



مطالعه عددی و تجربی اثر سرعت شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی

ابوذر بریمانی ورنندی^{۱*} و سید جمال حسینی پور^۲^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی^۲ دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹

چکیده

استفاده از آلیاژهای آلومینیم و منیزیم به علت شکل‌پذیری پایین آنها در دمای محیط، در مقایسه با فولادها همراه با محدودیت‌هایی است. ابداع روش‌های نوین جهت افزایش شکل‌پذیری این آلیاژها، همواره در صنعت شکل‌دهی فلزات ورق مورد تحقیق قرار گرفته است. تحقیقات صورت گرفته افزایش چشمگیر شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیم و منیزیم را با افزایش دما نشان داده است؛ در نتیجه ضرورت کاربرد فرآیندهای شکل‌دهی گرم، مطالعه و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند را ایجاب می‌کند. در این مقاله مطالعه عددی و تجربی اثر سرعت شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی قطعات استوانه‌ای برای ورق آلیاژی آلومینیم ۵۰۸۳ با ضخامت ۲mm مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آزمایش‌هایی در سه سرعت ۶۰، ۲۰۰ و ۳۷۸mm/min در دماهای مختلف با نیروی ورقگیر ثابت انجام شده است. تاثیر سرعت شکل‌دهی روی نیروی سنبه، توزیع ضخامت و رفتار گوشواره‌ای و نیز نسبت کشش حدی و گرادایان دما، مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما و کاهش سرعت شکل‌دهی، نیروی سنبه کاهش و نسبت کشش افزایش یافته و همچنین توزیع ضخامت یکنواخت‌تری ایجاد شده است؛ همچنین مشاهده شده که با افزایش دما، تعداد و موقعیت گوشواره‌ها علی‌رغم کاهش دامنه، ثابت مانده است.

کلمات کلیدی: کشش عمیق گرم گرادایانی؛ آلیاژ آلومینیم؛ سرعت شکل‌دهی؛ دمای شکل‌دهی.

Numerical and Experimental Study on the Effect of Forming Speed in Gradient Warm Deep Drawing Process

A. Barimani Varandi^{1*}, S. J. Hosseinipour²¹ Ph.D. Student, Department of Mech. Eng., K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.² Assoc. Prof., Department of Mech Eng., Babol University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

The use of aluminum and magnesium alloys is limited due to their low formability at ambient temperature, in comparison to steels. The invention of new methods for increasing the formability of these alloys has always been investigated in the sheet metal forming industry. Studies have shown a dramatic increase in the formability of aluminum and magnesium alloys by increasing temperature. As a result, the necessity of application of warm forming processes requires the study and investigation of effective parameters on process. In this paper, numerical and experimental study of forming speed have been investigated in gradient warm deep drawing process of cylindrical parts for aluminum alloy 5083 sheet with 2mm thickness. To this end, some tests have been performed at three speeds of 60, 200 and 378mm/min at different temperatures with constant blank holder force. The effects of forming speed on punch force, thickness distribution and earing behavior, as well as limit drawing ratio and temperature gradient have been discussed and analyzed. Results show, by increasing temperature and reducing the punch speed, punch force has been decreased, drawing ratio has been increased and more uniform thickness distribution has been obtained. It has been also observed that by increasing temperature, the number and position of the ears have remained constant despite the reduction of the ears amplitude.

Keywords: Gradient Warm Deep Drawing; Aluminum Alloy; Forming Speed; Forming Temperature.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱۳۳۶۵۲۳۷۳؛ فکس: ۰۲۱۳۳۶۵۲۳۷۳

آدرس پست الکترونیک: Barimani.Abozar@gmail.com

۱- مقدمه

شکل دهی ورق توسط فرآیند کشش عمیق بطور وسیع در صنایع مختلف بویژه صنعت خودروسازی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به تمایل در کاهش مصرف سوخت و حفاظت از محیط زیست، کاهش وزن وسایل نقلیه امری ضروری است. کاربرد مواد سبک وزن شامل، آلیاژهای آلومینیم و منیزیم در بدنه و برخی اجزای خودرو، به علت مشکلات شکل دهی در دمای محیط، چالش‌هایی را به همراه دارد. بسیاری از تحقیقات صورت گرفته برای آلیاژهای آلومینیم به ویژه سری ۵xxx، ۶xxx و ۷xxx و همچنین آلیاژهای منیزیمی AZ۳۱ و AZ۶۱، افزایش چشمگیر شکل پذیری را با افزایش دما در پی داشته است؛ در نتیجه منجر به بهره‌گیری گسترده از فرآیندهای شکل دهی گرم شده است [۱].

پژوهش‌هایی که توسط فرآیند کشش عمیق گرم آلیاژهای آلومینیم و منیزیم با حرارت دهی یکنواخت کل مجموعه قالب بصورت هم‌دما انجام شده، نتایج مطلوبی را نسبت به دمای محیط در پی داشته است. از طرفی در حالت هم‌دما، به علت کاهش تنش سیلان ورق در دمای بالا، احتمال شکست در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه در آغاز شکل دهی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه امکان دستیابی به نسبت‌های کشش بیشتر محدود می‌شود. قابل ذکر است که افزایش استحکام ورق به کمک یک گرادایان دمایی در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه، نسبت کشش بیشتری را در مقایسه با حالت هم‌دما در پی داشته است. در این روش گرادایان دما در مرکز ورق نسبت به ناحیه لبه، بوسیله سنبه خنک‌کار ایجاد شده است [۲-۴]. ناکا و همکاران [۵] قابلیت کشش عمیق ورق آلومینیم ۵۰۸۳ را در دماهای مختلف در حالت گرادایانی بررسی کردند و در دماهای بالاتر به نسبت‌های کشش بزرگتری دست یافتند. مون و همکاران [۶] آزمایش‌های تجربی جهت کنترل دمای ابزار برای افزایش قابلیت کشش عمیق ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ انجام دادند و گزارش کردند که قابلیت کشش، حساسیت زیادی به دمای ماتریس و سنبه دارد. آن‌ها نشان دادند که کنترل دمای ابزار روش بسیار تاثیرگذاری جهت بهبود قابلیت کشش آلومینیم ۱۰۵۰ است. ناکا و همکاران [۷] در پژوهشی دیگر، نمودار-های حد شکل دهی را برای ورق آلومینیوم ۵۰۸۳، توسط

آزمایش‌های شکل دهی انبساطی توسط سنبه گرم در سرعت و دماهای مختلف سنبه تعیین کردند. تاکودا و همکاران [۸] در بررسی شکل پذیری آلیاژ آلومینیم ۵۱۸۲ با ضخامت ۱mm توسط فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی نشان دادند که حدود شکل دهی در دماهای بالا به گسیختگی حول شعاع گوشه حفره ماتریس بستگی داشته طوری که نسبت کشش حدی با افزایش شعاع ماتریس بزرگتر شده است. پالومبو و تریکاریکو [۹] فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی آلیاژ آلومینیومی ۵۷۵۴ با ضخامت ۰/۸mm را با هدف بررسی شکل پذیری به کمک آزمایش‌های تجربی همراه با تحلیل عددی انجام دادند. آن‌ها محدوده دمایی بین ۱۰۰-۲۵۰°C را برای ورقگیر برگزیدند.

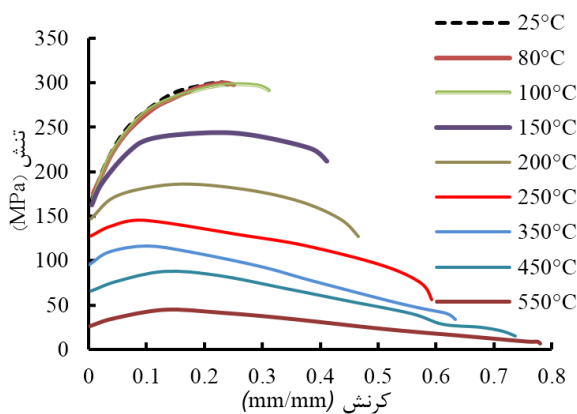
هنگامی که دمای ۲۵۰°C روی ناحیه لبه ورق اعمال شد، دمای مرکز ورق توسط سنبه خنک‌کار به ۱۱۰°C رسید. آنها نشان دادند که مقادیر سرعت بالا برای سنبه منجر به شکست زود هنگام در ورق می‌شود و هر چه سرعت بالاتر باشد، ارتفاع فنجان کمتری تحت نیروی یکسان ایجاد خواهد شد. وانگ و همکاران [۱۰] مشاهده کردند که قابلیت کشش عمیق و شکل دهی انبساطی برای آلومینیم ۷۰۷۵ بطور قابل ملاحظه‌ای با حرارت دهی در محدوده ۱۴۰-۲۲۰°C افزایش پیدا کرده، اما در دمای بیش از ۲۶۰°C قابلیت شکل دهی کاهش یافت. غفاری و همکاران [۱۱] جهت مطالعه شکل پذیری آلیاژ منیزیم AZ۳۱، اثر دما در حالت گرادایانی، اثر گرادایان در ورق و اثر سرعت سنبه بر نیروهای شکل دهی، توزیع کرنش و ضخامت برای قطعات شکل گرفته را بررسی کردند. ژینگرانگ و همکاران [۱۲]، شکل پذیری آلومینیم ۵۰۸۶ را در دما و نرخ کرنش‌های مختلف توسط مجموعه آزمایش مارسینیاک بررسی و گزارش کردند که شکل پذیری با دما افزایش و با سرعت شکل دهی کاهش پیدا کرده است. دو آلیاژ آلومینیم مختلف (۶۰۱۶ و ۶۰۶۱)، توسط گش و همکاران [۱۳] در دمای محیط و ۲۵۰°C کشش عمیق شدند و اثر سرعت سنبه، نسبت کشش، زمان نگه‌داری و اثر بازپخت برای هر دو آلیاژ بررسی و مقایسه شد. بریمانی و حسینی‌پور [۱۴] نیز در تحقیقات خود پارامترهای فرآیندی مختلفی را در فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی برای سرعت شکل دهی ثابت در دماهای مختلف مورد بررسی قرار داده و بهبود نسبت کشش حدی را با افزایش دمای

