

فرایند کشش عمیق گرم غیرهمدمای مبتنی بر نیروی ورقگیر متناوب: بهبود شکل پذیری آلومینیوم ۵۰۸۳ به کمک تحلیل اجزای محدود

چکیده: افزایش روزافزون کاربرد ورق‌های آلیاژی آلومینیوم در صنعت خوردوسازی، به علت نسبت استحکام به وزن بالا، نیازمند بهبود مشکلات شکل پذیری این فلز است. شکل‌دهی گرم آلیاژهای آلومینیومی راهکاری کاربردی جهت بهبود و ارتقای این چالش است. هدف از این مقاله بررسی فرایند کشش عمیق گرم در شرایط غیر همدمای است که با اعمال نیروی ورقگیر متناوب در حین شکل‌دهی، شرایط سبب تسهیل جریان ورق در حین سر خوردن به درون حفره ماتریس ایجاد می‌گردد. بدین منظور با استفاده از نتایج بهینه از ترکیبی از نتایج تجربی و تحلیل مدل اجزای محدود در دمای محیط، آزمایش‌های کشش عمیق با اعمال گرادیان دمایی برای آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۸۳ با ضخامت ۲ میلی‌متر در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که در فرایند کشش عمیق گرم غیرهمدمای مبتنی بر نیروی ورقگیر متناوب، علاوه بر کاهش نیروی شکل‌دهی، افزایش چشمگیر قابلیت کشش در مقایسه با حالت نیروی ورقگیر ثابت در دمای محیط ایجاد می‌گردد.

واژه‌های راهنما: کشش عمیق، آلیاژ آلومینیوم، نیروی ورقگیر متناوب، گرادیان دما، تحلیل اجزای محدود

ابوذر بریمانی ورنندی
دانشجوی دکتری

عبدالحسین جلالی
آقچای*

استادیار، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه خواجه
نصیرالدین طوسی

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

Abozar Barimani
Varandi
Phd Student

Abdolhossein Jalali
Aghchai
Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, K. N. Toosi
University of Technology,
Iran

Non-isothermal warm deep process based on pulsating blank holder force: improving the formability of AA5083 using FE analysis

Abstract: Increasing the use of aluminum alloy sheets in the automotive industry, due to the high strength-to-weight ratio, requires improving the formability problems of this metal. Warm forming of aluminum alloys is a practical solution to improve and enhance this challenge. The purpose of this paper is to investigate the process of the non-isothermal warm deep drawing process by applying the pulsating blank holder force during forming that facilitates the material flow of the sheet while sliding into the matrix cavity. To this end, using the optimal results from a combination of experimental and numerical results at ambient temperature, deep drawing experiments were performed by applying a temperature gradient to AA5083 sheets with a thickness of 2 mm at 150 °C. The results showed that in the non-isothermal warm deep process based on pulsating blank holder force, in addition to reducing the forming force, a significant increase in deep drawability was achieved compared with the constant blank holder force at ambient temperature.

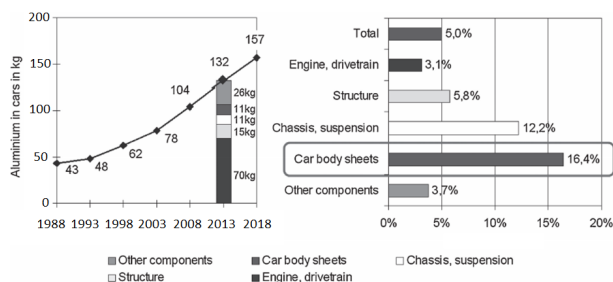
Keywords: Deep drawing, Aluminum alloy, Pulsating blank holder force, Temperature gradient, FE Analysis

۱- مقدمه

خنک‌سازی می‌گردد. بسیاری از تحقیق‌ها گزارش کردند که فرایند کشش عمیق گرم غیرهمدم در مقایسه با حرارت‌دهی یکنواخت کل مجموعه قالب (حالت همدم)، نتایج مطلوب‌تری را در پی داشته است [۶-۹]. پالمبو و تریکاریکو [۷] فرایند کشش عمیق گرم غیرهمدم را برای آلیاژ آلومینیومی ۵۷۵۴ با ضخامت ۸ mm را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که مقادیر سرعت بالا برای سنبه منجر به پارگی زود هنگام ورق می‌شود. در سرعت‌های بالاتر ارتفاع فنجان کمتری در نیروی یکسان شکل خواهد گرفت. وانگ و همکاران [۱۰] مشاهده کردند که قابلیت کشش و شکل‌دهی انبساطی برای آلومینیوم ۷۰۷۵ توانسته با حرارت‌دهی در بازه $220^{\circ}\text{C} - 140^{\circ}\text{C}$ بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کند. بریمانی و حسینی‌پور [۱۱] نیز در تحقیقات اولیه خود کشش عمیق گرم و داغ غیرهمدم را در رنج دمایی محیط تا 55°C بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دمای ورق، منجر به بهبود نسبت کشش حدی^۱ (LDR) می‌شود. آن‌ها توانستند در دمای شکل‌دهی 55°C به نسبت کشش حدی ۲/۸۳ دست یابند. در پژوهشی دیگر، آن‌ها اثر سرعت شکل‌دهی را در دماهای مختلف بصورت عددی بررسی کرده و با نتایج تجربی راستی‌آزمایی کردند [۱۲].

