصد کاهش می‌دهد.
- تعداد المان در کنار هندسه و نظم ظاهری آن، متغیرهای مؤثر در بحث همگرایی را تشکیل می‌دهند. با بررسی نتایج در حالت‌های مختلف، حداقل اندازه‌ی المان به منظور همگرایی در حل برابر ۰/۰۵ به دست آمد.



شکل ۵- نتایج توزیع تنش و کرنش کلاهی نیم کره‌ی شکل‌دهی شده در قالب تراتریکس، (الف) توزیع تنش بر حسب پاسکال و (ب) توزیع کرنش پلاستیک

۶-الف و شکل ۶-ب آورده شده است. در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، در هر سه قالب با افزایش شعاع ورق، نیروی مورد نیاز سنبه زیاد شده است. در شعاع‌های کمتر، قالب با ثابت ۰/۵ متر کم‌ترین مقدار نیروی سنبه را دارد، در حالی که در قالب با ثابت ۰/۳ متر بیشترین مقدار خود را دارد. در شکل ۶-ب با افزایش ضخامت، بیشینه نیروی سنبه افزایش یافته است. شیب نمودار در قالب با ثابت ۰/۳ متر از دو قالب دیگر بیشتر است. دلیل

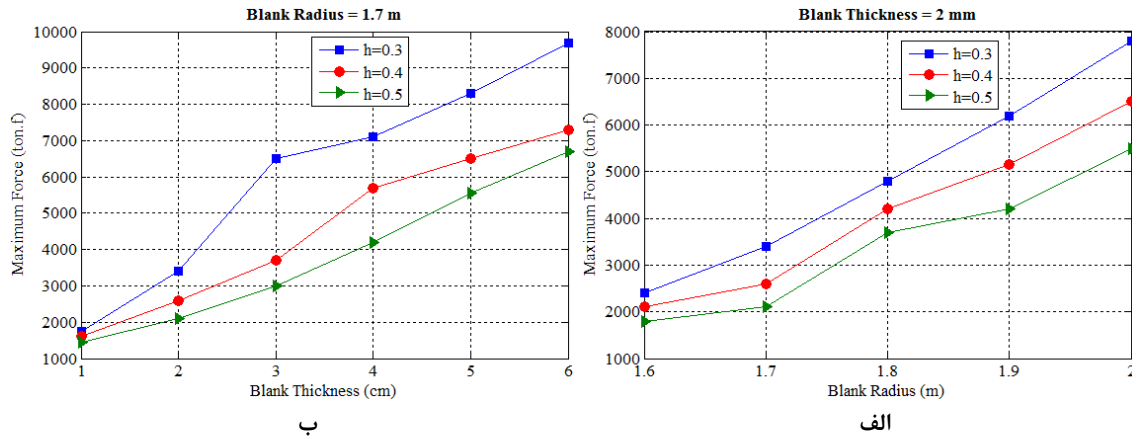
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ناحیه‌ی لبه‌ی کلاهی شکل‌دهی شده، هیچ گونه اثری از چین‌خوردگی ظاهر نشده است.

۳-۱-۱- مقایسه‌ی نتایج بیشینه نیروی سنبه

در این قسمت، نتایج مربوط به اندازه‌ی بیشینه نیروی سنبه برای سه قالب تراتریکس با ثابت‌های ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ در دو حالت ضخامت ورق ثابت و شعاع ورق ثابت، به ترتیب در شکل

در این قالب بیشتر است و با افزایش ضخامت، نیروی فرم‌دهی با روند سریع‌تری افزایش یافته است.

اصلی این موضوع، بیشتر بودن شیب بدنه‌ی ماتریس در این قالب نسبت به دو قالب دیگر است؛ در نتیجه، سرعت فرم‌دهی

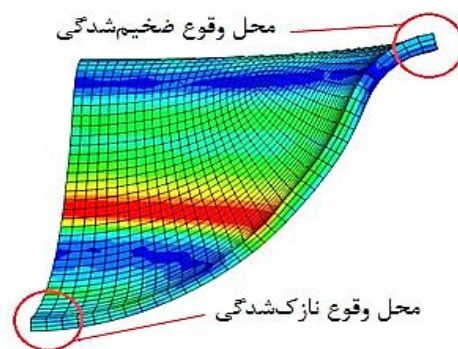


شکل ۶- نتایج پیشینه نیروی سنبه در قالب‌های تراژیکس، (الف) ضخامت ورق ثابت و (ب) شعاع ورق ثابت

ورق ثابت و شعاع ورق ثابت، به ترتیب در شکل ۸-الف و شکل ۸-ب آورده شده است؛ همچنین، نتایج ضخیم‌شدگی ورق به ترتیب در شکل ۹-الف و شکل ۹-ب ارائه شده است. در شکل ۸-الف با افزایش شعاع ورق مقدار نازک‌شدگی ورق افزایش یافته و شیب هر سه نمودار مثبت است. در نمودار شکل ۸-ب مشابه با حالت قبل، با افزایش ضخامت ورق مقدار نازک‌شدگی ورق افزایش یافته است و در تمامی ضخامت‌ها بیشترین نازک‌شدگی ورق در قالب با ثابت ۰/۳ متر مشاهده شده است. با توجه به شکل ۹-الف در قالب با ثابت ۰/۵ متر شیب نمودار مثبت و یکنواخت است، در حالی که برای قالب‌های با ثابت ۰/۳ متر و ۰/۴ متر شیب نمودار در میانه‌ی راه تغییر علامت داده است. در قالب با ثابت ۰/۵ متر و در شعاع ۱/۶ کمترین افزایش ضخامت مشاهده می‌شود. در شکل ۹-ب با افزایش ضخامت ورق در نمودارها، میزان ضخیم‌شدگی ورق در طی فرایند کشش در هر سه قالب افزایش یافته است. شیب نمودار برای هر سه قالب مثبت است، ولی با یکدیگر تفاوت دارد. افزایش ضخامت در قالب با ثابت ۰/۵ متر کم‌ترین و در قالب با ثابت ۰/۳ متر بیشترین مقدار را دارد.

