



بررسی تجربی و شبیه‌سازی اثر لزجت سیال بر شکل‌دهی ورق در فرآیند هیدروفورمینگ

وحید مدانلو^۱، عبدالحمید گرجی^{۲*} و محمد بخشی^۳

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

آستادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

آستاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۶/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۳۰

چکیده

در این پژوهش، اثر لزجت سیال بر شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پيشانی تخت با استفاده از روش کشش عمیق هیدروپلاستیک با فشار شعاعی به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا به منظور تعیین حدود پارامترهای عملیات شکل‌دهی نظیر، فشار بیشینه و نیز مسیر فشار اعمالی، فرآیند به صورت شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شد. در ادامه با استفاده از چند سیال با لزجت‌های متفاوت، به عنوان محیط‌های واسطه تغییر شکل دهنده، آزمایش‌های تجربی انجام شد. برای هر کدام از سیال‌های استفاده شده، توزیع ضخامت در قطعه نهایی و نیز نیروی بیشینه سنبه بررسی شد. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، مشخص شد که توزیع ضخامت و نیروی بیشینه سنبه در دو روش، دارای مطابقت قابل قبولی است. به علاوه در این مقاله، نشان داده شده است که با افزایش لزجت سیال، نیروی بیشینه سنبه نیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش لزجت سیال، تأثیری در ضخیم‌شدگی حداکثر ورق در ناحیه دیواره فنجان ندارد. در پایان در این پژوهش، نشان داده شده است که با انتخاب سیال با لزجت مناسب، می‌توان به قطعه‌های نهایی با توزیع ضخامت یکنواخت‌تر دست یافت.

کلمات کلیدی: هیدروفورمینگ ورق؛ فشار شعاعی؛ توزیع ضخامت؛ لزجت

Experimental investigation and simulation of the effect of fluid viscosity on sheet forming in hydroforming

Vahid Modanloo¹, Abdolhamid Gorji^{2*} and Mohammad Bakhshi³

¹Masters student, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

³Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

Abstract

In this research, the effect of viscosity of fluid on forming of flat head cylindrical cups by using hydrodynamic deep drawing process assisted radial pressure, was studied experimentally and also by finite element analysis. In this paper Firstly, to determine forming parameters such as maximum pressure and applied pressure path, process was carried out by numerical simulation by finite element method. Then by using several types of fluid with different viscosity as pressure carrying medium, several experiments were carried out. For every fluid, thickness distribution in final part and maximum punch force were investigated. By comparison of experimental results with numerical data, it has been found that results from numerical simulation were in good agreement with the experimental results. In addition in this paper it is shown that increasing the fluid viscosity leads to increasing of maximum punch force. In addition increasing fluid viscosity doesn't have any effect in maximum blank thickening in the cup wall zone. Finally, in this research it is shown that by selecting fluid with appropriate viscosity, final parts with more uniform thickness distribution could be achieved.