محصول نهایی در فرایند کشش عمیق تحت تأثیر پارامترهای فرایندی گوناگونی است. در این میان نیروی ورقگیر نقش مهمی را در سیلان کافی مواد به درون حفره ماتریس ایفا می‌کند. جریان مواد بیش از حد و ناکافی، به ترتیب پارگی و چروکیدگی را در پی خواهند داشت [۱۳]. اغلب فرایندهای کشش عمیق با اعمال نیروی ورقگیر و یا گپ ثابت گزارش شده‌است. پژوهش‌های اخیر بر روی فرایند کشش عمیق تمرکز زیادی را در توسعه فن‌آوری جدیدی در ورقگیر و اثرات آن بر شکل‌پذیری داشته‌است. در این میان بهره‌گیری از ورقگیر با گپ و یا نیروی متغیر از بیشترین موارد گزارش شده هستند [۱۴-۱۶]. حسن و همکاران [۱۷] فرایند کشش عمیق اصطکاکی با ورقگیر گوه‌ای شکل چهارتکه را بررسی، و بهبود نسبت کشش را گزارش کردند. گاواس [۱۸] توانست با ورقگیر ساچمه‌ای عمق فنجان‌های کشیده‌شده را حدود ۶٪ افزایش دهد. گاواس و همکارش [۱۹] در پژوهشی دیگر تأثیر ورقگیر با گپ متناوب را برای قطعات مربعی آلومینیوم در دمای محیط مورد بررسی قرار دادند. در این سیستم ورقگیر به صورت متناوب بالا و پایین رفته و در هر نوسان یک ضربه بر روی ورق می‌زند. در نتیجه با سهولت در جریان ورق از چروکیدگی جلوگیری می‌کند. آن‌ها در فرکانس ثابت حدود ۲۷ Hz و سرعت کشش ۴۱۷ mm/min، به نسبت کششی ۲/۳۳ دست یافتند. صادقی [۲۰] با اعمال تغییرات کاربردی در سیستم گاواس [۱۹]، آزمایش‌هایی بر روی ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ در محدوده فرکانس ۳۳ - ۱۸ Hz انجام داد. او با اعمال گپ متناوب افزایش ۱۴٪ نسبت کشش را نسبت به روش نیروی ورقگیر ثابت ایجاد کرد. نیروی ورقگیر متناوب با مکانیزم‌های گوناگونی اعمال شده و مزایای زیادی را نیز نسبت به حالت نیروی ثابت به همراه داشته‌است. سیگرت و زیگلر [۲۱] در بررسی تجربی فرایند کشش عمیق با نیروی ورقگیر متناوب، بازه فرکانسی ۱۰۰ - ۱/۵ Hz را اعمال کردند. نیروی ورقگیر تناوبی توسط سروو شیر هیدرولیکی به ورقگیر وارد شد. آن‌ها توانستند با افزایش فرکانس تا مقداری

استفاده گسترده از آلیاژهای آلومینیومی به عنوان پرکاربردترین فلز سازه‌ای غیرآهنی، به منظور کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و افزایش راندمان مصرف سوخت مورد توجه ویژه‌ای در صنعت خودروسازی قرار گرفته‌است. کاهش ۱۰٪ در وزن وسیله نقلیه با جایگزینی مواد سبک وزن منجر به باعث افزایش ۶ تا ۸ درصدی در مصرف سوخت خواهد شد. آلومینیوم از مستعدترین فلزات جهت جایگزینی با فولادها است. قابل ذکر است که آلومینیوم حدود ۴ برابر گران‌تر از فولاد بوده و شکل‌پذیری آن نیز در دمای اتاق کمتر از دوسوم فولادهای کششی است. در سال‌های اخیر کاربرد ورق‌های آلومینیومی در بدنه خودرو افزایش یافته‌است. این روند افزایشی در شکل ۱ برای صنایع خودروسازی اروپایی نشان داده شده‌است [۱]. جایگزینی قطعات آلومینیومی با قطعات فولادی در بدنه خودرو توسط فرایندهای سنتی شکل‌دهی، همراه با چالش‌های زیادی نظیر شکل‌پذیری کمتر، احتمال بیشتر در وقوع عیب‌هایی نظیر چروکیدگی و برگشت‌فتری خواهد بود [۲، ۳].



شکل ۱ میزان کاربرد آلومینیوم در خودروهای اروپایی طی ۳۰ سال گذشته [۱].

ورق‌های آلومینیومی سری ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ بیشترین کاربرد را در میان ورق‌های آلومینیومی صنعت خودرو دارند. آلیاژهای آلومینیوم-منیزیم در سیستم علامت‌گذاری IADS، در سری ۵۰۰۰ قرار می‌گیرند. آلیاژهای این سری قابلیت کرنش-سختی داشته و مشخصه‌هایی مانند استحکام نسبتاً بالا، مقاومت خوردگی عالی حتی در آب شور، قابلیت جوشکاری خوب و چگالی کم را دارا هستند [۴]. آلومینیوم ۵۰۸۳ یکی از آلیاژهای سری ۵۰۰۰ است که امروزه بطور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که آلیاژهای این سری غیرقابل پیرسختی هستند، جهت افزایش استحکام تسلیم اغلب تحت نورد گرم قرار می‌گیرند. در نورد گرم این آلیاژها، افزایش ۴۰٪ استحکام ناشی از ساختار ریزدانه، نسبت به ورق‌های سرد نورد شده، گزارش شده‌است [۵].

یکی از رایج‌ترین روش‌ها جهت افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم در فرایند کشش عمیق، انجام فرایند در شرایط گرم است. انجام فرایند در حالت گرم همدم^۱، به علت تضعیف ورق در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه، افزایش احتمال پارگی در این ناحیه را به همراه دارد. اگر استحکام ورق در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه افزایش یابد، پارگی به تعویق می‌افتد. برای افزایش استحکام در این قسمت، فرایند کشش عمیق گرم در حالت غیرهمدم^۲ انجام شده که در آن اغلب سنبه

¹ isothermal ² gradient ³ Limiting Drawing Ratio

جدول ۲ خواص فیزیکی آلومینیوم ۵۰۸۳.

| چگالی (kg/m^3) | مدول یانگ (GPa) | ضریب پواسون |
|---------------------------|-----------------|-------------|
| ۲۷۰۰ | ۷۰ | ۰/۳۳ |

۲-۲- تجهیزات آزمایش

آزمایش‌ها بر روی یک پرس هیدرولیک ۵۰ تن در سرعت ثابت معادل ۳۷۸ mm/min انجام گرفت. قابل ذکر است که دستگاه پرس مجهز به واحد ثبت تغییرات نیرو-جابجایی و کوره حرارتی الکتریکی است (شکل ۳). جهت اعمال گرادیان دمایی در مرکز ورق، ورقگیر و ماتریس در کوره گرم شده و مرکز ورق نیز توسط سنبه آبگرد خنک‌سازی شد. چند ترموکوپل در تماس با نقاط مختلف ورق قرار گرفته که دمای مورد نظر را توسط نمایشگر گزارش می‌کند. قابل ذکر است که طی حرارت‌دهی مجموعه، سنبه به دور از ماتریس قرار می‌گیرد. پس از رسیدن دمای ورق به مقدار مورد نظر، سنبه ۱۰ ثانیه بصورت مماس بر ورق قرار گرفته و سپس فرایند انجام گرفت. آزمایش‌های کشش عمیق توسط سنبه سر تخت با قطر ۳۶ mm و شعاع گوشه ۸ mm در ماتریسی با حفره داخلی ۴۴ mm و با شعاع گوشه حفره ۸ mm انجام گرفته‌است. جهت ساخت ابزاربندی برای اعمال نیروی ورقگیر متناوب، مکانیزمی با ماهیت مکانیکی طراحی شد. این مجموعه از اجزای مختلفی تشکیل شده که به صورت بسیار دقیق کنار هم مونتاژ شده‌اند. در شکل ۴ مجموعه قالب کشش عمیق به همراه تجهیزات اعمال نیروی ورقگیر متناوب نشان داده شده‌است.