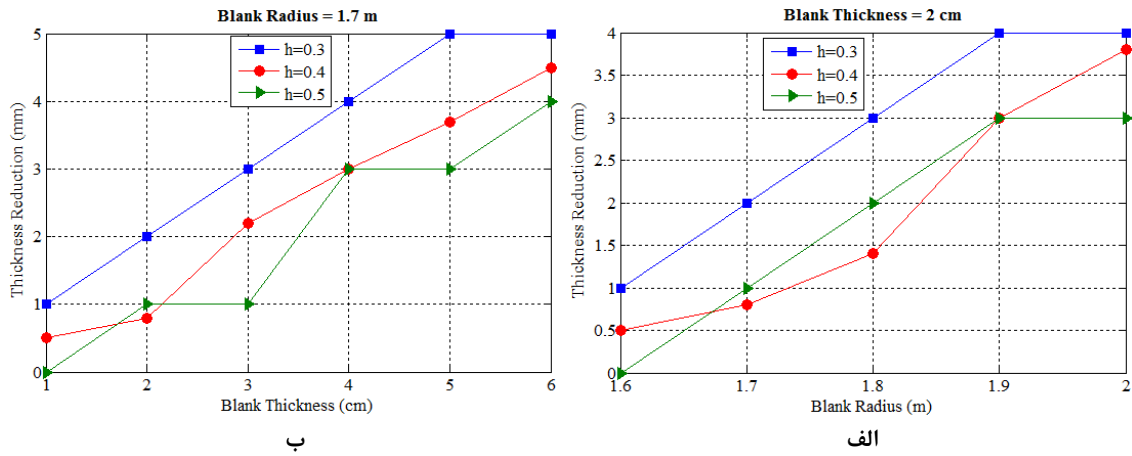
۳-۱-۲- مقایسه‌ی نتایج میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی ورق

از جمله نتایج مورد بررسی در تحلیل‌ها، تغییر ضخامت ورق در اثر انجام فرایند است که در آن می‌توان میزان نازک‌شدگی ورق را در قسمت مرکزی ورق و همچنین ضخیم‌شدگی آن را در قسمت بیرونی ورق مشاهده کرد (شکل ۷).

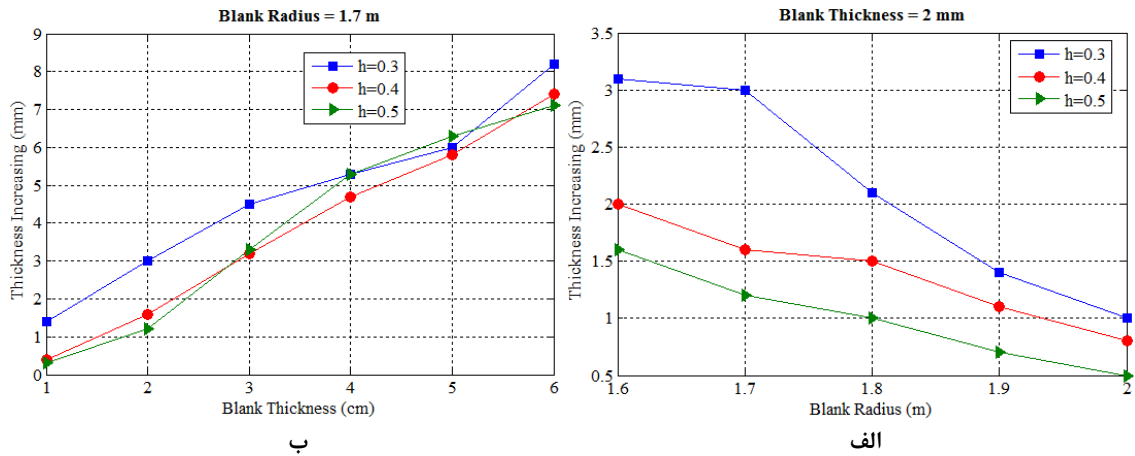


شکل ۷- نمایی از ضخیم‌شدگی و نازک‌شدگی ورق پس از انجام فرایند شکل‌دهی

نتایج مربوط به میزان نازک‌شدگی ورق برای سه قالب تراژیکس با ثابت‌های ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ در دو حالت ضخامت



شکل ۸- میزان نازک شدگی ورق در قالب‌های تراتریکس، (الف) ضخامت ورق ثابت و (ب) شعاع ورق ثابت