Keywords: Sheet Hydroforming; Radial Pressure; Thickness Distribution; Viscosity

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۱۱۱۴۵۷۶۰

آدرس پست الکترونیک: hamidgorji@nit.ac.ir

۱- مقدمه

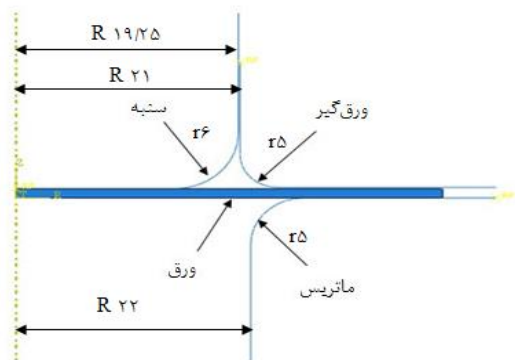
در فرآیند هیدروفورمینگ علاوه بر سنبه و ماتریس، از محیط واسطه برای شکل‌دهی ورق استفاده می‌شود. این محیط واسطه، معمولاً یک سیال تحت فشار (آب یا روغن) با خاصیت تراکم‌ناپذیری است. شاید بتوان حضور محیط واسطه را مهم‌ترین تفاوت فرآیند هیدروفورمینگ با فرآیند کشش عمیق سنتی دانست. در روش کشش عمیق، هیدروفورمینگ با حرکت نسبی سنبه و بر اثر فشار سیال درون محفظه ورق به سطح سنبه می‌چسبد و شکل سنبه را به خود می‌گیرد [۱]. از جمله مزایای روش هیدروفورمینگ ورق در مقایسه با روش کشش عمیق کلاسیک، می‌توان به عملیات ثانویه کمتر، خواص استحکامی بهتر و کاهش برگشت فتری اشاره کرد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران از روش‌های متفاوتی در زمینه شکل‌دهی ورق استفاده نموده‌اند که از جمله این روش‌ها، می‌توان به روش هیدروفورمینگ استاندارد و کشش عمیق هیدرووریم [۲]، کشش عمیق هیدرومکانیکی [۳]، کشش عمیق هیدرودینامیکی [۴] و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۵] اشاره کرد. روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی در میان روش‌های متفاوت هیدروفورمینگ، در شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا با اقبال بیشتری روبه‌رو شده است. در شکل ۱، شماتیک این فرآیند نشان داده شده است. در روش هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، فشار سیال علاوه بر سطح زیرین ورق، به لبه‌های کناری آن نیز اعمال می‌شود. سیال پر فشار سبب چسبیدن ورق به سطح سنبه و در پی آن افزایش اصطکاک بین ورق با سنبه می‌شود. افزایش اصطکاک، منجر به بهبود خواص شکل‌پذیری ورق می‌شود که در فرآیندهای شکل‌دهی ورق مطلوب است [۵]. اودای کومار^۱ [۶]، با استفاده از مدل ریاضی، نشان داد که علاوه بر شعاع ورق اولیه، لزجت سیال نیز روی تنش‌های شعاعی، در فرآیند کشش عمیق هیدروفورمینگ تاثیر می‌گذارد. طبق رابطه پیشنهادی کومار، با افزایش لزجت سیال، تنش‌های شعاعی ایجاد شده در ناحیه فلنج ورق کاهش می‌یابد. همچنین چروکیدگی در ورق، با استفاده از یک نوع سیال لزج خاص کاهش می‌یابد. کومار و همکاران [۷]، به تعیین فشار ورق‌گیر در فرآیند

هیدروفورمینگ پرداختند و فرآیند را با استفاده از سه سیال با لزجت‌های مختلف شبیه‌سازی کردند. آنها به این نتیجه دست یافتند که در یک سرعت سنبه ثابت، با افزایش لزجت سیال، فشار ورق‌گیر افزایش می‌یابد. لیو^۲ و همکاران [۸]، شکل‌پذیری ورق‌های آلومینیومی، با استفاده از یک محیط فشار لزج، مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و روش آزمایشگاهی، به این نتیجه رسیدند که با استفاده از روش شکل‌دهی لزج، می‌توان پدیده گلوبی‌شدن در ورق را به تاخیر انداخت. لانگ^۳ و همکاران [۹]، ضمن شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای یک آلیاژ خاص، به این نتیجه رسیدند که با کمک این فرآیند نسبت به نوع سنتی آن، می‌توان به نسبت کشش بیشتری دست یافت. به دلیل استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، جریان سیال سبب ایجاد یک فشار شعاعی در لبه‌های ورق شده که سیلان بهتر ورق را تضمین می‌کند. آنها همچنین به ارائه معادله‌ای برای محاسبه فشار شعاعی، با توجه به لزجت سیال پرداختند. طبق این معادله با افزایش لزجت سیال، فشار شعاعی وارد به لبه ورق در ناحیه فلنج افزایش می‌یابد.

در این پژوهش، اثر نوع سیال روی توزیع ضخامت و شکل‌پذیری قطعه‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی روی گرده‌هایی به قطر ۸۰ و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و از جنس مس خالص، مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا به منظور تعیین حدود پارامترهای فرآیند نظیر، فشار بیشینه و مسیر فشار اعمالی، فرآیند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، شبیه‌سازی شد. در ادامه برای درست‌آزمایی نتایج عددی، از آزمایش‌های تجربی کمک گرفته شده است. با مقایسه نتایج روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، این نتیجه حاصل شد که توزیع ضخامت ورق و نیروی بیشینه سنبه به روش عددی و تجربی، مطابقت قابل قبولی دارند. همچنین در ادامه، آزمایش‌های تجربی بیشتری برای بررسی تاثیر پدیده لزجت سیال روی نازک‌شدگی و نیروی بیشینه سنبه انجام شد.