شکل ۳ دستگاه انیورسال سنتام STM-50 مجهز به واحد ثبت تغییرات نیرو و کوره حرارتی الکتریکی.

۲-۳- مراحل انجام آزمایش

جهت تأمین حرکت دورانی میل‌لنگ از یک الکتروموتور سه فاز ۱/۵ hp با دور حداکثر ۳۰۰۰ rpm استفاده شد. طبق شکل ۵، با استفاده از تسمه شیاردار و پولی قرار گرفته بر روی میل‌لنگ (با نسبت قطری معین نسبت به قطر پولی روی محور موتور)، سرعت دورانی و در نتیجه فرکانس مدنظر ایجاد گردید. قابل ذکر است که صحت سرعت‌های دورانی با دورسنج

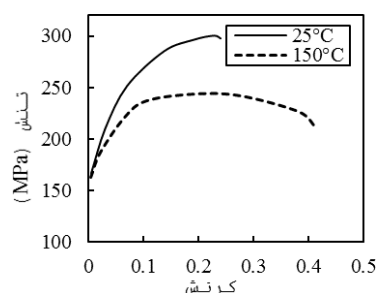
معین، سایش را حذف و نیروی اصطکاکی بین سطوح را کاهش دهند. البته افزایش خطر چروکیدگی نیز بسیار محتمل گزارش شد. مصطفی پور و همکاران [۲۲] اثر نیروی ورقگیر متناوب را در فرایند کشش عمیق، بصورت و تجربی برای قطعات استوانه‌ای از آلومینیوم ۱۰۵۰ بررسی کردند. با اعمال فرکانس و گپ مناسب، نسبت کشش ۸٪ افزایش یافته و توزیع ضخامت نیز بهبود یافت. آن‌ها به کمک نوسان میله متصل به ورقگیر، نیروی تناوبی ورقگیر را با تغییر لحظه‌ای فشرده‌گی فنر ایجاد کردند. از ویژگی‌های مکانیزم مکانیکی آن‌ها نسبت به تجهیزات آلتراسونیک، مزایایی چون سادگی مکانیزم، کنترل و هزینه‌های کمتر در ساخت و نگهداری قید شده‌است. نظامی و همکاران [۲۳] مطالعه تجربی و عددی اثر نیروی ورقگیر متناوب را در فرایند کشش عمیق فنجان مستطیلی از آلومینیوم ۱۰۵۰ انجام دادند. اثر متغیرهای ورودی شامل فرکانس، مقدار نیروی ورقگیر متناوب و سرعت سنبه بر ارتفاع کشش به کمک تکنیک RSM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مؤثرترین پارامتر در ارتفاع کشش، فرکانس تناوب است.

با توجه به پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته، تاکنون بررسی شکل‌پذیری در فرایند کشش عمیق گرم غیرهمدمای تحت نیروی ورقگیر متناوب گزارش نشده‌است. در این مقاله با استفاده از نتایج تجربی و عددی در حالت نیروی ورقگیر ثابت [۳، ۱۱، ۱۲]، مدل اجزای محدود برای آلومینیوم ۵۰۸۳ برای حالت‌های مختلف نیروی ورقگیر متناوب ایجاد می‌گردد. سپس توسط نتایج عددی مقدار و حالت‌های مختلف نیروی متناوب بررسی می‌شود. در نهایت با استفاده از نتایج بهینه، آزمایش‌های تجربی در دمای محیط و همچنین در دمای ۱۵۰ °C جهت مقایسه نسبت کشش حدی بین حالت نیرو ثابت و متناوب انجام می‌گیرد.

۲- روش پژوهش

۲-۱- مواد

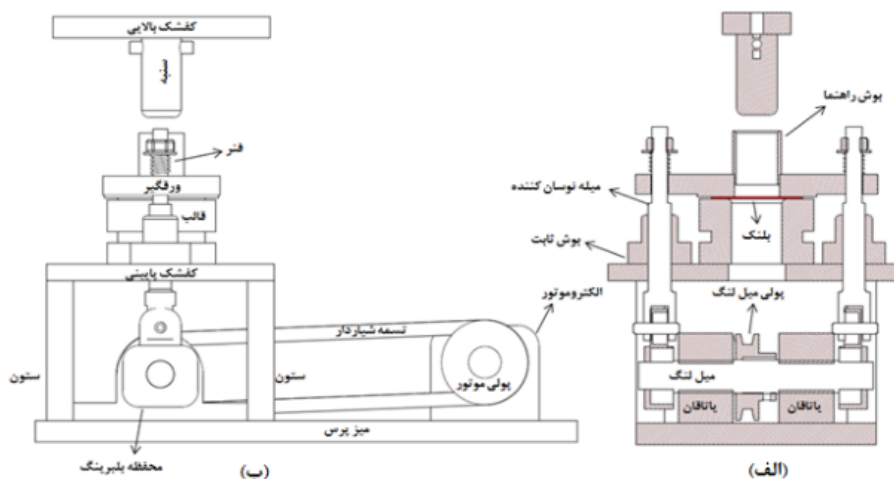
برای انجام تمامی آزمایش‌ها از ورق آلیاژی آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۲ mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی این ورق در جدول ۱ آمده‌است. به منظور تعیین نمودار تنش- کرنش، آزمایش کشش تک محوری طبق استاندارد ASTM-A370 انجام شد. منحنی تنش-کرنش در شکل ۲ و مشخصات فیزیکی ماده در جدول ۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۲ تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمایش کشش تک محوری.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۸۳.

| Ti | Zn | Ni | Cr | Mg | Mn | Cu | Fe | Si |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۱۰ | ۴/۶۰ | ۰/۶۵ | ۰/۰۱ | ۰/۲۰ | ۰/۰۷ |

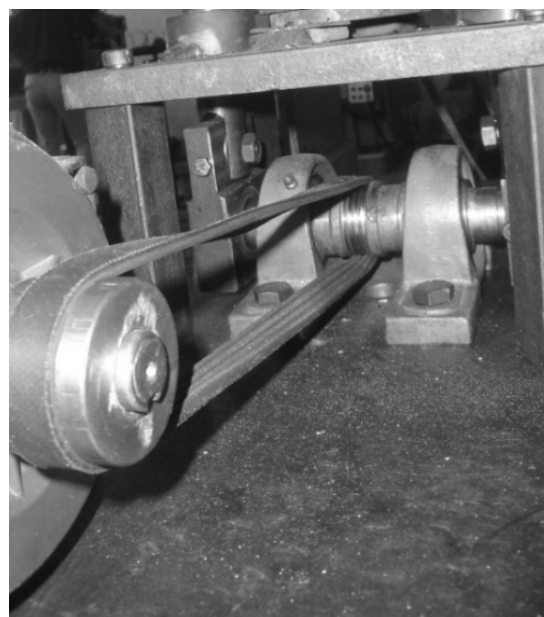


شکل ۴ نمای دوبعدی مجموعه قالب کشش عمیق به همراه ابزاربندی جهت اعمال نیروی ورقگیر متناوب: (الف) نمای برش خورده روبرو، (ب) نمای جانبی.