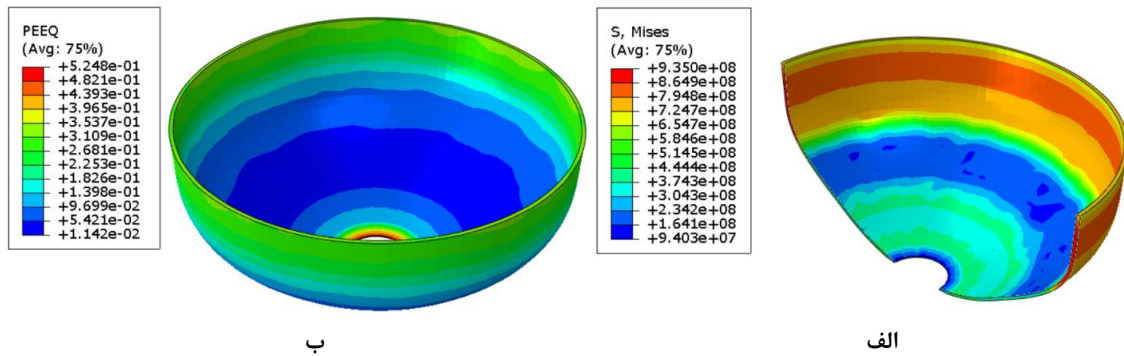


شکل ۹- میزان ضخیم شدگی ورق در قالب‌های تراتریکس، (الف) ضخامت ورق ثابت و (ب) شعاع ورق ثابت

محیطی ورق پس از انجام کامل فرایند شکل‌دهی برای قالب با زاویه‌ی سه درجه، ورق با شعاع ۱/۷ متر و ضخامت دو سانتی‌متر در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۳-۲- شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق داغ با قالب تراتریکس تقریبی

در این بخش، نتایج حاصل برای نوع قالب تراتریکس تقریبی (مخروطی) ارائه شده است. نمونه‌ای از نتایج توزیع تنش



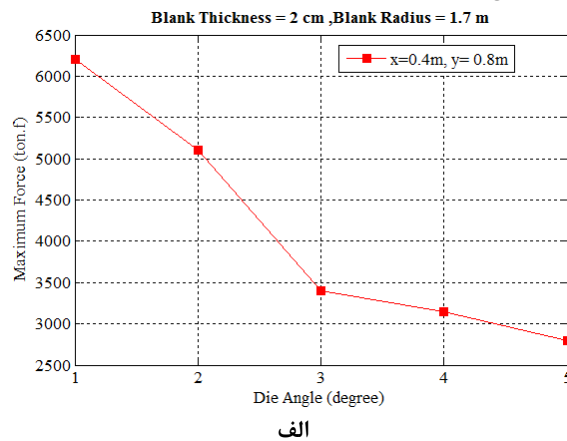
شکل ۱۰- نتایج توزیع تنش و کرنش کلاهک نیم‌کروی شکل‌دهی شده در قالب تراژیکس تقریبی، (الف) توزیع تنش بر حسب پاسکال و (ب) توزیع کرنش پلاستیک

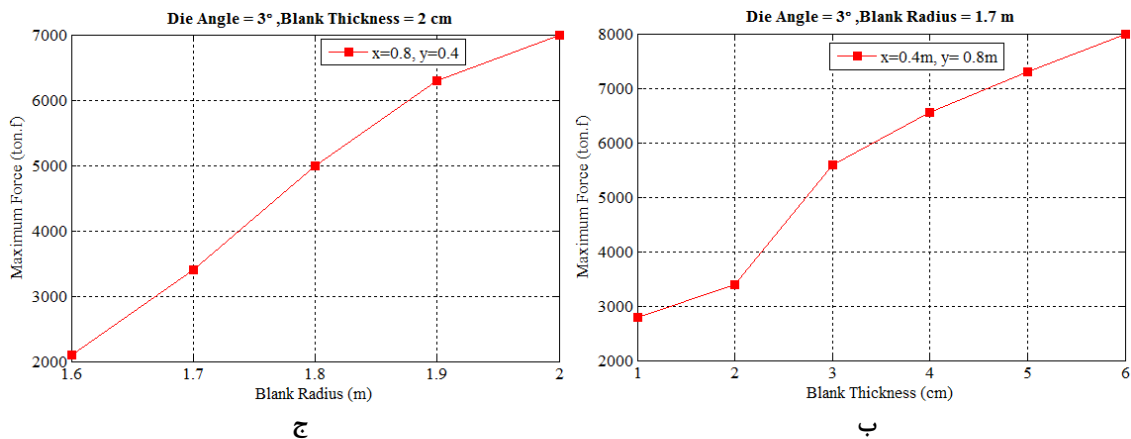
شکل ۱۱-الف، شکل ۱۱-ب و شکل ۱۱-ج آورده شده است. با توجه به شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود با افزایش زاویه‌ی قالب، مقدار بیشینه نیروی سنبه با شیب منفی شروع به کاهش یافتن کرده و در کل نمودار، این روند ادامه دارد. نمودارهای شکل ۱۱-ب و شکل ۱۱-ج به ترتیب نشان می‌دهد با افزایش ضخامت و شعاع ورق، مقدار بیشینه نیروی موردنیاز سنبه افزایش یافته است.

همان‌طور که قابل مشاهده است، در این نوع قالب نیز در ناحیه‌ی لبه‌ی کلاهک شکل‌دهی شده، هیچ گونه اثری از چین‌خوردگی به چشم نمی‌خورد.