این مقاله مطالعه تجربی و عددی اثر سرعت شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق گرم گرادپانی قطعات استوانه‌ای برای ورق آلیاژی آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۲mm در محدوده دمایی محیط تا دمای ۵۵۰°C مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور آزمایش‌هایی در سه سرعت مختلف ۶۰، ۲۰۰ و ۳۷۸mm/min در محدوده دمایی مذکور در حالت نیروی ورقگیر ثابت انجام شده و تاثیر سرعت شکل‌دهی روی نیروی سنبه، توزیع ضخامت و رفتار گوشواره‌ای در حالت تجربی و روی نسبت کشش حدی و گرادپان دما در حالت عددی، مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مراحل آزمایشگاهی

برای انجام تمامی آزمایش‌ها از ورق آلیاژی آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۲mm و ترکیب شیمیایی طبق جدول ۱ استفاده شد. آزمایش‌های کشش تک محوری در دماهای مختلف طبق استاندارد ASTM-A۳۷۰، با نرخ کرنش ۰/۰۱ انجام گرفت (شکل ۱). آزمایش‌های کشش عمیق نیز توسط پرس هیدرولیک سرعت متغیر (ظرفیت ۶۰ تن) با قابلیت ثبت تغییرات نیرو بر حسب جابجایی انجام شد.



شکل ۱- نمودار تنش - کرنش مهندسی در دماهای مختلف

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۸۳

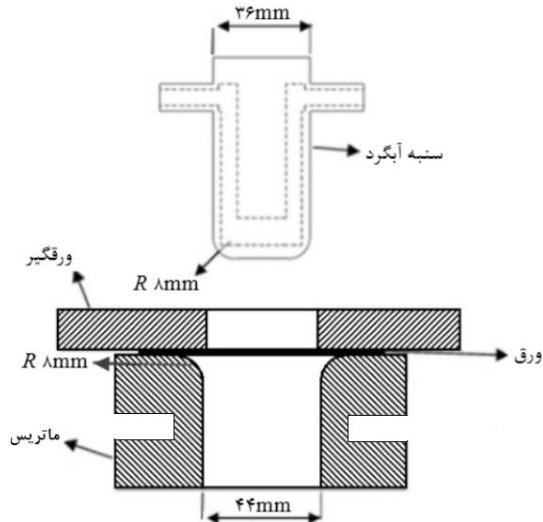
Ti	Zn	Ni	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۰	۴/۶۰	۰/۶۵	۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۰۷

ناحیه لبه ورق گزارش کردند. آن‌ها در دمای شکل‌دهی ۵۵۰°C به نسبت کشش حدی ۲/۸۳ دست یافتند. لارنت و همکاران [۱۵]، قابلیت کشش عمیق گرم آلومینیوم ۵۷۵۴ را بصورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که تغییرات نیرو- جابجایی در حین شکل‌دهی، رفتار گوشواره‌ای و اثر برگشت‌پذیری در دماهای بیش از ۱۵۰°C شدیداً تحت تاثیر قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که جهت اعمال گرادپان حرارتی در مرکز ورق، غالباً ناحیه لبه ورق توسط حرارت‌دهی ماتریس یا ورقگیر گرم شده و ناحیه در تماس با مرکز، بویژه شعاع گوشه سنبه، توسط سنبه آبگرد خنک‌سازی می‌شود [۵، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۶].

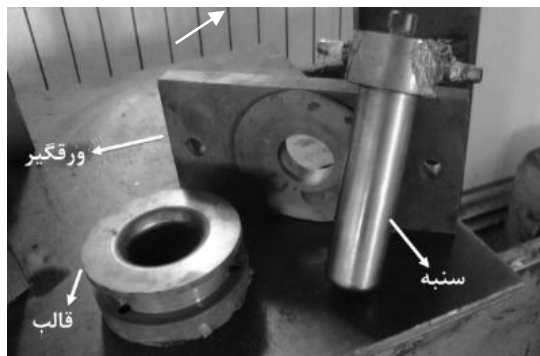
محققان زیادی اثر نرخ کرنش را بر شکل‌پذیری ورق‌های آلومینیومی در دمای محیط بررسی کردند. گردویی و ملائی [۱۸]، اثر نرخ کرنش بر منحنی حد شکل‌دهی را به صورت تئوری، در گستره وسیعی از نرخ کرنش‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد که پس از یک نرخ کرنش بحرانی معین، با افزایش نرخ کرنش، گلوبی موضعی به تعویق افتاده و شکل‌پذیری ورق بهبود می‌یابد. ملائی و همکاران [۱۹]، شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ و فولاد AISI 1045 را در نرخ کرنش‌های مختلف بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، در حالی که بهبود قابل توجهی در شکل‌پذیری برای نرخ کرنش‌های زیاد در ورق آلومینیوم می‌تواند به دست آید، این بهبود برای ورق‌های فولادی قابل توجه نیست. شجاعی و همکاران [۲۰] به بررسی تجربی و عددی اثر سرعت شکل‌دهی بر منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های آلومینیومی ۶۰۶۱، در سرعت‌های مختلف پرداختند. آن‌ها با افزایش سرعت پرس در سرعت‌های بالا، افزایش نمودار حد شکل‌دهی را گزارش کردند.

اغلب پژوهش‌های انجام شده در خصوص آلیاژهای آلومینیوم معطوف به محدوده دمایی کمتر از ۳۵۰°C بوده است؛ درحالی‌که برخی از آلیاژهای آلومینیوم نظیر آلومینیوم ۵۰۸۳ و ۷۰۷۵، در دماهای شکل‌دهی بالاتر از ۰/۴ دمای ذوب مطلق و تحت شرایط خاص با ظهور رفتار ابرمومسانی، افزایش چشمگیری را در قابلیت شکل‌پذیری از خود نشان می‌دهند. آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، کم‌هزینه‌ترین آلیاژ آلومینیومی است که قابلیت بروز این رفتار را دارد [۲۱]. در

روانکاری سطوح در دمای محیط از گریس فشار بالا و در دماهای بالا از پودر گرافیت به عنوان روانکار استفاده گردید.



شکل ۲- ترسیم دو بعدی مجموعه قالب کشش عمیق



شکل ۳- اجزای مجموعه قالب کشش عمیق



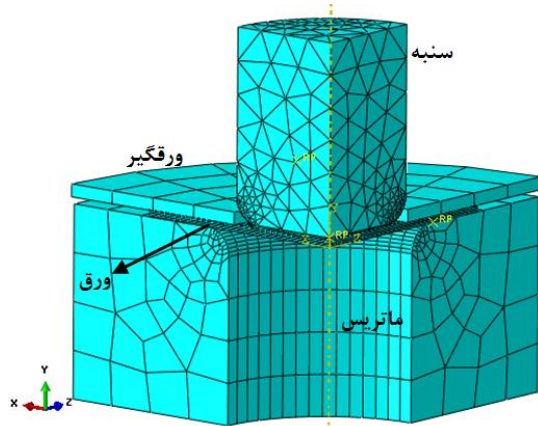
شکل ۴- مونتاژ مجموعه قالب کشش عمیق به همراه تجهیزات دمایی

برای انجام آزمایش‌ها از سنبه سر تخت با قطر ۳۶mm و شعاع گوشه ۸mm و ماتریس با حفره داخلی ۴۴mm با شعاع گوشه حفره ۸mm استفاده شد که در شکل ۲ مجموعه قالب ترسیم شده است. در این فرآیند حدود شکل‌دهی توسط نسبت کشش حدی (LDR) ارزیابی شده است. برای تمامی آزمایش‌ها طبق شکل ۳ از یک مجموعه قالب کشش عمیق شامل سنبه، ورقگیر و ماتریس از جنس فولاد گرم کار (DIN 1.2344) استفاده شد. در حین ساخت اجزای قالب تمامی سطوح به دقت صاف و صیقلی ماشینکاری شده‌اند.

جهت اعمال گرادیان دمایی در مرکز ورق، ناحیه لبه ورق با حرارت‌دهی ماتریس توسط یک هیتر میله‌ای با توان ۱/۵kW گرم می‌شود. مرکز ورق نیز توسط سنبه آبگرد شامل دو کانال ورودی و خروجی خنک‌کاری می‌شود. ترموکوپلی در تماس با کف ورق قرار گرفته و دمای ورق را به کمک کنترلر نشان می‌دهد. پس از رسیدن به دمای تنظیم شده، سنبه برای مدت ۱۰ ثانیه بصورت مماس بر ورق قرار گرفته و سپس فرآیند انجام می‌گیرد. در شکل ۴ مجموعه مونتاژی قالب کشش عمیق به همراه تجهیزات اعمال گرادیان دمایی نشان داده شده است.