² Liu³ Lang¹ Kumar

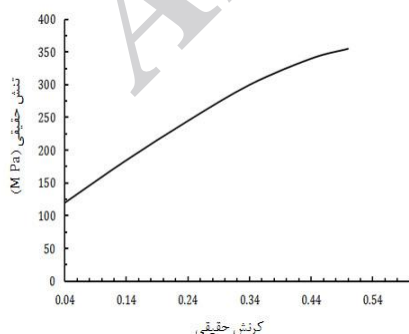
هیدرواستاتیکی سیال علاوه بر سطح زیرین ورق، به لبه‌های آن نیز اعمال می‌شود. ماتریس و ورق‌گیر، به صورت ثابت و بدون حرکت در نظر گرفته شده‌اند. همچنین فرآیند در یک گام تنظیم شده است. با توجه به اینکه شبیه‌سازی لزجیت سیال مشکل است، در انجام شبیه‌سازی سیال از قید فشار استفاده شد و مسیر فشار تجربی با استفاده از مانومتر دیجیتال ثبت و این مسیر فشار، در شبیه‌سازی اعمال گردید.



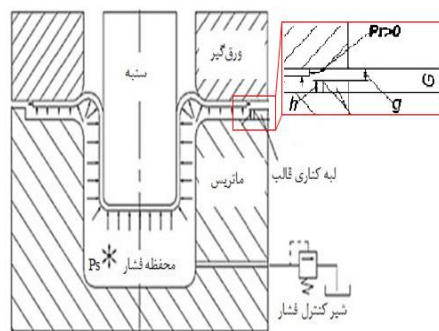
شکل ۲- مدل شبیه‌سازی شده اجزای محدود

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و خواص فیزیکی ورق مسی [۱۰]

مقدار	مشخصه
۱۱۶	استحکام تسلیم (MPa)
۸۹۴۰	چگالی (Kg m^{-3})
۱۱۷	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۲	ضریب پواسون
۰/۴۴	توان کرنش سختی



شکل ۳- نمودار تنش کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش [۱۰]



شکل ۱- شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرواستاتیکی با فشار شعاعی [۴]

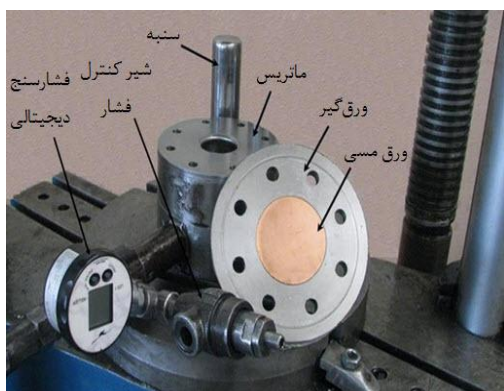
۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. در این پژوهش، با توجه به نتایج حاصل از آزمایش کشش [۱۰] و نتایج آزمایش تجربی، ورق مسی به صورت همسانگرد در نظر گرفته شده است. از این رو جهت تحلیل مسئله، از مدل دوبعدی استفاده شده است. در شبیه‌سازی ورق به صورت شکل‌پذیر به نرم‌افزار معرفی گردید و نیز با استفاده از المان توپر هشت‌گره‌ای، شبکه‌بندی شد. مجموعه قالب (سنبه، ماتریس و ورق‌گیر)، به صورت صلب تحلیلی^۱ در نظر گرفته شده و شبکه‌بندی نگردید. شکل ۲، مدل شبیه‌سازی اجزای محدود را نشان می‌دهد. مشخصات مکانیکی و خواص فیزیکی ورق، در جدول ۱ آمده است. منحنی تنش کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش [۱۰]، به صورت شکل ۳ به نرم‌افزار معرفی گردید. از حلگر صریح دینامیکی^۲ برای حل مسئله استفاده شده است. مطابق با مرجع [۱۱]، ضریب اصطکاک در سطح تماس سنبه با ورق ۰/۱۴ و ضریب اصطکاک در سطح تماس ورق‌گیر و ماتریس با ورق ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌های این پژوهش برای تعریف تماس ورق با سنبه و اجزای قالب، از نوع تماس مکانیکی با رفتار مماسی و با بیان ریاضی پنالته (فلز با فلز)، استفاده شده است. سنبه با سرعت ثابت ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در راستای عمودی جابجا می‌شود و فشار

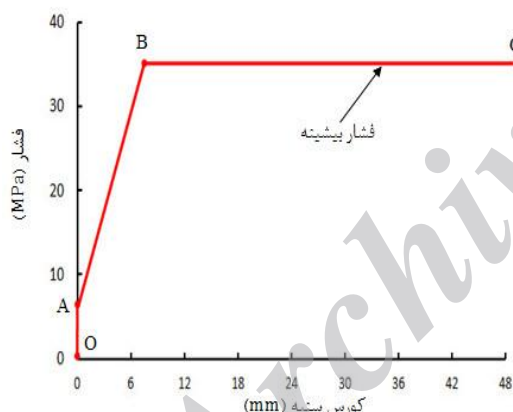
^۱ Analytical Rigid

^۲ Dynamic Explicit

استفاده شده است. در جدول ۲، لزجت سیال‌های استفاده شده در آزمایش آورده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش، برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات شکل داده شده، از دستگاه ضخامت‌سنج Kroeplin ساخت کشور آلمان استفاده شده است.