۳-۲-۱- مقایسه‌ی نتایج بیشینه نیروی سنبه

در این قسمت، نتایج مربوط به اندازه‌ی بیشینه نیروی موردنیاز سنبه برای قالب تراژیکس تقریبی در سه حالت مختلف با تغییر زاویه‌ی قالب، ضخامت ورق و شعاع ورق به ترتیب در





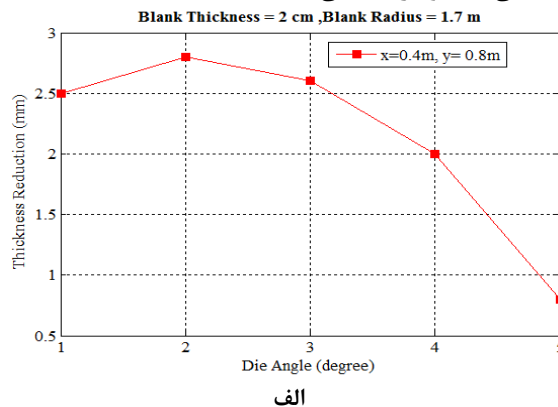
شکل ۱۱- نتایج بیشینه نیروی سنبه در قالب‌های تراتریکس تقریبی، (الف) زاویه‌ی قالب متغیر، (ب) ضخامت ورق متغیر و (ج) شعاع ورق متغیر

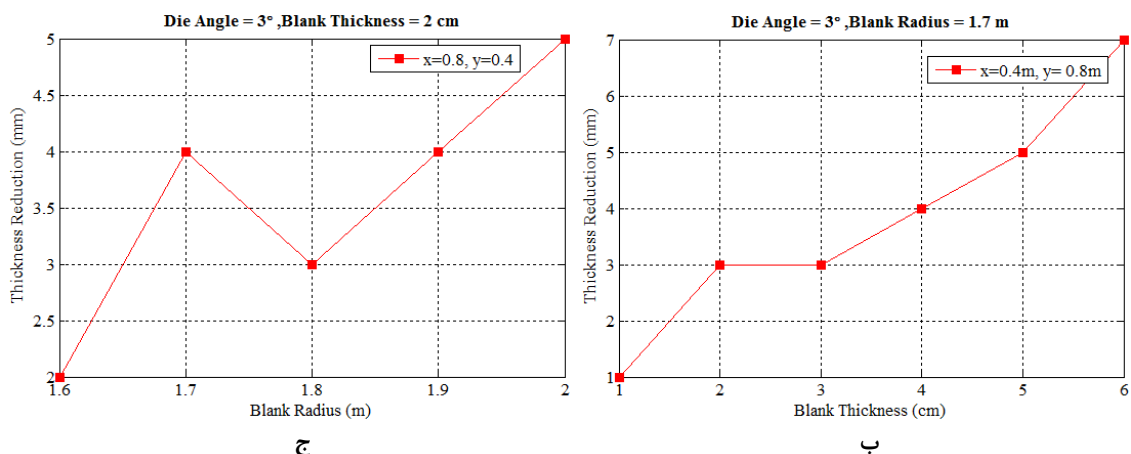
کم می‌شود و سپس دوباره شیب نمودار مثبت شده و مقدار آن افزایش یافته است.

هم‌چنین، نتایج ضخیم‌شدگی ورق به ترتیب در شکل ۱۳- الف، شکل ۱۳- ب و شکل ۱۳- ج ارائه شده است. نمودارهای شکل ۱۳- الف و شکل ۱۳- ب نشان می‌دهد که افزایش مقدار زاویه قالب و ضخامت ورق، منجر به افزایش مقدار ضخیم‌شدگی ورق شده است. در شکل ۱۳- ج مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع ورق مقدار ضخیم‌شدگی متغیر است و در ابتدا با شیب منفی کم شده، ولی در اندازه قطر ۱/۷ متر شیب تغییر علامت داده و مقدار آن افزایش یافته است.

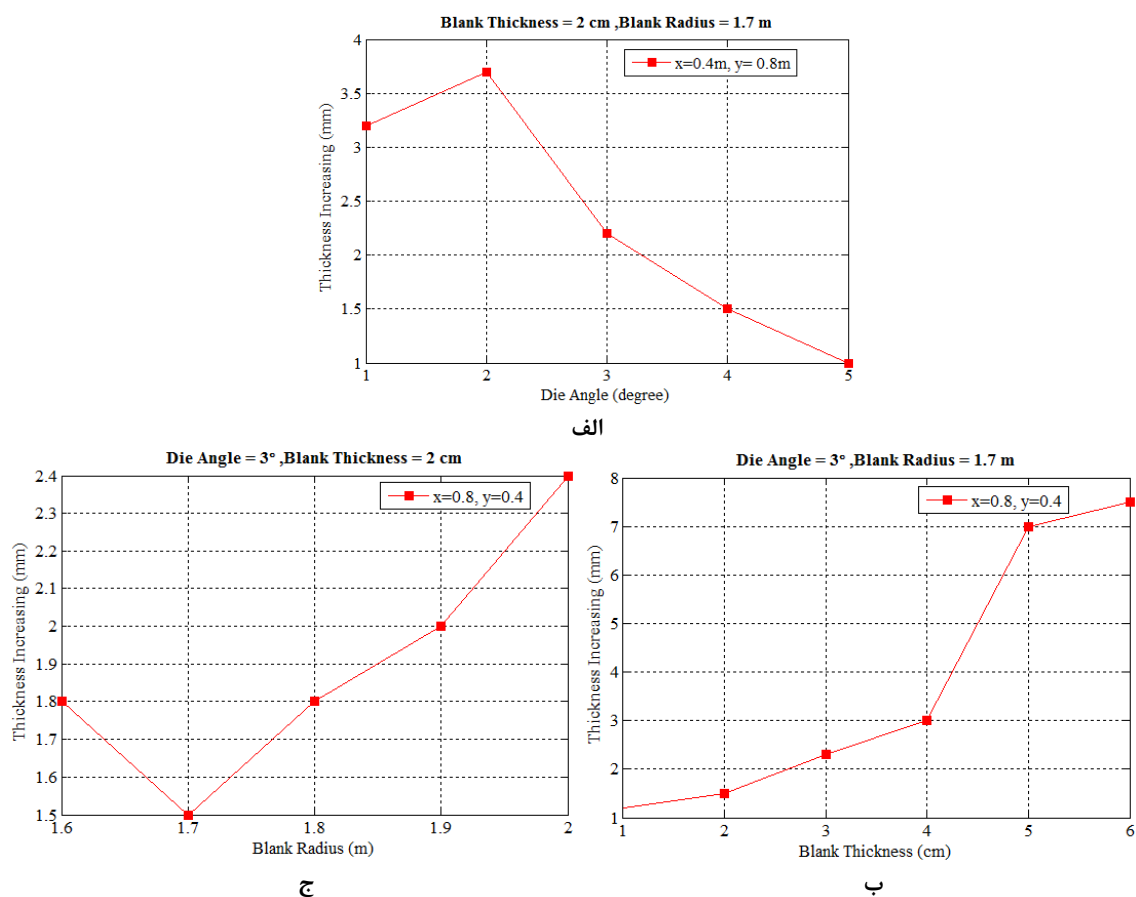
۲-۲-۳- مقایسه‌ی نتایج میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی ورق