با بهره‌گیری از نیروهای اولیه ورقگیر بدست آمده در پژوهش پیشین [۱۴] پس از آماده سازی ورق و روانکاری سطوح تماسی بین ورق با ماتریس و ورقگیر، نیروی ورقگیر اعمال شد. پس از انجام عملیات کشش قطعه از انتهای باز ماتریس خارج می‌شود. نسبت کشش حدی با اندازه‌گیری بیشینه قطر سالم شکل گرفته توسط کولیس دیجیتال (شکل ۵) محاسبه شده است. آزمایش‌ها در سه سرعت مختلف ۶۰، ۲۰۰ و ۳۷۸mm/min در دماهای مختلف انجام گردیده است. هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شده و نتایج گزارش شده میانگینی از تکرارها است. جهت بررسی توزیع ضخامت، قطعات شکل گرفته از مرکز ورق تا ناحیه لبه در مسیری معین در جهت نورد برش داده شده و ناحیه‌های مختلف طبق شکل ۶ نام‌گذاری شدند. ضخامت نقاط مختلف در راستای مشخص شده با شروع از مرکز ورق با نمو ۱mm تا انتهای لبه توسط ضخامت‌سنج سرکروی (شکل ۵) اندازه‌گیری شده است. قابل ذکر است که جهت

است. مقادیر عددی نیروی ورقگیر و سرعت سنبه طبق آزمایش‌های تجربی وارد شدند.



شکل ۷- مونتاژ اجزای قالب و ورق در شبیه‌سازی

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی [۹]

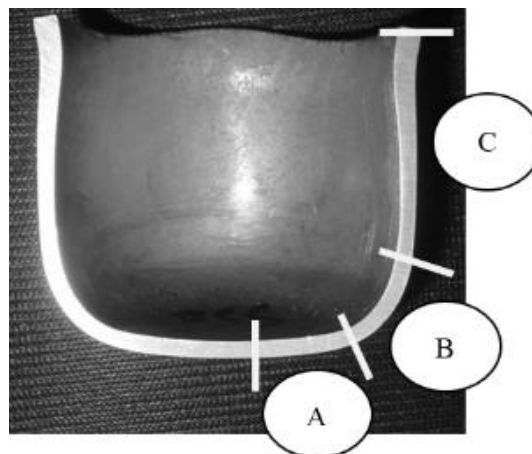
ماده	هدایت حرارتی (W/mK)	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	گرمای ویژه (J/KgK)
فولاد گرم‌کار	۸۰	۷۸۰۰	۲۱۰	۰/۳	۴۹۰
آلومینیوم ۵۰۸۳	۱۲۰	۲۷۰۰	۷۰	۰/۳۳	۹۰۰

از آنجایی که در آزمایش‌های تجربی، ورق به همراه ماتریس و ورقگیر تا دمای مورد نظر حرارت می‌بیند، لذا در مدل اجزای محدود نیز دمای اولیه ورق برابر با دمای اولیه ماتریس و همچنین دمای سنبه برابر با دمای محیط (۲۵°C) فرض شد. قابل ذکر است که دمای ورق در حین فرآیند با توجه به ضرایب حرارتی اعمالی طی تبادل حرارتی با سنبه تغییر می‌یابد؛ همچنین جهت تعیین شرایط تماسی بین سطوح، تماس سطح به سطح طبق مدل اصطکاکی کلمب لحاظ شد.

برای المان بندی ورق و ابزار از المان نوع C3D8T با ۸ گره و درجات آزادی دما و جابجایی، با روش انتگرال‌گیری کاهش یافته و کنترل پدیده ساعت‌شنی استفاده شده است. یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در تحلیل المان محدود، اندازه المان‌ها است. برای بدست آوردن اندازه و تعداد بهینه المان، از آنالیز حساسیت مش بر اساس تغییرات نیروی سنبه



شکل ۵- تجهیزات اندازه‌گیری استفاده شده



شکل ۶- نمونه‌ی شکل یافته‌ی برش خورده در جهت نورد با نواحی نام‌گذاری شده

۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

مدل‌سازی عددی توسط کد اجزای محدود نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. با توجه به تغییر شکل زیاد ماده و وجود دو میدان حرارتی و جابجایی، از تحلیل کوپل حرارتی- مکانیکی و حلگر صریح دینامیکی استفاده شده است. به علت تقارن، تنها یک چهارم ابزار و ورق طبق شکل ۷ مدل شده است. ابزار با خواص حرارتی و مکانیکی الاستیک و ورق با خواص پلاستیک وابسته به دما، با ضخامت برابر با اندازه تجربی (۲mm) طبق داده‌های آزمایش‌های تنش- کرنش ویژگی‌دهی شدند. خواص فیزیکی و حرارتی طبق جدول ۲ وارد شد. ضریب انتقال حرارت بین ابزار و ورق با وابستگی به لقی، $1500 \text{ W/m}^2\text{k}$ اعمال گردید [۹]. قید جسم صلب نیز برای ابزارها (سنبه، ورقگیر و ماتریس) اتخاذ شده تا جابجایی همه گره‌های ابزار توسط جابجایی نقاط مرجع کنترل شود. قابل ذکر است که از خواص ناهمسانگردی آلومینیوم ۵۰۸۳ صرف‌نظر شده، ماده همسانگرد فرض شده

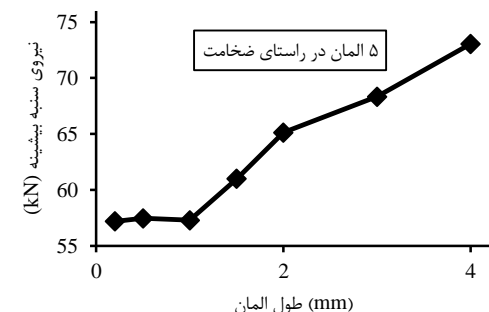
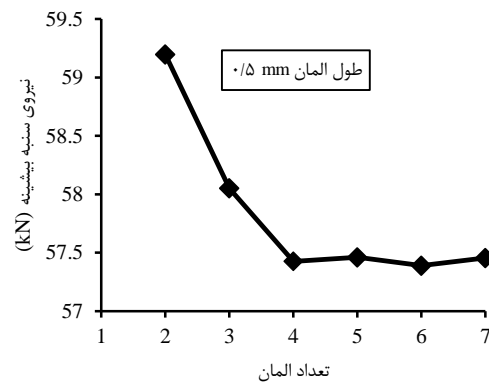
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر اصطکاک

جهت دستیابی به ضرایب اصطکاکی می‌توان از آزمایش‌های تجربی و همچنین مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی سنبه حاصل از نتایج تجربی و عددی استفاده کرد [۹, ۲۲]. در مقایسه نتایج عددی و تجربی منحنی‌های نیرو-جابجایی، تاثیر ضرایب اصطکاکی روی توزیع ضخامت نادیده گرفته می‌شود. در مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی سنبه و توزیع ضخامت در دماهای مختلف، مشاهده شده که در هر ضریب اصطکاک برای ناحیه‌های تماس بین ورق با ورقگیر و ماتریس (fd) که منجر به شکل‌گیری نمونه‌ای سالم شده، مقادیر مختلف ضرایب اصطکاکی در ناحیه تماس بین ورق با سنبه (fp) تاثیر محسوسی بر تغییرات نیروی بیشینه سنبه نداشته که نتایجی مشابه نیز پیشتر گزارش شده است [۹]. در شکل ۹ عدم تاثیر ضریب اصطکاک تماسی بین ورق با سنبه، بر تغییرات نیرو نشان داده شده است. لذا با اعمال ضریب اصطکاک اولیه fp معادل ۰/۱۰، ضرایب اصطکاک مختلف fd در هر دما جهت تطابق منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تجربی و عددی اعمال شده است. پس از یافتن ضرایب اصطکاک fd در دماهای مختلف، از آنجایی که تغییر ضریب اصطکاک در ناحیه تماس ورق با سنبه تاثیر محسوسی بر نیروی بیشینه سنبه ندارد، لذا ضریب اصطکاک مناسب در این (fp) ناحیه طبق شکل ۱۰ از تطابق منحنی‌های توزیع ضخامت حاصل از نتایج تجربی و عددی حاصل شده است. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک در ناحیه تماسی ورق با سنبه، نازک‌شدگی نقطه بحرانی کمتر شده و این نقطه به بالا انتقال یافته که نهایتاً منجر به بهبود توزیع ضخامت می‌شود. هاسفورد [۲۳] نیز گزارش کرده که با زبرکردن سنبه قابلیت کشش بهبود می‌یابد. قابل ذکر است که در ناحیه تماسی بین سنبه و ورق، در هیچ آزمایشی از روانکار استفاده نشده است. با افزایش ضریب اصطکاک در این ناحیه، ضخامت ناحیه A (کف فنجان) افزایش یافته و به ضخامت اولیه ورق نزدیک می‌شود؛ در نتیجه برای حالت اصطکاک چسبان انتظار می‌رود تا نازک‌شدگی در این ناحیه تقریباً حذف گردد. در مدل عددی بهترین تطابق بر اساس پیش‌بینی ضخامت نقاط بحرانی، برای تمامی دماها در ضریب اصطکاک معادل ۰/۲۰

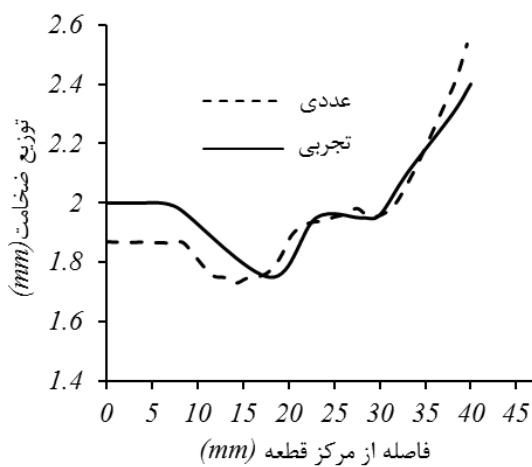
بیشینه استفاده شد. بدین منظور، مدل‌هایی با اندازه المان‌های مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج طبق شکل ۸ نشان داد که در تعداد المان ۴ عدد و بیش از آن در راستای ضخامت ورق، با طول المان ۱mm و کوچکتر از آن، نتایج نهایی همگرا شده است. با افزایش تعداد المان و ریزتر شدن اندازه آن، تنها حجم محاسبات و زمان شبیه‌سازی افزایش می‌یابد که تاثیری بر روی نتایج نهایی فرآیند نخواهد داشت.