ورقگیر با دامنه‌ای به اندازه دو برابر خارج از محوری میل‌لنگ نوسان می‌کند. در نتیجه حرکت نوسانی ورقگیر، نیروی وارد شده به صورت تناوبی اعمال می‌شود. با بهره‌گیری از نیروی ورقگیر بدست آمده در حالت نیرو ثابت [۱۱]، در حالت نیروی متناوب نیز از همان مقدار (1750 kN) به عنوان نیروی تنظیمی اولیه (F_0) استفاده شد. قابل ذکر است که این نیرو توسط فشردگی دو فنر به میزان $3/5 \text{ mm}$ و با سختی 250 kN/mm تأمین شد. اعمال نیروی اولیه با توجه به موقعیت حرکت میله نوسان‌کننده بسیار حائز اهمیت و تأثیرگذار است. با توجه به خارج از محوری میل‌لنگ که معادل 1 mm است، دامنه حرکت میله نوسان‌کننده 2 mm می‌شود. این اندازه همان فاصله بین نقطه مرگ بالا و پایین است (شکل ۶). با توجه به موقعیت میله نوسان‌کننده، جدول ۳ حالت‌های مختلف برای نیروی ورقگیر متناوب نام‌گذاری شدند. تغییرات نیروی ورقگیر طی هر نوسان (T) برای حالت‌های نیرو متناوب و همچنین حالت نیرو ثابت طبق شکل ۷ نشان داده شده است.

برای نیروی ورقگیر متناوب در حالت اول، فشردگی فنر جهت تنظیم نیروی F_0 در نقطه مرگ پایین اعمال شد. با توجه به حرکت موتور و در نتیجه میل‌لنگ، پس از زدن یک نیم دور در زمانی معادل نصف دوره تناوب، میل‌لنگ به نقطه مرگ بالا می‌رسد. لذا فشردگی فنر 2 mm کاهش یافته و کاهش معادل 1000 kN را در نیروی ورقگیر در پی خواهد داشت. پس از زدن یک نیم دور و برگشت میل‌لنگ به نقطه مرگ پایین، فشردگی فنر و نیروی ورقگیر به مقدار اولیه خود می‌رسد. این تغییرات بطور پیوسته در طول فرایند در زمان تناوب‌های برابر تکرار می‌شود. از طرفی اگر فشردگی نیروی F_0 در نقطه مرگ بالا اعمال شود (حالت دوم)، فشردگی فنر پس از طی نصف زمان تناوب، 2 mm افزایش یافته و 1000 kN افزایش نیرو را در پی خواهد داشت. همچنین اگر نیروی F_0 در وسط تنظیم شود (حالت سوم/چهارم)، به محض رسیدن میله نوسان‌کننده به نقطه مرگ پایین، فشردگی به مقدار 1 mm افزایش (500 kN افزایش نیرو)، و با رسیدن به نقطه مرگ بالا 1 mm کاهش می‌یابد. این افزایش و کاهش معادل 1 mm ، به ترتیب افزایش و کاهش معادل 500 kN را در نیروی ورقگیر در پی خواهد داشت.

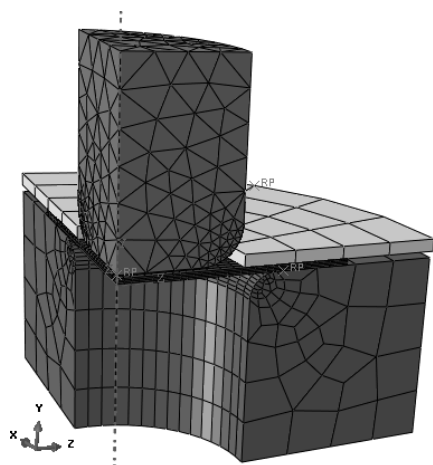
دیجیتالی راستی‌آزمایی شد. با روشن کردن موتور حرکت دورانی توسط تسمه، از محور موتور به میل‌لنگی با خارج محوری 1 mm منتقل می‌شود. این حرکت توسط دو عدد محفظه بلبرینگ در دو طرف میل‌لنگ، به حرکت خطی میله نوسان‌کننده تبدیل می‌گردد. محفظه مذکور حاوی یک بلبرینگ برای سوار شدن روی میل‌لنگ است.



شکل ۵ اجزای انتقال سرعت دورانی به میل‌لنگ جهت اعمال نیروی ورقگیر متناوب.

با توجه به انتهای رزوه‌شده میله نوسان‌کننده، توسط مهره‌ای می‌توان فشردگی لازم فنر جهت اعمال نیروی اولیه ورقگیر را ایجاد کرد. دو عدد از این میله در مجموعه استفاده می‌شود که حرکت دورانی میل‌لنگ را در دو طرف ورقگیر، به حرکت نوسانی ورقگیر تبدیل می‌کنند. با توجه به استفاده از پوش راهنما، این حرکت خطی تنها در جهت عمودی ایجاد شده و در نهایت منجر به نوسان میله و اعمال نیروی ورقگیر در جهت عمود بر سطح ورق می‌شود. لذا هیچ حرکت و نیروی عرضی را به ورق وارد نخواهد کرد. با دوران میل‌لنگ و لذا حرکت خطی میله نوسان‌کننده،

اعمال شد [۲۴]. ورق آلومینیومی ۵۰۸۳ نیز همسانگرد فرض شده است.



شکل ۸. مونتاژ اجزای قالب و ورق در مدل اجزای محدود.