نتایج مربوط به میزان نازک‌شدگی ورق برای قالب تراتریکس تقریبی در سه حالت مختلف با تغییر زاویه‌ی قالب، ضخامت ورق و شعاع ورق به ترتیب در شکل ۱۲- الف، شکل ۱۲- ب و شکل ۱۲- ج آورده شده است. در شکل ۱۲- الف با افزایش مقدار زاویه‌ی قالب، میزان نازک‌شدگی افزایش یافته و شیب آن مثبت است، ولی مقدار شیب تغییر کرده است. با توجه به شکل ۱۲- ب افزایش ضخامت ورق منجر به افزایش مقدار نازک‌شدگی ورق شده است. شکل ۱۲- ج نشان می‌دهد، با افزایش شعاع ورق، مقدار نازک‌شدگی ورق روند متغیری دارد و در ابتدا زیاد شده و تا قطر ۱/۷ متر شیب مثبت دارد. از این مقدار به بعد تا قطر ۱/۸ متر شیب منفی شده و نازک‌شدگی





شکل ۱۲- میزان نازک‌شدگی ورق در قالب‌های تراتریکس تقریبی، (الف) زاویه‌ی قالب متغیر، (ب) ضخامت ورق متغیر و (ج) شعاع ورق متغیر



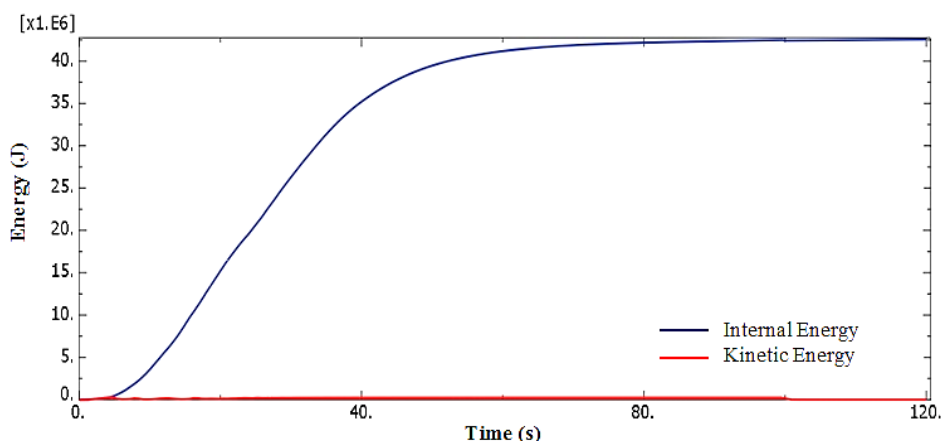
شکل ۱۳- میزان ضخیم‌شدگی ورق در قالب‌های تراتریکس تقریبی، (الف) زاویه‌ی قالب متغیر، (ب) ضخامت ورق متغیر و (ج) شعاع ورق متغیر

۳-۳- نتایج مربوط به چین خوردگی ورق

در مبحث چین خوردگی، برای هیچ یک از قالب‌ها در شعاع‌های پایین‌تر از دو متر چین خوردگی به وجود نیامده است؛ ولی در شعاع‌های بالاتر از دو متر و به عبارت دیگر در تولید نیم‌کره‌های دنباله‌دار، اگر دنباله‌ی نیم‌کره از حدی بالاتر رود، پدیده‌ی چین خوردگی در فرایند مشاهده گردید. این چین خوردگی در تمام قالب‌ها و با شعاع‌های ورق متفاوت مشاهده شده، که بسته به نوع قالب نیز متفاوت است.