در هر دما جهت تعیین دقیق معیار پارگی، ضخامت نقطه شکست برای سه نمونه پاره شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در محدوده دمایی محیط تا دمای 180°C ، ضخامت نقطه شکست $1/6\text{mm}$ و برای محدوده دمایی 250°C تا 550°C نیز $1/2\text{mm}$ است؛ لذا در شبیه‌سازی برای محدوده دمایی محیط تا دمای 180°C ، با توجه به ضخامت اولیه و ضخامت نقطه شکست، مقدار نازک‌شدگی بیشتر از ۲۰٪ ضخامت اولیه و برای محدوده دمایی 250°C تا 550°C مقدار نازک‌شدگی بیشتر از ۴۰٪، به عنوان پارگی در نمونه و عدم موفقیت در شکل‌دهی در نظر گرفته شده است.

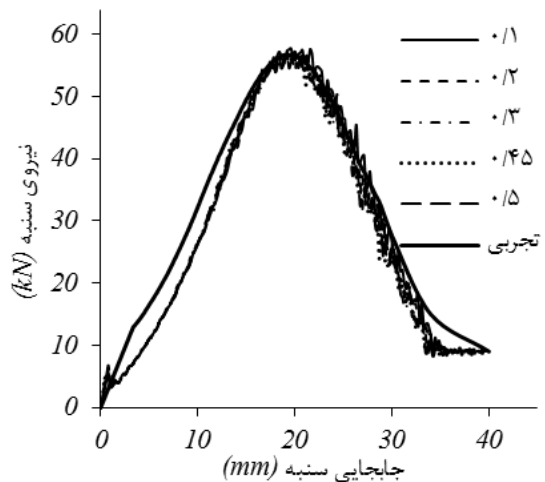


شکل ۸- همگرایی تحلیلی عددی بر اساس اندازه و تعداد المان در سرعت 200mm/min و دمای محیط، با قطر ورق 75mm

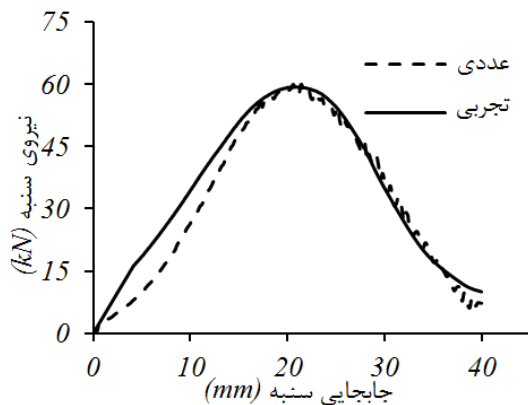
ناچیز است. ماده واقع در ناحیه B که شعاع گوشه پایینی نمونه را شکل می‌دهد، در حین کشش تحت خمش قرار می‌گیرد و کرنش‌های نسبتاً بزرگی را در این ناحیه در پی خواهد داشت. ماده واقع در ناحیه C که از انتهای شعاع گوشه پایینی نمونه آغاز شده، دیواره و لبه را شکل می‌دهد. انتهای لبه در جهت شعاعی به طرف داخل کشیده می‌شود که تاثیر این کاهش شعاع (و محیط)، موجب افزایش ضخامت می‌شود که هاشمی و همکاران نیز، به نتایج مشابهی دست یافتند [۲۴].



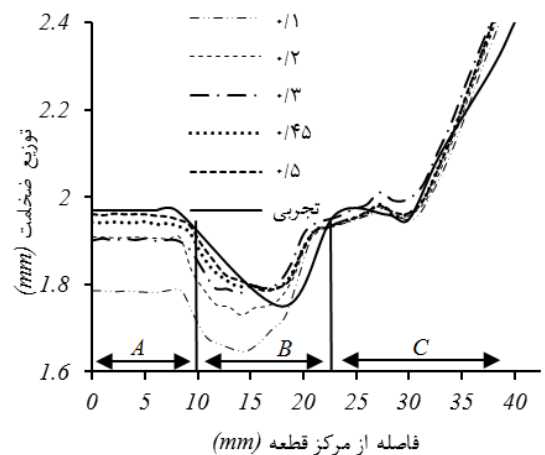
ایجاد شده است. این مقدار در تمامی دماها کمترین انحراف میان نتایج عددی و تجربی را برای تغییرات توزیع ضخامت ایجاد کرده، لذا در سایر آزمایش‌ها این مقدار اعمال شده است.



شکل ۹- مقایسه نیروی سنبه تجربی و عددی در مقادیر f_D مختلف با مقدار f_D ثابت در سرعت 200mm/min و دمای محیط، با قطر ورق 75mm ($f_D=0/0.5$)



شکل ۱۱- مقایسه نتایج تجربی و عددی در مقدار f_D معادل $0/10$ و مقدار f_D معادل $0/20$ ، در سرعت 200mm/min و دمای 150°C با قطر ورق 75mm



شکل ۱۰- مقایسه توزیع ضخامت تجربی و عددی در مقادیر f_D مختلف با مقدار f_D ثابت، در سرعت 200mm/min و دمای محیط با قطر ورق 75mm ($f_D=0/0.5$)

تطابق منحنی‌های نیرو-جابجایی و همچنین توزیع ضخامت در دماهای مختلف طبق ضرایب جدول ۳ صورت گرفت. همانطور که در شکل‌های ۹ و ۱۱ نشان داده شده،

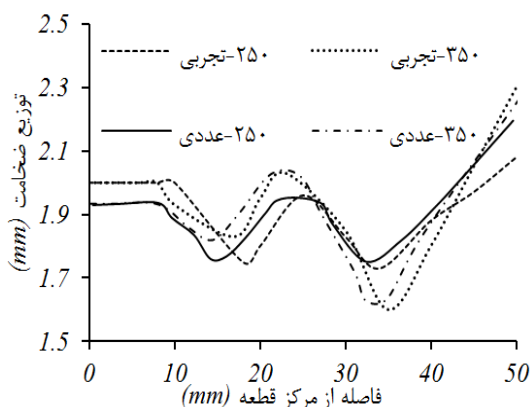
اصطکاک تماسی در ناحیه A، مانع از کشش ورق می‌شود. از طرفی حالت تغییر شکل در ناحیه A، بصورت کشش دو محوره است، لذا کاهش ضخامت در این ناحیه

حالت تجربی و عددی مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که آزمایش‌های عددی با اعمال مقادیر مختلف f_D با نمو ۰/۰۵ انجام شده است.

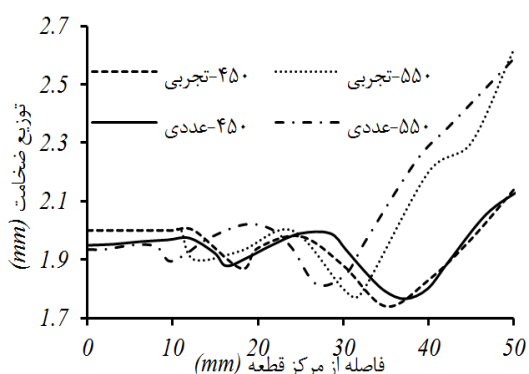
منحنی تغییرات نیروی عددی و تجربی منطبق شده‌اند، لذا در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ فقط مقایسه توزیع ضخامت نشان داده شده است. در شکل ۱۵ نیز نمونه برش خورده در دو

جدول ۳- مقادیر ضریب اصطکاک f_D برای دماهای مختلف

روش	دمای محیط	۸۰°C	۱۵۰°C	۱۸۰°C	۲۵۰°C	۳۵۰°C	۴۵۰°C	۵۵۰°C
عددی	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
تجربی	۰/۰۵۶	۰/۰۴۸	۰/۱۰۴	۰/۱۰۵	۰/۱۱۱	۰/۱۵۶	۰/۱۶۱	۰/۱۶۸

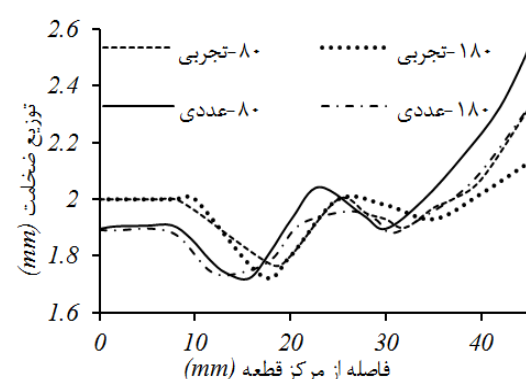


شکل ۱۳- مقایسه نتایج تجربی و عددی در مقدار f_D معادل ۰/۱۰ و مقدار f_P معادل ۰/۲۰، در سرعت ۳۷۸mm/min در دماهای ۲۵۰°C و ۳۵۰°C با قطر ورق ۷۹mm



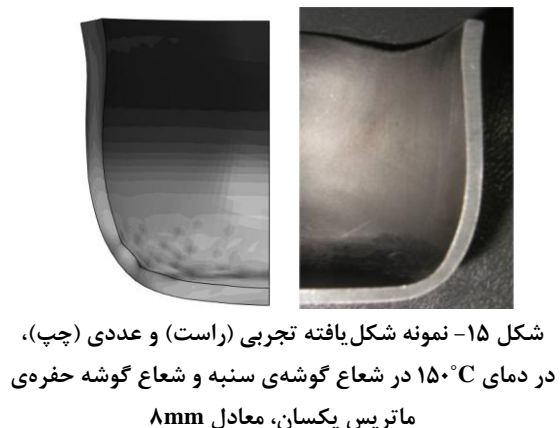
شکل ۱۴- مقایسه نتایج تجربی و عددی در مقدار f_D معادل ۰/۱۰ و مقدار f_P معادل ۰/۲۰، در سرعت ۳۷۸mm/min در دماهای ۴۵۰°C و ۵۵۰°C با قطر ورق ۷۹mm

جهت سنجش دقت روش عددی اعمال شده در تعیین ضرایب اصطکاک برای ناحیه‌های تماسی بین ورق با ورقگیر و ماتریس، و اطمینان از صحت مقادیر تعیین شده، آزمایش‌های تجربی طبق شکل ۱۶ برای دماهای مختلف انجام شده است. برای هر آزمایش، نیروی عمودی توسط رم پرس برابر با نیروی ورقگیر اعمال شد. سپس نیروی افقی لازم برای آغاز حرکت ورق استخراج شد که توسط جک بادی اعمال شد. قابل ذکر است که این آزمایش‌ها در شرایط فرآیندی یکسانی نسبت به آزمایش‌های کشش عمیق انجام شده است. در نهایت به کمک معادله اصطکاک کلمب، ضرایب اصطکاک محاسبه شدند (جدول ۳). مقادیر عددی نسبت به ضرایب تجربی تطابق مناسبی دارند.