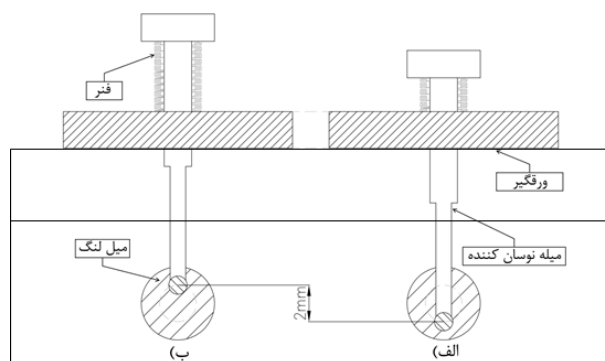
جدول ۴ ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی مواد [۲۴].

| ماده | هدایت حرارتی ($\frac{W}{m \cdot K}$) | چگالی ($\frac{kg}{m^3}$) | مدول یانگ (GPa) | ضریب پواسون | گرمای ویژه ($\frac{J}{kg \cdot K}$) |
|---------------|---|-------------------------------|--------------------|-------------|--|
| فولاد گرم‌گار | ۸۰ | ۷۸۰۰ | ۲۱۰ | ۰٫۳۰ | ۴۹۰ |
| آلومینیوم | ۱۲۰ | ۲۷۰۰ | ۷۰ | ۰٫۳۳ | ۹۰۰ |

در مدل اجزای محدود دمای اولیه ورق برابر با دمای اولیه ماتریس، و دمای سنبه برابر با دمای محیط ($25^\circ C$) فرض شد. از آنجایی که در آزمایش‌های تجربی، ورق به همراه ماتریس و ورق‌گیر تا دمای مورد نظر حرارت می‌بیند، لذا فرض بیان‌شده منطقی است. با توجه به ضرایب حرارتی تعریف‌شده، دمای ورق در حین فرایند طی تبادل حرارتی با سنبه تغییر می‌یابد. جهت تعیین شرایط تماسی بین سطوح نیز، تماس سطح به سطح بر اساس مدل اصطکاکی کلمب لحاظ شد. جهت اعمال نیروی ورق‌گیر، با توجه به دو حالت نیروی ورق‌گیر ثابت و متناوب، می‌توان شرایط آزمایشگاهی را با تعیین دامنه‌های^۱ مختلف در مدل عددی وارد کرد. سرعت کشش نیز برابر با مقدار واقعی (378 mm/min)، به نقطه مرجع نوک سنبه نسبت داده شد. ضرایب اصطکاکی نیز طبق آزمایش‌های اصطکاک کلمب در دمای محیط و دمای $150^\circ C$ ، به ترتیب 0.056 و 0.104 اعمال شدند [۱۲].

یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در روش تحلیل المان محدود اندازه و نوع است. استفاده از المان‌های بزرگ مانع همگرایی مساله شده و دقت مناسب حاصل نمی‌گردد. کاهش اندازه المان‌ها نیز دقت و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. برای المان‌بندی ورق و ابزار از المان ۸ گره نوع C3D8T با درجات آزادی دما و جابجایی، طبق روش انتگرال‌گیری کاهش یافته و کنترل پدیده ساعت‌شنی استفاده شد. نتایج نهایی در تعداد المان ۴ عدد و بیش از آن در راستای ضخامت ورق و با اندازه مش 1 mm و کوچکتر از آن، همگرا شد. با افزایش تعداد المان و ریزتر شدن اندازه مش تنها هزینه محاسبات افزایش می‌یابد که تأثیری بر روی نتایج نهایی فرایند نخواهد داشت. جهت تعیین دقیق معیار پارگی، ضخامت نقطه شکست برای سه نمونه پاره‌شده

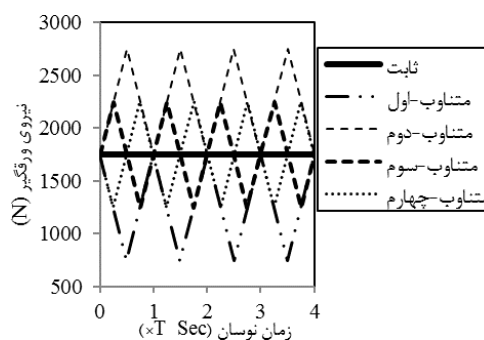
^۱amplitude



شکل ۶. تغییر فشردگی فتر با توجه به حرکت میل نوسان‌کننده در نقطه مرگ: (الف) پایین، (ب) بالا.

جدول ۳ حالات مختلف در روش نیروی ورق‌گیر متناوب

| نام حالت | نحوه اعمال نیروی اولیه ورق‌گیر |
|----------|--|
| اول | اعمال نیروی F_0 در موقعیت نقطه مرگ پایین |
| دوم | اعمال نیروی F_0 در موقعیت نقطه مرگ بالا |
| سوم | اعمال نیروی F_0 ورق‌گیر در موقعیت وسط |



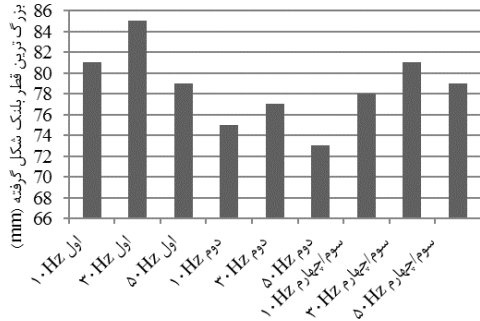
شکل ۷. تغییرات نیروی ورق‌گیر برای حالت‌های مختلف طی ۴ نوسان.

پس از روشن کردن موتور و چرخش میل لنگ و در نتیجه نوسان میل نوسان‌کننده (و لذا نوسان ورق‌گیر)، سنبه با حرکت رم عملیات کشش را انجام داده تا قطعه موردنظر شکل گرفته و از انتهای باز ماتریس خارج گردد. در صورت شکل‌گیری نمونه‌ای سالم، تدریجاً 1 mm به قطر ورق افزوده تا نهایتاً پارگی صورت گیرد. نسبت کشش حادی با توجه به بیشینه قطر سالم شکل گرفته تعیین می‌گردد. جهت روانکاری از ترکیب گریس فشار بالا و گرافیت استفاده شده که قبل از هر آزمایش بر روی ورق، سطوح ماتریس و ورق‌گیر آغشته می‌شود.