۳-۴- بررسی صحت تحلیل اجزاء محدود

برای بررسی صحت تحلیل شبه استاتیک در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit بر اساس اطلاعات موجود در سند^۱ نرم‌افزار بایستی انرژی جنبشی ماده‌ی تغییرشکل‌پذیر در محدوده‌ی ۵ الی ۱۰ درصد از انرژی داخلی آن در حین فرآیند قرار گیرد. نمونه‌ای از نمودار مقایسه‌ی تاریخچه‌ی انرژی جنبشی و انرژی داخلی ماده در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی ماده از محدوده ۵ الی ۱۰ درصد، تجاوز نکرده است. از این رو، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها دارای دقت قابل قبولی است.



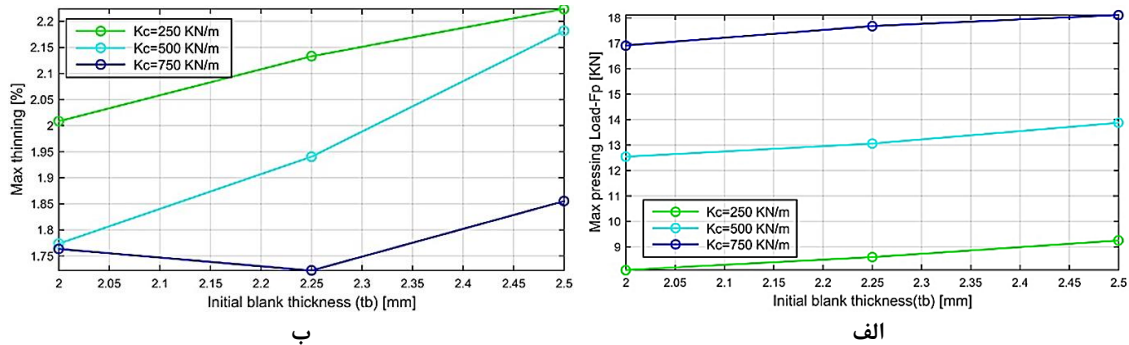
شکل ۱۴- تاریخچه‌ی انرژی جنبشی و انرژی داخلی ماده در حین شبیه‌سازی

۳-۵- صحت‌سنجی نتایج بر اساس نتایج پژوهش‌های مشابه پیشین

از آنجایی که انجام آزمایشگاهی فرایند کشش عمیق در ابعاد و شرایط مربوط به این پژوهش مشکل و پرهزینه است، برای صحت‌سنجی نتایج بایستی از نتایج پژوهش‌های مرتبط پیشین استفاده نمود. با توجه به این که نمونه‌های آزمایشگاهی فرایند کشش عمیق بدون ورق‌گیر در پژوهش‌های قبلی در ابعاد کوچک‌تری بررسی شده‌اند، مقایسه به صورت کیفی انجام شده

است. برای نمونه اخیراً در یک پژوهش، فرایند کشش عمیق بدون ورق‌گیر برای ساخت یک تابه با شبیه‌سازی اجزاء محدود و روش آزمایش عملی ارائه شده است [۳۸]. نتایج مربوط به حداکثر فشار سنبه و همچنین میزان نازک‌شدگی ورق برای ضخامت‌های مختلف ورق اولیه در این پژوهش آورده شده است (شکل ۱۵). با مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش فعلی می‌توان فهمید که روند افزایشی نیروی سنبه و میزان نازک‌شدگی ورق با افزایش ضخامت ورق اولیه در هر دو پژوهش مورد تأیید است.

^۱ ABAQUS Documentation



شکل ۱۵- تأثیر ضخامت ورق اولیه با مقادیر سختی مختلف روی فرایند شکل دهی، (الف) بیشینه نیروی فشاری سنبه و (ب) میزان نازک‌شدگی ورق [۳۸]

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد در هر دو نوع قالب با افزایش ضخامت و شعاع ورق، مقدار بیشینه نیروی موردنیاز سنبه برای شکل‌دهی افزایش می‌یابد.

با افزایش زاویه‌ی قالب مخروطی، مقدار بیشینه نیروی موردنیاز سنبه کاهش می‌یابد و در کل بازه‌ی نمودار، این روند ادامه دارد.

با افزایش شعاع ورق رفتار دو نوع قالب تراتریکس و قالب مخروطی با هم متفاوت است. مقدار نازک‌شدگی ورق در قالب تراتریکس با شیب مثبت افزایش می‌یابد. ولی در قالب مخروطی شیب نمودار دارای مقادیر مثبت و منفی است و تغییر علامت می‌دهد.

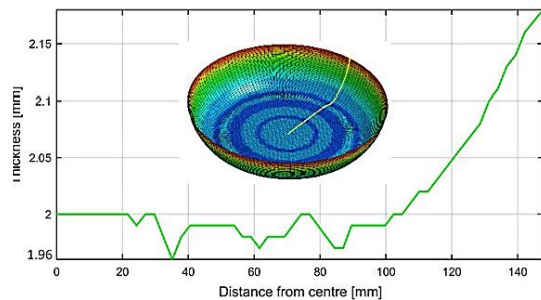
با افزایش ضخامت ورق در هر دو نوع قالب تراتریکس و قالب مخروطی، مقدار نازک‌شدگی ورق افزایش می‌یابد و شیب کلی نمودار در هر دو قالب مثبت است.

با افزایش شعاع ورق در هر دو نوع قالب تراتریکس و قالب مخروطی، مقدار ضخیم‌شدگی ورق متغیر است و بسته به اندازه‌ی شعاع، شیب نمودار دارای مقادیر مثبت و منفی است.