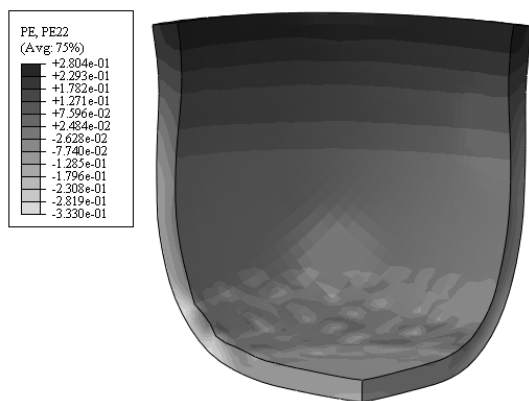


شکل ۱۲- مقایسه نتایج تجربی و عددی در مقدار f_D معادل ۰/۱۰ و مقدار f_P معادل ۰/۲۰، در سرعت ۳۷۸mm/min در دماهای ۸۰°C و ۱۸۰°C با قطر ورق ۷۵mm

شکل ۱۸ نشان داده شده است. مطابق این شکل شرایط هندسی برای ناحیه بالای مرز شکل‌دهی، منجر به شکل‌گیری نمونه‌هایی سالم در دمای 150°C شده است. قابل ذکر است که در شرایط هندسی یکسان برای نتایج تجربی در دمای محیط [۱۴]، فقط یک نمونه سالم در شعاع گوشه سنبه 8mm در ماتریسی با شعاع گوشه حفره 8mm با موفقیت شکل گرفت. لذا شکل‌گیری نمونه‌های سالم بیشتر برای حالت گرادیانی در دمای 150°C نسبت به دمای محیط، حاکی از سهولت جریان ماده در دماهای بالا نسبت به دمای محیط است که برتری حالت گرادیانی را نسبت به کشش عمیق سنتی نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نمونه شکل‌یافته تجربی (راست) و عددی (چپ)، در دمای 150°C در شعاع گوشه‌ی سنبه و شعاع گوشه حفره‌ی ماتریس یکسان، معادل 8mm



شکل ۱۷- توزیع کرنش ضخامتی (PE22) برای نمونه شکل-گرفته توسط شعاع گوشه سنبه و حفره‌ی ماتریس 6mm در سرعت 378mm/min و دمای محیط

پس از مشخص شدن شعاع‌های مناسب جهت شکل‌دهی نمونه‌های سالم، طبق جدول ۴ مشخصات نقاط بحرانی گزارش شده است. آزمایش‌های عددی که در شعاع گوشه حفره ماتریس با مقادیر 4mm تا 8mm با شعاع گوشه سنبه ثابت معادل 8mm انجام گرفت، منجر به شکل‌دهی نمونه‌های سالم شده است. طبق جدول با افزایش شعاع ماتریس، نرخ نازک‌شدگی کاهش یافته است.

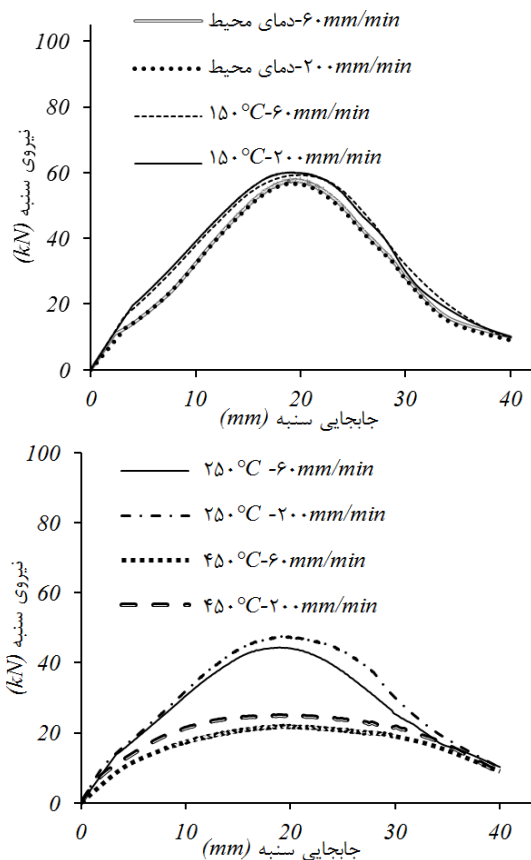
نتایج حاصل نشان می‌دهد که برای شکل‌دهی در دمای 150°C شعاع گوشه حفره ماتریس، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند و با افزایش آن (در شعاع گوشه‌ی سنبه ثابت)، شکل‌دهی با حصول موفقیت بیشتری انجام می‌گیرد. به منظور اعمال شرایط هندسی یکسان جهت یافتن سایر



شکل ۱۶- تجهیزات آزمایش اصطکاک کلمب

۲-۳- تاثیر دمای شکل‌دهی بر هندسه اجزای قالب شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره ماتریس، از عوامل مهم جهت کشش مناسب ورق و شکل‌دهی نمونه‌های سالم می‌باشند. برای تعیین مقادیر مناسب جهت شکل‌دهی نمونه‌های سالم، در پژوهش پیشین [۱۴] آزمایش‌های تجربی در دمای محیط با قطر 75mm با شعاع‌های مختلف صورت گرفت. در تمام مقادیر که در دمای محیط با عدم موفقیت در شکل‌دهی همراه بود، شکست در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه رخ داد. در نتایج عددی طبق شکل ۱۷ نیز، کرنش‌های ضخامتی بیشینه به همین ناحیه اعمال شده که مقدار نازک‌شدگی بیشتر از 20% ضخامت اولیه را نتیجه داده است.

جهت بررسی تاثیر دما روی شعاع‌های ابزار، از نتایج عددی برای شکل‌دهی ورقی با قطر 75mm برای حالت گرادیانی در دمای 150°C استفاده شده که نتایج آن در

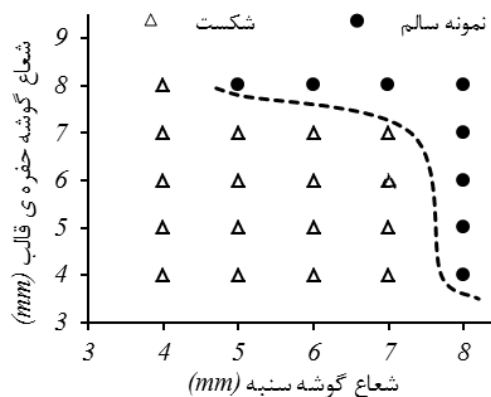


شکل ۱۹- منحنی تجربی نیروی سنبه-جابجایی در دما و سرعت های مختلف

نیروی بیشینه برای تمامی حالت ها در قطر ورق یکسان معادل ۷۵mm در جابجایی سنبه با مقدار حدود ۲۰mm اعمال شده است. پس از تماس اولیه سنبه با ورق، ماده روی شعاع های سنبه و ماتریس جریان می یابد. افزایش کارسختی مقاومت به تغییر شکل را افزایش داده، همچنین خنک کاری مرکز ورق این افزایش را تشدید می کند. از طرفی کاهش محیط ورق در ناحیه لبه نیز، نیروی لازم جهت شکل دهی را افزایش می دهد؛ در نتیجه نیروی لازم به بیشینه مقدار خود می رسد و سپس تا خروج قطعه شکل یافته از انتهای باز حفره ماتریس، به آرامی کاهش می یابد.

طبق شکل ۱۹ در دمای محیط، حساسیت به نرخ کرنش کم است؛ لذا افزایش سرعت شکل دهی تاثیر محسوسی بر نیروی بیشینه سنبه نخواهد داشت. نیروی بیشینه با افزایش دما به ۱۵۰ °C علی رغم کاهش تنش سیلان ورق، نسبت به

پارامترهای مناسب و با توجه به نتایج در دمای محیط [۱۴] و همچنین دمای ۱۵۰°C، سایر آزمایش ها توسط سنبه ای با شعاع گوشه ۸mm در ماتریسی با شعاع گوشه حفره ۸mm که بهترین شرایط شکل دهی را طبق نتایج تجربی و عددی ایجاد کرده، انجام گرفته است.