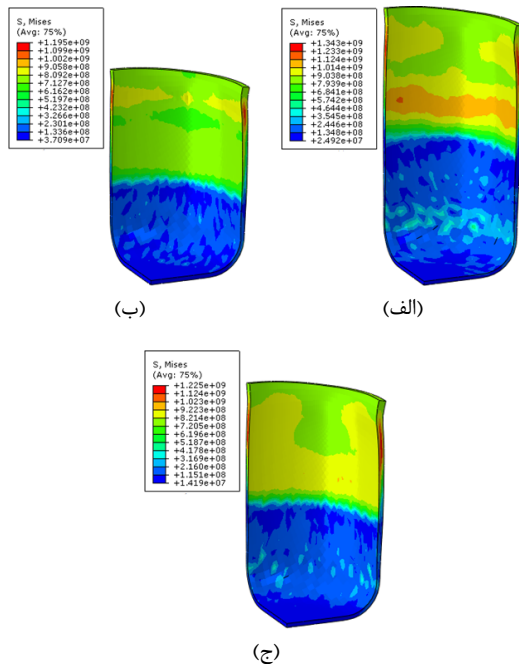
۲-۴- مدل‌سازی اجزای محدود

با استفاده از نتایج تجربی در حالت نیروی ورق‌گیر ثابت [۱۱]، مدل اجزای محدود برای دو حالت نیروی ورق‌گیر ثابت و متناوب توسط نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شد. طبق شکل ۸ به علت تقارن تنها یک چهارم ابزار و ورق مدل شده است. با توجه به وجود دو میدان حرارتی و جابجایی، از تحلیل کوپل حرارتی-مکانیکی و حلگر صریح دینامیکی استفاده گردید. خواص فیزیکی و حرارتی ابزار طبق جدول ۴ وارد شد. رفتار ورق نیز طبق آزمایش کشش اعمال گردید. ضریب انتقال حرارتی بین ورق-ابزار $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$

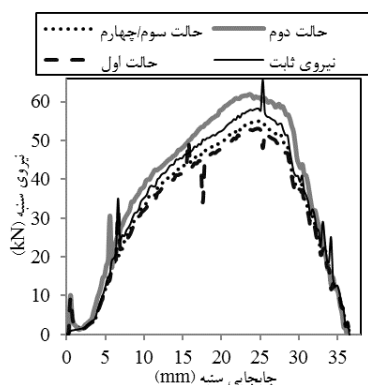
می‌دهد. قابل ذکر است که کرنش‌های معادل بزرگ‌تر، سبب افزایش کارسختی و استحکام‌بخشی قطعه نهایی می‌شوند. برای قطعات بدنه خودرو همچون سقف و درب‌ها، کرنش‌های وارد شده بزرگ‌تر در فرایند پرسکاری می‌تواند لرزش قطعات در سرعت بالای خودرو را کاهش دهد [۲۵].



شکل ۹ نتایج عددی برای بزرگ‌ترین قطر ورق شکل گرفته برای حالت‌های مختلف نیروی ورقگیر متناوب در دمای محیط.



شکل ۱۰ بزرگ‌ترین قطرهای شکل گرفته برای حالت‌های مختلف تحت نیروی ورقگیر متناوب در فرکانس ۳۰ Hz: (الف) حالت اول ۸۵ mm، (ب) حالت دوم ۷۷ mm، (ج) حالت سوم ۸۱ mm.



شکل ۱۱ نتایج عددی تغییرات نیروی سنبه در قطر بلنک ۷۵ mm در دمای محیط.

اندازه‌گیری شد. در دمای محیط و 150°C ، ضخامت نقطه شکست $1/6\text{ mm}$ است. لذا در مدل عددی مقدار نازک‌شدگی بیشتر از ۲۰٪ ضخامت اولیه به عنوان پارگی در نمونه و عدم موفقیت در شکل‌دهی در نظر گرفته شده‌است.

۳- نتایج و بحث

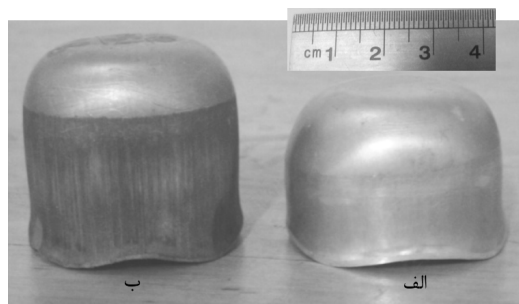
۳-۱- مقایسه عددی بزرگ‌ترین قطر ورق شکل گرفته در دمای محیط

با توجه به نتایج سایر محققان سه مقدار 10° ، 30° و 50° هرترز در مدل عددی لحاظ شد [۲۱-۲۳]. در شکل ۹ نتایج عددی برای بلنک‌های شکل گرفته در دمای محیط گزارش شده‌است. همانطور که ذکر شد، نازک‌شدگی بیشتر از ۲۰٪ ضخامت اولیه به عنوان پارگی و توقف در شبیه‌سازی لحاظ شده‌است.

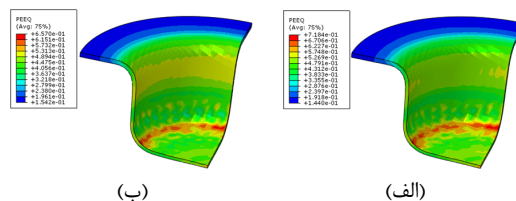
طبق شکل ۹، نیروی ورقگیر حالت اول با فرکانس 30 Hz بالاترین شکل‌پذیری را ایجاد کرد. قابل ذکر است که میانگین قطر ورق‌های شکل گرفته در نیروی ورقگیر حالت اول نیز به ترتیب حدود ۹٪ و ۳٪ از حالت دوم و سوم بیشتر است. در هر سه حالت نیروی متناوب، فرکانس 30 Hz بلنک‌های بزرگ‌تری را شکل داده‌است. در شکل ۱۰ بزرگ‌ترین قطرهای شکل گرفته توسط مدل اجزای محدود برای فرکانس 30 Hz نشان داده شده‌است.