با افزایش ضخامت ورق در هر دو نوع قالب تراتریکس و قالب مخروطی، مقدار ضخیم‌شدگی ورق افزایش می‌یابد. به طور کلی، در قالب تراتریکس به نیروی شکل‌دهی کمتری نیاز است و در عین حال تغییرات ضخامت کم‌تری به همراه دارد.

هم‌چنین، شکل‌دهی نیم‌کره‌های بدون دنباله‌ی استوانه‌ای با شعاع کم‌تر از دو متر در ضخامت‌های بالاتر

هم‌چنین، با توجه به شکل ۱۶ طرح کلی توزیع تنش و روند افزایشی ضخامت ورق از مرکز تا لبه پس از فرایند شکل‌دهی نیز در هر دو پژوهش مطابقت دارد.



شکل ۱۶- توزیع ضخامت در طول مسیر از مرکز تا لبه [۳۸]

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل المان محدود برای شکل‌دهی کلاهک نیم‌کروی از ورق فولادی HY۱۰۰ در فرایند کشش عمیق داغ بدون استفاده از ورق‌گیر ارائه شد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای دو نوع قالب تراتریکس و شبه‌تراتریکس و ورق با ضخامت‌ها و قطرهای متفاوت انجام و نتایج آن با یکدیگر مقایسه گردید؛ هم‌چنین، برای توصیف رفتار ماده از مدل ساختاری تنش سیلان جانسون-کوک استفاده شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مقاله به صورت زیر جمع‌بندی شده است:

استحکام نهایی کشش	σ_{uts}	از یک سانتی متر، سالم و عاری از چین خوردگی خواهد بود.
مدول الاستیسیته	E	
ضریب پواسون	ν	
ضریب هدایت گرما	k	
ضریب انبساط حجمی	α	
گرمای ویژه	c	
ضریب اصطکاک	μ	
تنش برشی	τ	
تنش عمودی	σ_n	
۵- علائم و نمادها		
		توضیح
		نماد
		ثابت قالب تراتریکس
		زاویه‌ی میان خط مماس بر منحنی قالب
		تراتریکس و راستای افق
		قطر ورق اولیه برای تولید قطعه
		قطر نیم کره تولید شده در فرایند
		مساحت ورق اولیه برای تولید قطعه
		مساحت نیم کره تولید شده
		لقی میان سنبه و ماتریس در قالب
		ضخامت ورق اولیه
		قطر سنبه
		قطر ماتریس
		تنش سیلان مؤثر در رابطه‌ی تنش سیلان ماده
		جانسون-کوک
		ثابت تنش تسلیم در رابطه‌ی تنش سیلان ماده
		جانسون-کوک
		ثابت ضریب استحکام در رابطه‌ی تنش سیلان ماده
		جانسون-کوک
		کرنش پلاستیک مؤثر در رابطه‌ی تنش سیلان ماده
		جانسون-کوک
		نرخ کرنش بدون بعد در رابطه‌ی تنش سیلان ماده
		جانسون-کوک
		ثابت (توان کرنش سختی) در رابطه‌ی تنش سیلان
		ماده جانسون-کوک
		دمای معادل در رابطه‌ی تنش سیلان ماده
		جانسون-کوک
		نرخ کرنش در رابطه‌ی نرخ کرنش بدون بعد
		نرخ کرنش مرجع در رابطه‌ی نرخ کرنش بدون بعد
		دمای کنونی ماده در رابطه‌ی دمای معادل
		دمای مرجع (دمای اتاق) در رابطه‌ی دمای معادل
		دمای ذوب ماده در رابطه‌ی دمای معادل
		چگالی
		تنش تسلیم

مراجع

[1] Karima, M. M. N. (1980). A brief study of wrinkling in deep drawing. (PhD), McMaster Hamilton, Ontario, Canada.

[2] Al-Makky, M. M. (1980). The production of hollow-ware by deep-drawing and bluge forming (PhD), Sheffield West Yorkshire, England.

[3] Yu, T., & Stronge, W. (1985). Wrinkling of a circular elastic plate stamped by a spherical punch. *Int J Solid Struct*, 21(10): 995-1003.

[4] Hutchinson, J. W., & Neale, K. W. (1985). Wrinkling of curved thin sheet metal. Paper presented at the Plastic instability.

[5] Breuer, U., Neitzel, M., Ketzner, V., & Reinicke, R. (1996). Deep drawing of fabric reinforced thermoplastics: Wrinkle formation and their reduction. *Polymer Compos*, 17(4): 643-647.

[6] Manish, k. (2002). Drawing of non circular cups through tractrix die. (MS), Indian Institute of technology Dehli, India.

[7] Chu, E., & Xu, Y. (2001). An elastoplastic analysis of flange wrinkling in deep drawing process. *Int J Mech Sci*, 43(6): 1421-1440.

[8] Gharib, H., Wifi, A., Younan, M., & Nassef, A. (2006). An analytical incremental model for the analysis of the cup drawing. *J. Achiev. Mater*, 17(1-2): 245-248.

[9] Manji, J. (1994). *Die Lubricants Forging Spring*, 39-44.

[10] Dhaiban, A. A., Soliman, M.-E. S., & El-Sebaie, M. (2014). Finite element modeling and experimental results of brass elliptic cups using a new deep drawing process through conical dies. *J Mater Process Tech*, 214(4): 828-838.

[11] Narayanasamy, R., & Loganathan, C. (2008). Study on wrinkling limit of interstitial free steel sheets of different thickness when drawn through Conical and Tractrix dies. *Mater Des*, 29(7): 1401-1411.