شکل ۱۸- نتایج عددی شکل دهی در شعاع های مختلف در دمای ۱۵۰°C

جدول ۴- نتایج عددی برای نازک شدگی نقاط بحرانی در شعاع های مختلف گوشه سنبه (Rd) و گوشه حفره ی ماتریس (RD)

نرخ نازک شدگی نقطه بحرانی (%)	Rd-RD (mm)
۱۵	۸-۵
۱۵	۸-۶
۱۴/۵	۸-۷
۱۴	۴-۸
۱۲/۵	۵-۸
۱۲/۵	۶-۸
۱۲	۷-۸
۱۱/۵	۸-۸

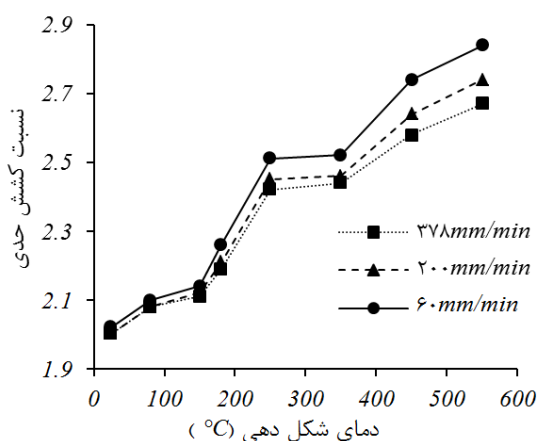
۳-۳- تاثیر سرعت شکل دهی بر نیروی سنبه در دماهای مختلف

تغییرات نیروی سنبه- جابجایی برای نمونه هایی با قطر ورق ۷۵mm در سرعت های ۶۰mm/min و ۲۰۰mm/min در دماهای مختلف در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

افزایش سرعت است) در دمای 250°C ، تقریباً معادل ۷٪ بوده است.

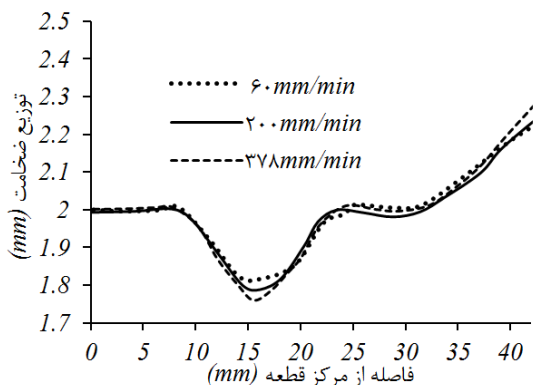
۴-۳- تاثیر سرعت شکل دهی بر نسبت کشش حدی در دماهای مختلف

در شکل ۲۰ نسبت‌های کشش حدی در سرعت‌های مختلف حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داده شده است. در تمام حالت‌ها تغییرات نسبت کشش حدی روندی مشابه با نتایج تجربی برای سرعت 378mm/min [۱۴] نشان داده است. نرخ کرنش‌های حاصل از سرعت‌های مختلف تا دماهای 150°C ، تاثیر محسوسی در نسبت‌های کشش حدی ایجاد نکرده است. با افزایش دما تاثیر نرخ کرنش بر نمای n افزایش یافته که نرخ‌های کمتر، نیروی سنبه کمتری را طلب کرده است؛ در نتیجه، کرنش‌های کمتر ایجاد شده، امکان دستیابی به نسبت کشش‌های بزرگتر را افزایش می‌دهد که در تطابق با نتایج [۲۶، ۲۷] است. همانگونه که اشاره شد، در دماهای بالای 400°C نرخ کرنش تاثیر قابل توجهی روی نمای m و لذا نیروی سنبه دارد که نرخ‌های کمتر کاهش زیادی را در نیروی بیشینه سنبه در پی داشته است؛ در نتیجه در دماهای بالای 400°C ، سرعت‌های شکل دهی کمتر، افزایش بیشتری را در مقادیر نسبت کشش حدی ایجاد می‌کنند که افزایش بیشتر شیب نمودار در سرعت 60mm/min نسبت به سایر سرعت‌ها، در دماهای بالای 400°C نیز دلالت بر این موضوع دارد.

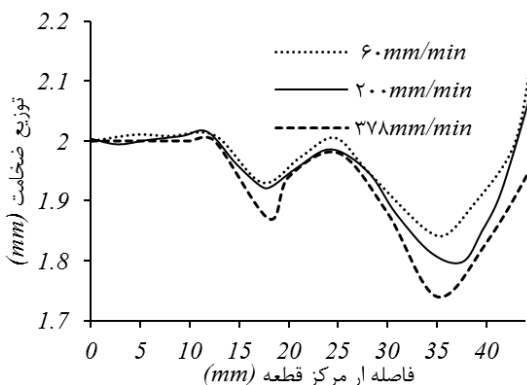


شکل ۲۰- نتایج عددی تغییرات نسبت کشش حدی در دما و سرعت‌های مختلف

دمای محیط اندکی افزایش می‌یابد که ناشی از عملیات خنک‌کاری است. عملیات خنک‌کاری مرکز ورق در دمای 150°C ، افزایش مقاومت به تغییر شکل را در پی داشته، در نتیجه استحکام مرکز ورق افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت مرکز ورق که ناشی از عملیات خنک‌کاری سنبه است، بر کاهش استحکام ورق در دمای 150°C غلبه می‌کند. این افزایش استحکام منجر به افزایش نیروی بیشینه سنبه نسبت به دمای محیط می‌شود. در دمای 150°C افزایش سرعت از 60mm/min به 200mm/min ، منجر به کاهش زمان شکل‌دهی می‌شود؛ در نتیجه ورق طی مدت زمان کمتری تحت عملیات خنک‌کاری قرار می‌گیرد. لذا استحکام افزایش زیادی نخواهد داشت و نیروی بیشینه سنبه کاهش می‌یابد. به علاوه نرخ کرنش‌های بالا ناشی از سرعت، بیشتر منجر به افزایش نمای کار سختی n شده و نیروهای شکل‌دهی بالاتر را طلب می‌کند. لذا در این دما (150°C) برای سرعت 200mm/min افزایشی معادل 1kN در نیروی بیشینه سنبه نسبت به سرعت 60mm/min ایجاد شده است. با افزایش دما به 250°C استحکام ورق کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته که احتمالاً ناشی از آغاز عملیات بازیابی دینامیکی است. این کاهش چشمگیر در دماهای بالا بر افزایش مقاومت ناشی از عملیات خنک‌کاری مرکز ورق غلبه می‌کند و طبق شکل ۱۹، کاهش شدید نیروی سنبه را در پی خواهد داشت. افزایش در مقاومت به شکل‌پذیری در نرخ کرنش‌های بالا، افزایشی معادل 3kN در نیروی بیشینه برای شکل‌دهی در سرعت 200mm/min در مقایسه با سرعت 60mm/min در دمای 250°C در پی داشته است. ناکا و همکاران هم گزارش کردند که در دماهای بیش از 200°C ، افزایش نرخ کرنش تاثیر چشمگیری روی نمای حساسیت به نرخ کرنش m دارد [۷، ۲۵]. در حالت داغ و در دماهای بالای 400°C ، کاهش استحکام ورق تشدید شده، طوری که در دمای 450°C نیروی بیشینه سنبه در سرعتی معادل 60mm/min نسبت به دمای 150°C کاهش حدود ۶۳٪ و نسبت به دمای 250°C کاهش حدود ۵۰٪ را داشته است. در این دما برای سرعت 200mm/min ، افزایش حدود ۱۳٪ در نیروی بیشینه سنبه نسبت به سرعت 60mm/min ایجاد شده است. در حالیکه این افزایش در نیروی بیشینه سنبه (که ناشی از



شکل ۲۲- توزیع ضخامت در نواحی مختلف در دمای ۱۵۰°C



شکل ۲۳- توزیع ضخامت در نواحی مختلف در دمای ۴۵۰°C

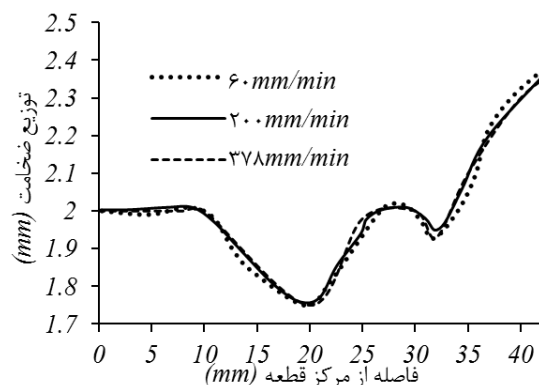
شبه‌سازی یکسان اعمال شده که در حین فرآیند، دمای ورقگیر و ماتریس ثابت مانده، ولی دمای ورق با توجه به ضرایب انتقال حرارتی تعریف شده تغییر می‌کند؛ در نتیجه عملیات خنک‌کاری سنبه و حرارت‌دهی لبه ورق، قسمت‌هایی از ورق که با سنبه در تماس قرار می‌گیرد، در مقایسه با مناطق در تماس با ورقگیر و ماتریس، کاهش دمای بیشتری خواهند داشت. مرکز ورق از شروع فرآیند پیوسته با سنبه در تماس است، لذا بیشترین کاهش دما طبق شکل ۲۴ در کف ورق (ناحیه A) صورت می‌پذیرد. از طرفی در انتهای فرآیند دمای مرکز ورق به ترتیب برای دمای ۱۵۰°C و ۴۵۰°C تقریباً ۶۷°C و ۱۴۷°C است که به ترتیب کاهش حدود ۵۵٪ و ۶۷٪ را نسبت به دمای اولیه تنظیم شده نشان می‌دهد. این میزان کاهش چشمگیر و سریع دما، افزایش استحکام را در مرکز ورق و به‌ویژه در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه را توجیه می‌کند که این افزایش امکان دستیابی به نسبت‌های