۳-۲- مقایسه عددی نیروی سنبه شکل‌دهی در دمای محیط

در شکل ۱۱ تغییرات نیرو-جابجایی در چهار حالت نیروی ورقگیر متناوب با فرکانس 30 Hz و همچنین در حالت نیروی ورقگیر ثابت نشان داده شده‌است. جهت شکل‌دهی ورق در دمای محیط در حالت‌های اول و سوم/چهارم نیروی سنبه کمتری نسبت به نیروی ورقگیر ثابت مورد نیاز است. در حالیکه در حالت دوم نیروی سنبه افزایش یافته که با توجه به شکل ۷ نیز قابل توجیه است. در حالت دوم در ابتدا و انتهای هر نوسان، نیروی ورقگیر معادل نیروی اولیه اعمالی است. اما در باقی مدت زمان هر نوسان، ورق تحت نیروهای بیشتری نسبت به نیروی اولیه قرار دارد. افزایش نیروی ورقگیر مانعی خواهد بود برای سهولت در جریان ماده، لذا برای ادامه جریان ماده نیروی سنبه بیشتری مورد نیاز است. در حالت سوم و چهارم نیروی بیشینه و کمینه ورقگیر برابر بوده و تنها تفاوت، اختلاف فازی به اندازه نصف زمان یک نوسان است. قابل ذکر است که هر چه نیروی ورقگیر کمتر باشد، نیروی اصطکاک بین سطوح قالب و ورق نیز کمتر خواهد شد. از آنجایی که نیروی اصطکاک در خلاف جهت جریان ماده است، لذا نیروهای اصطکاک کمتر سبب تسهیل جریان ورق به درون حفره ماتریس می‌گردد. سهولت جریان ماده نیروی سنبه کمتری را نیز طلب می‌کند که این امر در نیروی متناوب حالت اول، کمترین نیروی سنبه را در پی داشته‌است. در شکل ۱۲ که مربوط است به جابجایی سنبه در مقداری حدود 25 mm (معادل با نیروی سنبه بیشینه)، مقادیر کمتر کرنش‌های وارد شده در نیروی ورقگیر حالت اول نسبت به نیروی ثابت نشان داده شده که ناشی از نیروی شکل‌دهی کمتر است. برای نیروی ورقگیر متناوب حالت اول، بیشترین کرنش پلاستیک معادل $0/65$ بوده که کاهش بیش از ۹٪ را نسبت به کرنش معادل در حالت نیروی ورقگیر ثابت نشان



شکل ۱۳ نمونه‌های شکل گرفته در نیروی ورقگیر متناوب حالت اول در دمای: (الف) محیط، (ب) 150°C .



شکل ۱۲ کانتور کرنش پلاستیک معادل برای شکل دهی قطر بلنک در دمای محیط تحت نیروی ورقگیر: (الف) ثابت، (ب) متناوب حالت اول.

۳-۳- مقایسه تجربی نسبت کشش حدی در دمای محیط و 150°C

با توجه به نتایج گزارش شده در شکل ۹، می‌توان نسبت‌های کشش حدی را به کمک بیشینه قطر سالم شکل گرفته محاسبه کرد. نسبت‌های کشش حدی عددی در جدول ۵ نشان داده شده‌است.

جدول ۵ نتایج عددی نسبت‌های کشش حدی در حالات مختلف نیروی ورقگیر.

| LDR | نیروی ورقگیر |
|------|------------------|
| ۲/۱۱ | ثابت |
| ۲/۳۶ | متناوب-اول |
| ۲/۱۴ | متناوب-دوم |
| ۲/۲۵ | متناوب-سوم/چهارم |

در حالت نیروی ورقگیر متناوب حالت اول، ورقگیر در اغلب زمان شکل دهی، نیروهای کمتری را (نسبت به حالت نیروی ثابت) به ورق وارد می‌کند. لذا نیروی اصطکاک با شدت کمتری مانع از جریان ماده می‌شود. هرچه جریان ماده به درون ماتریس راحت‌تر صورت گیرد، احتمال پارگی کاهش یافته و امکان دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتری را ممکن می‌سازد. قابل ذکر است که در نیروی ورقگیر کمتر، کرنش سختی کمتری نیز در ورق ایجاد خواهد شد. نتایج عددی در شرایط نیروی متناوب حالت اول، افزایش حدود ۱۲٪ را برای نسبت کشش حدی نسبت به نیروی ورقگیر ثابت پیش‌بینی کرده‌است. نیروهای بیشتر برای ورقگیر مانعی برای جریان راحت ماده هستند که کاهش نسبت کشش حدی را برای حالت دوم، در مقایسه با سایر حالات ایجاد کرده‌است. در حالت متناوب سوم و چهارم، ورقگیر در نیمی از زمان فرایند نیروهای کمتری را نسبت به حالت نیروی ثابت به ورق اعمال می‌کند. لذا اندکی افزایش را برای نسبت کشش حدی نسبت به حالت نیروی ثابت خواهیم داشت.

با توجه به نتایج حاصله از مدل عددی، نیروی ورقگیر متناوب در حالت اول نسبت به سایر حالات کمترین نیروی سنبه و بیشترین نسبت کشش حدی را در پی داشته‌است. لذا جهت بررسی و مقایسه تجربی نسبت کشش حدی، نیروی ورقگیر حالت اول با فرکانس 30 Hz اعمال شده‌است. در جدول ۶ نتایج تجربی نسبت‌های کشش حدی و در شکل ۱۳ نمونه‌های شکل گرفته برای دو دمای محیط و 150°C نشان داده شده‌است.

جدول ۶ نتایج تجربی نسبت‌های کشش حدی در حالات مختلف نیروی ورقگیر.

| 150°C | دمای محیط | نیروی ورقگیر |
|-----------------------|-----------|--------------|
| ۲/۱۴ | ۲/۰۸ | ثابت |
| ۲/۴۴ | ۲/۳۰ | متناوب-اول |

نسبت کشش عددی گزارش شده در دمای محیط با بیشینه خطای حدود ۳٪، نسبت به نتایج تجربی در تطابق خوبی است. از آنجایی که در نیروی ورقگیر متناوب حالت اول، ورق در اغلب زمان شکل دهی تحت نیروهای اصطکاک کمتری نسبت به حالت نیرو ثابت جریان می‌یابد، لذا امکان دستیابی به نسبت کشش بزرگ‌تر به علت سهولت در جریان ماده میسر می‌شود. از طرفی افزایش دمای ناحیه لبه ورق در حالت غیرهمدم، با بهبود شکل پذیری و جریان ماده طبق نتایج‌های پیشین [۱۱، ۱۲]، افزایش نسب کشش را تشدید می‌کند. انجام تجربی فرایند با نیروی ورقگیر متناوب حالت اول در شرایط غیرهمدم (150°C)، افزایشی معادل ۱۷٪ در نسبت کشش حدی را در مقایسه با حالت نیروی ثابت در دمای محیط ایجاد کرده‌است. این میزان بهبود در نسبت کشش در مقایسه با افزایش حدود ۱۱٪ در روش گاواس [۱۶] و افزایش ۱۴٪ در روش صادقی [۲۰]، حاکی از موفقیت نیروی متناوب حالت اول در شرایط غیرهمدم بوده که امکان دستیابی به فنجان‌های عمیق‌تری را نسبت به حالت نیروی ثابت در دمای محیط میسر می‌سازد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به نتایج عددی بهینه، آزمایش‌های تجربی در دمای محیط و همچنین در حالت غیرهمدم در دمای 150°C تحت نیروی ورقگیر متناوب انجام گرفت. نتایج مهم حاصل از این مقاله بصورت زیر خلاصه شده‌است:

۱. میانگین قطر ورق‌های شکل گرفته در نیروی ورقگیر حالت اول به ترتیب حدود ۹٪ و ۳٪ از حالت دوم و سوم بهتر است. همچنین در هر سه حالت برای نیروی ورقگیر متناوب، بلنک‌های بزرگ‌تری در فرکانس 30 Hz شکل داده شده‌است.
۲. برای نیروی ورقگیر متناوب حالت اول، کمترین نیروی سنبه جهت شکل دهی نسبت به سایر حالت‌ها ایجاد شده‌است. برای حالت دوم، بیشینه نیروی سنبه بیش از سایر حالت‌ها است. زیرا ورق به جز در ابتدا و انتهای هر نوسان، تحت نیروهای ورقگیری بیشتری قرار دارد.
۳. طبق نتایج عددی، در نیروی ورقگیر متناوب حالت اول بالاترین نسبت کشش در مقایسه با سایر حالت‌ها ایجاد شده‌است. در انجام تجربی فرایند نیز با نیروی ورقگیر متناوب حالت اول در شرایط غیرهمدم (150°C)، نسبت کشش حدی $2/44$ ایجاد شد که افزایشی معادل ۱۷٪ را در مقایسه با حالت نیروی ثابت در دمای محیط نتیجه داد.

[۱۲] بریمانی ورندی، ابوذر و حسینی پور، سید جمال. مطالعه عددی و تجربی اثر سرعت شکل دهی در فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۸(۲):۵۱-۶۶، ۱۳۹۷.

[13] Atul S, Takalkar and Babu, MC Lenin. A review on effect of thinning, wrinkling and spring-back on deep drawing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(4):1011–1036, 2019.

[14] Qin, Siji. Research on axisymmetrical deep drawing process based on radial double segmental blank-holder technique. *Zhongguo Jixie Gongcheng(China Mechanical Engineering)*, 22(14):1741–1744, 2011.

[15] Tommerup, Søren and Endelt, Benny. Experimental verification of a deep drawing tool system for adaptive blank holder pressure distribution. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11):2529–2540, 2012.

[16] Shi, Yu Qing. Improving the quality in deep drawing of rectangle parts using variable blank holder force. in *Applied Mechanics and Materials*, vol. 37, pp. 521–524. Trans Tech Publ, 2010.

[17] Hassan, MA, Suenaga, R, Takakura, N, and Yamaguchi, K. A novel process on friction aided deep drawing using tapered blank holder divided into four segments. *Journal of Materials Processing Technology*, 159(3):418–425, 2005.

[18] Gavas, M. Increasing the deep drawability of al-1050 aluminum sheet using multi-point blank holder. *Metalurgija*, 45(2):109–113, 2006.

[19] Gavas, M and Izciler, M. Deep drawing with anti-lock braking system (abs). *Mechanism and machine theory*, 41(12):1467–1476, 2006.

[۲۰] ابراهیم، صادقی برزانی. بررسی تجربی سیستم ABS در فرآیند کشش عمیق قطعات استوانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل، ۱۳۹۰.

[21] Siegert, K and Ziegler, M. Pulsating blankholder forces in the deep-draw processes. *CIRP Annals*, 46(1):205–208, 1997.

[22] Mostafapur, Amir, Ahangar, Sattar, and Dadkhah, Reza. Numerical and experimental investigation of pulsating blankholder effect on drawing of cylindrical part of aluminum alloy in deep drawing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8):1113–1121, 2013.

[23] Nezami, Saman, Akbari, Amir, and Ahangar, Sattar. Parametric investigation of pulsating blank holder's effect in deep drawing process of rectangular al 1050 cup. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(10):4081–4090, 2017.

[24] Palumbo, G and Tricarico, L. Numerical and experimental investigations on the warm deep drawing process of circular aluminum alloy specimens. *Journal of materials processing technology*, 184(1-3):115–123, 2007.

[25] Hosford, William F and Caddell, Robert M. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge University Press, 2011.

۴. با توجه به افزایش شکل پذیری در فرآیند کشش عمیق غیرهمدمما تحت نیروی ورقگیر متناوب، امکان کاهش تعداد مراحل شکل دهی و همچنین شکل دهی هندسه‌های پیچیده‌تر، افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Benchmarking, Automotive. Body in white, 1997.
- [2] Bolt, PJ, Lamboo, NAPM, and Rozier, PJCM. Feasibility of warm drawing of aluminium products. *Journal of Materials Processing Technology*, 115(1):118–121, 2001.
- [3] Varandi, Abozar Barimani. The non-isothermal hot deep drawing of aa5083 aluminum alloy. *Mechanics & Industry*, 21(1):112, 2020.
- [4] Toros, Serkan, Ozturk, Fahrettin, and Kacar, Ilyas. Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys. *Journal of materials processing technology*, 207(1-3):1–12, 2008.
- [5] Tanaka, Hiroki, Nagai, Yasunori, Oguri, Yoshifumi, and Yoshida, Hideo. Mechanical properties of 5083 aluminum alloy sheets produced by isothermal rolling. *Materials transactions*, 48(8):2008–2013, 2007.
- [6] Yoshihara, Shouichirou, Yamamoto, H, Manabe, K, and Nishimura, H. Formability enhancement in magnesium alloy deep drawing by local heating and cooling technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 143:612–615, 2003.
- [7] Ambrogio, G, Filice, L, Palumbo, G, and Pinto, S. Prediction of formability extension in deep drawing when superimposing a thermal gradient. *Journal of Materials Processing Technology*, 162:454–460, 2005.
- [8] Palumbo, G, Sorgente, D, Tricarico, L, Zhang, SH, and Zheng, WT. Numerical and experimental investigations on the effect of the heating strategy and the punch speed on the warm deep drawing of magnesium alloy az31. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3):342–346, 2007.
- [9] Schneider, R, Grant, RJ, Schlosser, JM, Rimkus, W, Radlmayr, K, Grabner, F, and Maier, Ch. An investigation of the deep drawing behavior of automotive aluminum alloys at very low temperatures. *Metalurgical and Materials Transactions A*, 51(3):1123–1133, 2020.
- [10] Hui, Wang, Luo, Ying-bing, Friedman, Peter, Chen, Ming-he, and Lin, Gao. Warm forming behavior of high strength aluminum alloy aa7075. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(1):1–7, 2012.
- [11] Barimani Varandi, Abozar and Jamal Hosseinipour, Seyed. Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing. *Modares Mechanical Engineering*, 14(10), 2015.