- metal forming. Proc IME J Mater Des Appl, 232(8): 681-692.
- [25] Saleh, A. H., Ameen, H. A & ,abdel Radh, O. H. (2018). Development of reversed deep drawing without blank holder for producing brass elliptical cup. Int J Eng Tech., 7(2): 578-583.
- [۲۶] سیفی، ر.، و عباسی، ز. (۱۳۹۳). بررسی تجربی و عددی چین خوردگی فلنجی ورق‌ها در کشش عمیق دو فلزی. نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۲۵(۲): ۸۱-۶۵.
- [27] Béres, G., Lukács, Z., & Tisza, M. (2019). Study on the wrinkling behavior of cylindrical deep-drawn cups. AIP conf.
- [28] Weiping, D., Qichao, W., & Xiaoming, W. (2018). Stress analysis of cylindrical parts during deep drawing based on Dynaform. MS&E, 423(1): 012166.
- [29] Ashtiani H. R. R & Arjenki M. G. (2020) Experimental and Numerical Investigation of Warm Deep Drawing Process of AA5052 Aluminum Alloy. IJMF.
- [30] Abdel-Magied, R. K., Elmashad, A. M., Elmetwally, H. T., El-Sheikh, M. N., Abd-Eltwab, A. A., & Saied, E. K. (2020). An Investigation into Deep Drawing Process without Blank Holder. IJAST, 29(3): 2230-2243.
- [31] Schey, J. A. (1984). Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear. Journal of Applied Metalworking, 3(2): 173-173.
- [۳۲] وحدتی، م.، رسولی، م. ع.، و گردویی، م. (۲۰۲۰). تحلیل تئوری و عددی فرایند کشش عمیق داغ کلاهک ضخیم نیمکره‌ای. مکانیک سازه ها و شماره ها، ۱۰(۲): ۵۹-۷۸.
- [33] Lange, K. (1985). Handbook of Metal Forming.
- [34] Liang, R., & Khan, A. S. (1999). A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures. Int J Plast, 15(9): 963-980.
- [35] Holmquist, T. J. (1987). Strength and Fracture Characteristics of HY-80, HY-100 and HY-130 Steels Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures, and Pressures. Defense Technical Information Center.
- [36] Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics.
- [37] Jeswiet, J., Geiger, M., Engel, U., Kleiner, M., Schikorra, M., Dufflou, J., Bruschi, S. (2008). Metal forming progress since 2000. CIRP-JMST, 1(1): 2-17.
- [38] Shaaban, A., & Elakkad, A. S. (2021). Numerical and experimental analysis of single-acting stroke
- [12] Agrawal, A., Reddy, N. V., & Dixit, P. (2007). Determination of optimum process parameters for wrinkle free products in deep drawing process. J Mater Process Tech, 191(1-3), 51-54.
- [۱۳] صدیقی، م.، و راستی، م. (۱۳۸۸). مقایسه تغییرات نیرو و ضخامت در فرایند کشش عمیق ورق‌های ضخیم در قالب‌های تخت، مخروطی و تراکتریکس. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۴۱(۱): ۶۵-۵۹.
- [14] Morovvati, M., Mollaei-Darmani, B., & Asadian-Ardakani, M. (2010). A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing. J Mater Process Tech, 210(13): 1738-1747.
- [15] Saxena, R. K., & Dixit, P. (2010). Prediction of flange wrinkling in deep drawing process using bifurcation criterion. J Manuf Process, 12(1): 19-29.
- [16] Agrawal, A., Reddy, N. V., & Dixit, P. (2011). Determination of Minimum Blankholding Pressure for Producing Wrinkle Free Products in Multistage Deep Drawing. International Manufacturing Science and Engineering Conf.
- [17] Kadkhodayan, M., & Moayyedean, F. (2011). Analytical elastic-plastic study on flange wrinkling in deep drawing process. Scientia Iranica, 18(2): 250-260.
- [18] Prakash, S., & Kumar, D. (2012). Investigation and analysis for the wrinkling behaviour of deep drawn die sheet metal component by using fast form. Proc. Natl. Conf. Trends Adv. Mech. Eng. m.
- [19] Reddy, V., R., Reddy, J. T. A., & Reddy, G. C. M. (2013). Effect of Friction Factor on Wrinkling and Fracture Limits in Deep Drawing of Cylindrical Cup. Int J Eng Res Tech, 6(1): 75-86.
- [20] Dhaiban, A. A., Soliman, M.-E. S., & El-Sebaie, M. G. (2014). A new elliptical cup deep drawing technique for better formability of commercial aluminum. [International conference of The Industry-Academic Collaboration, ICA2014 Cario, Egypt.
- [21] Hassan, M., Hassab-Allah, I., Hezam, L., Mardi, N., & Hamdi, M. (2015). Deep Drawing of Asymmetric Cups through Conical Die without Blank Holder. Proceedings of the World Congress on Engineering.
- [22] Liewald, M., Han, F., & Radonjic, R. (2015). New criterion for prediction of the wrinkle formation in deep drawing process. Key Engineering Materials.
- [23] Saleh, A. H., & Ali, A. K. (2015). Development technique for deep drawing without blank holder to produce circular cup of brass alloy. Int J Eng Tech, 4(1): 187-195.
- [24] Magrinho, J., Silva, C., Silva, M., & Martins, P. A. (2018). Formability limits by wrinkling in sheet

deep drawing of symmetric low-depth products without blank holder. Ain Shams Engineering Journal, 12(3): 2907-2919.