۳-۵- تاثیر سرعت شکل دهی بر توزیع ضخامت دماهای مختلف

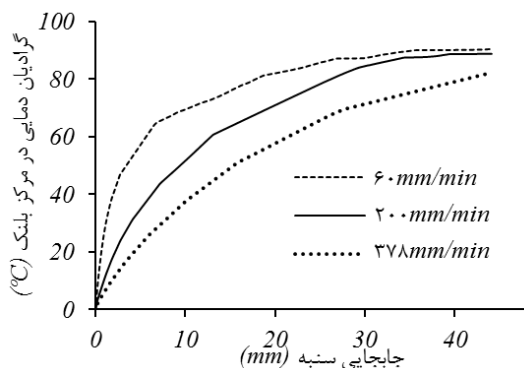
جهت بررسی اثر سرعت شکل دهی بر توزیع ضخامت، نمونه‌هایی با قطر یکسان (۷۵mm) در سه سرعت شکل دهی و در سه دمای مختلف شکل داده شده‌اند. تغییرات ضخامتی نقاط مختلف در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. در دمای محیط به علت پایین بودن حساسیت به نرخ کرنش، افزایش سرعت شکل دهی تأثیری بر توزیع ضخامت و نقاط بحرانی (نقاطی با کمترین ضخامت) نخواهد داشت. در دمای ۱۵۰°C، نرخ کرنش‌های کمتر نمای n را کاهش داده که در نتیجه با کاهش نیروی سنبه لازم، کرنش‌های کوچکتری به ورق اعمال می‌شود. این کرنش‌های کمتر، بهبود توزیع ضخامت را در سرعت‌های شکل دهی کمتر نتیجه می‌دهد که در شکل ۲۲ نشان داده است. سرعت‌های شکل دهی کمتر در شکل ۲۳ برای دمای ۴۵۰°C، با کاهش محسوسی که طبق شکل ۱۹ در نیروی بیشینه سنبه ایجاد کرده و با توجه به افزایش قابلیت شکل‌پذیری ماده، تأثیر چشمگیری در افزایش ضخامت نقاط بحرانی و بهبود توزیع ضخامت داشته است.

۳-۶- تاثیر سرعت شکل دهی بر گرادایان دماهای مختلف

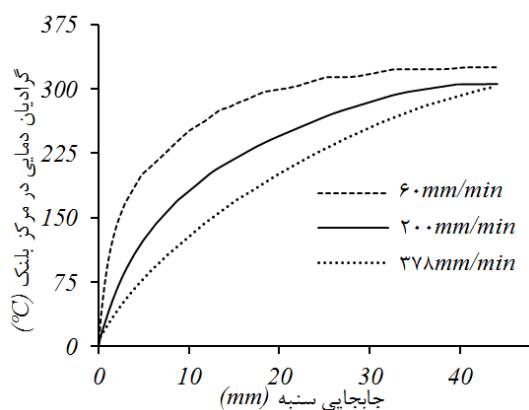
جهت بررسی تأثیر دما و سرعت بر گرادایان دمایی در مرکز ورق، در سه سرعت و در دو دمای مختلف نمونه‌هایی با قطر ۷۵mm توسط مدل عددی شکل داده شدند. همانطور که بیان شده، دمای اولیه برای ورق، ورقگیر و ماتریس در



شکل ۲۱- توزیع ضخامت در نواحی مختلف در دمای محیط



شکل ۲۵- نتایج عددی تغییرات گرادیان دمایی در مرکز ورق در دمای ۱۵۰°C



شکل ۲۶- نتایج عددی تغییرات گرادیان دمایی در مرکز ورق در دمای ۴۵۰°C

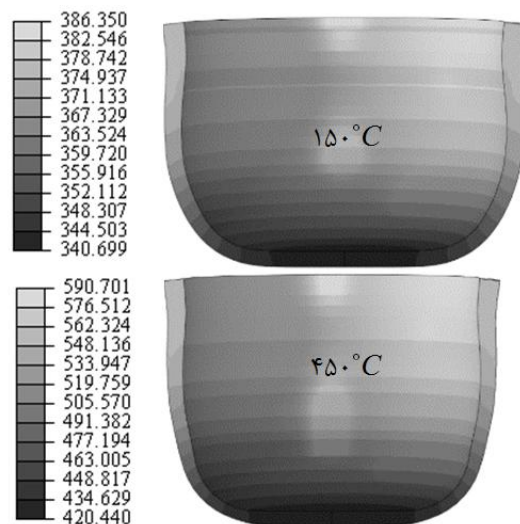
مدت زمان کمتر تماس ورق با سنبه و لذا شدت کمتر عملیات خنک کاری برای سرعت‌های بیشتر است.

۳-۷- تاثیر سرعت شکل دهی بر رفتار گوشواره‌ای در دماهای مختلف

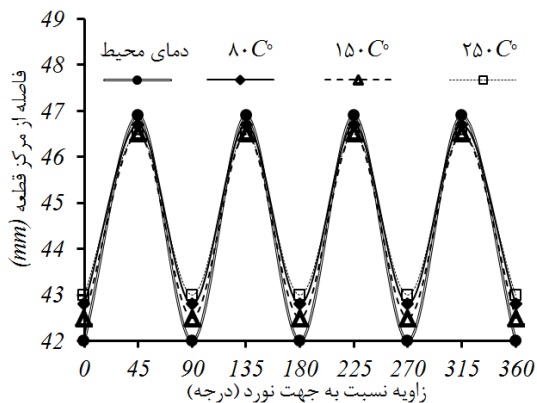
مطابق شکل ۲۷ پروفیل گوشواره‌ای برای فنجان‌های شکل گرفته در تمام دماهای شکل‌دهی با چهار قله در جهت $\pm 45^\circ$ و چهار دره در جهت نورد و عمود بر آن ایجاد شده است. طبق نتایج تحلیلی هاسفورد و کدل [۲۳]، ایجاد قله‌ها در جهت $\pm 45^\circ$ نشان می‌دهد که مقدار r_{45} باید بیشتر از دو مقدار دیگر (r_{90} و r_{0}) باشد؛ لذا طبق معادله ۱، مقداری منفی برای ناهمسانگردی صفحه‌ای حاصل می‌شود ($\Delta r < 0$).

کشش بالاتری را در حالت گرادیانی نسبت به حالت حرارت‌دهی یکنواخت کل مجموعه قالب (حالت هم‌دما) طبق نتایج [۴-۲] در پی خواهد داشت.

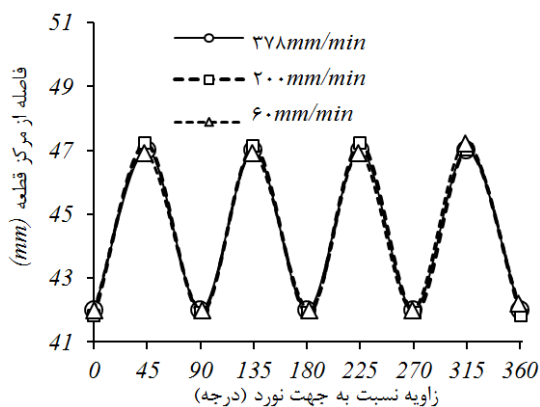
کاهش دمای مرکز ورق متأثر از تماس با سنبه خنک‌کننده، یک گرادیان دمایی بین مرکز ورق و ناحیه لبه در تماس با ماتریس ایجاد می‌کند. سرعت‌های مختلف تغییراتی را در گرادیان دمایی ایجاد کرده، طوری که با افزایش سرعت و لذا کاهش زمان فرآیند، مدت زمان تماس ورق با سنبه کاهش یافته، لذا خنک کاری با نرخ کمتری انجام می‌گیرد؛ در نتیجه برای سرعت‌های بیشتر در پایان فرآیند، دمای مرکز ورق کاهش کمتری نسبت به سرعت‌های شکل‌دهی کمتر خواهد داشت که نهایتاً کاهش گرادیان دمایی را منجر می‌شود (شکل‌های ۲۵ و ۲۶). کاهش کمتر دمای ورق برای سرعت‌های بیشتر، تنش بزرگتری را ایجاد می‌کند و لذا طبق شکل ۲۰، نسبت‌های کشش کمتری را نیز برای سرعت‌های بالاتر داشتیم. طبق پیش‌بینی مدل اجزای محدود در کمترین سرعت اعمالی (۶۰ mm/min)، گرادیان دمایی (اختلاف دمای مرکز ورق نسبت به دمای اولیه ورق) در پایان فرآیند به ترتیب برای دمای ۱۵۰°C و ۴۵۰°C تقریباً ۹۰°C و ۳۲۵°C است که نسبت به سرعت ۳۷۸ mm/min به ترتیب افزایش حدود ۱۰٪ و ۸٪ را در گرادیان دمایی مرکز ورق نشان می‌دهد. این افزایش ناشی از



شکل ۲۴- توزیع دمایی (کلوین) نمونه‌های شکل یافته در سرعت ۳۷۸ mm/min



شکل ۲۸- پروفیل گوش‌ها در درم‌های مختلف و سرعت ۳۷۸mm/min



شکل ۲۹- پروفیل گوش‌ها در سرعت‌های مختلف در دمای محیط

در شکل ۲۹ پروفیل گوشواره‌ای برای فنجان‌های شکل گرفته با قطر ۷۵mm در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که واضح است، سرعت شکل‌دهی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تعداد، موقعیت و دامنه گوش‌ها نداشته که در تطابق با نتایج [۱۶] است.

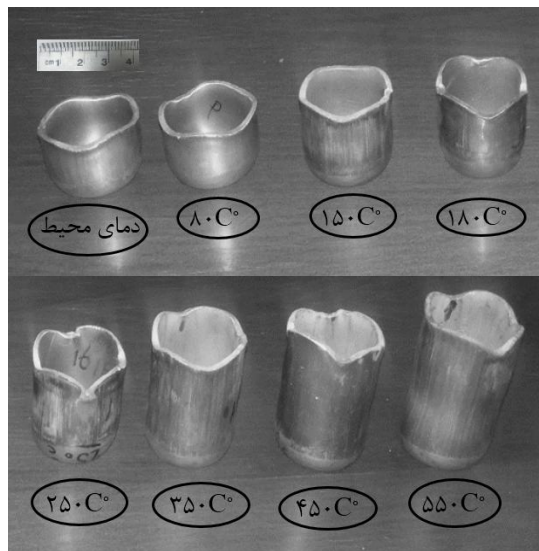
۴- نتیجه‌گیری

مجموعه‌ای برای انجام فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی روی ورق آلیاژی آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۲mm طراحی و ساخته شده است. آزمایش‌ها در سه سرعت مختلف و محدوده دمایی محیط تا دمای ۵۵۰°C انجام شده که نتایج مهم حاصل از این مقاله بصورت زیر خلاصه شده است:

این مقدار منفی پیشتر نیز برای آلومینیوم ۵۰۸۳ گزارش شده است [۲۸, ۲۹].

$$\Delta R = \frac{R0 + R90 - 2R45}{2} \quad (1)$$

ارتفاع قله‌ها طبق شکل ۲۸ که برای فنجان‌های با قطر ۷۵mm گزارش شده که با افزایش دما تدریجاً کاهش یافته است. از آنجایی که با افزایش دما پارامترهای ناهمسانگردی (r_i) اغلب برای آلیاژهای آلومینیوم افزایش می‌یابد [۱۳, ۳۰] و به مقدار ۱ نزدیک می‌شود؛ بنابراین ماده تمایل بیشتری به همسانگردی نشان می‌دهد؛ در نتیجه افزایش مقادیر r برای دماهای افزایش، منجر به کاهش دامنه قله‌ها شده است. افزایش مقادیر r و نزدیک شدن به مقدار ۱ بر اثر افزایش دما، کرنش‌های صفحه‌ای را ایجاد کرده و مقاومت بیشتری را به کاهش ضخامت نتیجه می‌دهد. مقاومت به کاهش ضخامت نیز، توجه‌ای بر بهبود قابلیت شکل‌پذیری و امکان دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر در دماهای بالا است (شکل ۲۰). قابل ذکر است که اگرچه مقادیر r با افزایش دما بیشتر شده، اما مقدار $r_{۴۵}$ برای تمامی دماهای شکل‌دهی همچنان بزرگتر از دو مقدار دیگر است؛ لذا موقعیت گوش‌ها با افزایش دما تغییری نکرده و برای تمام دماها دارای چهار گوش در جهت $\pm 45^\circ$ است.



شکل ۲۷- رفتار گوشواره‌ای در انتهای باز قطعات شکل گرفته در دماهای مختلف

- and cooling technique. *J Mater Process Technol* 143: 612-615.
- [3] Ambrogio G (2005) Prediction of formability extension in deep drawing when superimposing a thermal gradient. *J Mater Process Technol* 162: 454-460.
- [4] Palumbo G (2007) Numerical and experimental investigations on the effect of the heating strategy and the punch speed on the warm deep drawing of magnesium alloy AZ31. *J Mater Process Technol* 191(1): 342-346.
- [5] Naka T, Yoshida F (1999) Deep drawability of type 5083 aluminium-magnesium alloy sheet under various conditions of temperature and forming speed. *J Mater Process Technol* 89: 19-23.
- [6] Moon Y, et al. (2001) Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminum 1050 sheet. *Int J Mach Tools Manuf* 41(9): 1283-1294.
- [7] Naka T, et al (2001) The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet. *J Mater Process Technol* 113(1): 648-653.
- [8] Takuda H, et al (2002) Finite element simulation of warm deep drawing of aluminium alloy sheet when accounting for heat conduction. *J Mater Process Technol* 120(1): 412-418.
- [9] Palumbo G, Tricarico L (2007) Numerical and experimental investigations on the warm deep drawing process of circular aluminum alloy specimens. *J Mater Process Technol* 184(1): 115-123.
- [10] WANG H, et al (2012) Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075. *Trans Nonferrous Met Soc China* 22(1): 1-7.
- [11] Ghaffari Tari D, Worswick M, Winkler S (2013) Experimental studies of deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet under various thermal conditions. *J Mater Process Technol* 213(8): 1337-1347.
- [12] Chu X, et al (2014) Temperature and strain rate influence on AA5086 Forming Limit Curves: Experimental results and discussion on the validity of the M-K model. *Int J Mech Sci* 78: 27-34.
- [13] Ghosh M, et al (2014) Warm deep-drawing and post drawing analysis of two Al-Mg-Si alloys. *J Mater Process Technol* 214(4): 756-766.
- [14] Barimani Varandi A, Hosseini-pour SJ (2014) Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing. *Modares Mechanical Engineering* 14(10): 187-194.
- [15] Laurent H, et al (2015) Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy. *Int J Mech Sci* 93: 59-72.

- (۱) با افزایش دما از محیط به دمای 150°C ، شعاع گوشه حفره ماتریس نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند و با افزایش مقدار آن (در شعاع گوشه‌ی سنبه ثابت)، نرخ نازک‌شدگی نقطه بحرانی کاهش یافته است. در نتیجه توزیع ضخامت بهبود و شکل‌دهی با حصول موفقیت بیشتری انجام گرفته است.
- (۲) عملیات خنک‌کاری مرکز ورق در دمای 150°C افزایش مقاومت به تغییر شکل و لذا افزایش استحکام ورق را در پی داشته که در نهایت منجر به افزایش نیروی بیشینه سنبه نسبت به دمای محیط شده است. با افزایش دما به 250°C ، کاهش شدیدی در نیروی سنبه ایجاد شده است. در دمای 450°C ، نیروی بیشینه سنبه در سرعتی معادل 60mm/min نسبت به دمای 150°C کاهشی حدود 63% و نسبت به دمای 250°C کاهشی حدود 50% را در پی داشته است.
- (۳) با کاهش سرعت در دماهای بالاتر از 150°C ، نسبت کشش حادی افزایش و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌شود. این تغییرات در دماهای بالاتر از 400°C و با ظهور ویژگی ابرمومسانی ماده، با شدت بیشتری صورت می‌گیرد.
- (۴) با افزایش دما، تعداد (۴) و موقعیت گوش‌ها ($\pm 45^{\circ}$)، علی‌رغم کاهش دامنه، ثابت مانده است. همچنین سرعت شکل‌دهی نیز، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تعداد، موقعیت و دامنه گوش‌ها نداشته است.

۵- تشکر و قدردانی

حمایت مالی و انجام آزمایش‌های تجربی جهت یافتن ضرایب اصطکاکی کلمب، در شرکت قالب‌های پیشرفته ایران خودرو (به شماره پروژه S-1192) انجام شد.

۶- مراجع

- [1] Kalpakjian S, Schmid SR, Kok CW (2008) Manufacturing processes for engineering materials. Pearson-Prentice Hall.
- [2] Yoshihara S (2003) Formability enhancement in magnesium alloy deep drawing by local heating

- [24] Hashemi AMH, Seyedkashi SMH (2015) Finite element simulation and experimental study of forming of conical parts by HDDRP method: Process window diagram. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 5(4): 139-150.
- [25] Alavala CR (2016) High temperature and high strain rate superplastic deep drawing process for AA2618 alloy cylindrical cups. *Int J Sci Eng Appl Sci* 2(2): 35-41.
- [26] Türköz M, et al (2017) Investigation on the optimal geometrical parameters for cylindrical cups in warm hydromechanical deep drawing process. in *Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, 2017 8th International Conference on IEEE.
- [27] Laurent H, et al (2015) Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy. *Int J Mech Sci* 93: 59-72.
- [28] Tanaka H, et al (2007) Mechanical properties of 5083 aluminum alloy sheets produced by isothermal rolling. *Mater Trans* 48(8): 2008-2013.
- [29] Janbakhsh M, Riahi M, Djavanroodi F (2012) Anisotropy induced biaxial stress-strain relationships in aluminum alloys. *Int J Adv Manuf Technol* 5(3): 1-7.
- [30] Tajally M, Emadoddin E (2011) Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets. *Mater Des* 32(3): 1594-1599.
- [16] Kurukuri S, et al (2010) Thermo-mechanical Forming of Al-Mg-Si Alloys: Modeling and Experiments. in *AIP Conference Proceedings AIP*.
- [17] Pepelnjak T, Kayhan E, Kaftanoglu B (2018) Analysis of non-isothermal warm deep drawing of dual-phase DP600 steel. *Int J Mater Form* 1-18.
- [18] Gerdooei M, Dariani B (2008) Strain-rate-dependent forming limit diagrams for sheet metals. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 222(12): 1651-1659.
- [19] Dariani B, Liaghat G, Gerdooei M (2009) Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 223(6): 703-712.
- [20] Hashemi R (2017) Survey the effect of forming speed on fld for Al 6061 sheets. *Modares Mechanical Engineering* 17(10): 333-340.
- [21] Hosseinipour S (2009) An investigation into hot deformation of aluminum alloy 5083. *Mater Des* 30(2): 319-322.
- [22] Singh SK, et al (2010) Understanding formability of extra-deep drawing steel at elevated temperature using finite element simulation. *Mater Des* 31(9): 4478-4484.
- [23] Hosford WF, Caddell RM (1993) *Metal forming*. Prentice Hall.