شکل ۴- مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل ۵- مسیر فشار استفاده شده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

جدول ۲- لزجت سیال‌های استفاده شده در آزمایش

سیال	لزجت $\times 10^{-4}$ (Pa.s)
آب	۸/۹۴
آب‌صابون	۱۵/۵
روغن SAE 10	۸۶/۵
روغن SAE 40	۱۳۳/۵

۳- مراحل آزمایشگاهی

مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی، به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، از دستگاه آزمایش اونیورسال DMG با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده که نیروی سنبه از این دستگاه، قابل استخراج است. در شکل ۴، مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. مسیر فشار استفاده شده در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی، در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مطابق با مسیر OA، پیش از شروع حرکت سنبه، فشار اولیه ثابتی به اندازه $7/5$ MPa به سطح زیرین ورق اعمال می‌شود. اعمال این فشار اولیه، باعث ایجاد حالت پیش‌بالج می‌شود که سبب روانکاری بهتر بین سطح ورق با سطوح دیگر قالب شده و به جریان بهتر فلز کمک می‌کند. در ادامه و همزمان با نفوذ سنبه به درون ماتریس، فشار سیال متناسب با نفوذ حجمی سنبه افزایش می‌یابد تا فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق فراهم شود (مسیر AB). در ادامه و با رسیدن فشار سیال به مقدار بیشینه از پیش‌تنظیم شده، شیر کنترل فشار باز شده و فشار محفظه ثابت می‌ماند (مسیر BC). فشار بیشینه، عامل تعیین‌کننده در توزیع ضخامت و کیفیت قطعه نهایی است. در این پژوهش، به منظور تعیین فشار بیشینه از شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شد. با انجام مراحل شبیه‌سازی مشخص گردید که فشار کمتر از حد معین، منجر به افزایش نازک‌شدگی و فشار بیشتر از حد معین نیز، تاثیر چندانی بر بهبود توزیع ضخامت قطعه استوانه‌ای ندارد [۱۲]. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، فشار بیشینه شکل‌دهی در این پژوهش، ۳۲ MPa در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل انجام فرآیند به صورت هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، از هیچ‌گونه اورینگی جهت آب‌بندی استفاده نگردید. به همین دلیل، همواره مقدار کمی نشتی در ناحیه فلنج قالب هنگام انجام فرآیند وجود دارد. این میزان نشتی، در مقایسه با فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی که در آن فشار شعاعی وجود ندارد، بسیار کم است. در این پژوهش، برای بررسی اثر پدیده لزجت روی شکل‌دهی ورق مسی، از چهار نوع سیال با لزجت‌های متفاوت برای شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت

۴- نتایج و بحث

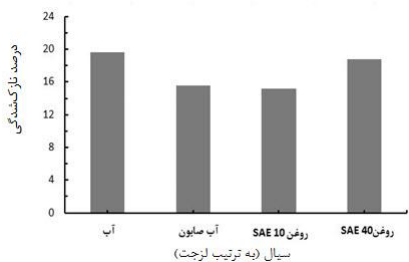
به منظور درست‌آزمایی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود، با استفاده از مسیر فشار شکل ۶، چندین آزمایش تجربی با استفاده از روغن SAE 10 انجام گرفت. همچنین آزمایش‌های تجربی در شرایط آزمایشگاهی یکسان، با استفاده از سه سیال دیگر نیز انجام شد. در این پژوهش، به منظور مطالعه دقیق‌تر توزیع ضخامت، قطعه نهایی به سه ناحیه مختلف تقسیم شده که در نمودارهای توزیع ضخامت، به این نواحی ارجاع داده شده است. شکل ۶، این نواحی را نشان می‌دهد. در شکل ۷، منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی با استفاده از روغن SAE 10 آورده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی، مربوط به ناحیه B (شعاع گوشه سنبه) و به میزان ۷٪ است. در شکل ۸، منحنی توزیع ضخامت حاصل از نتایج تجربی با استفاده از چهار سیال با لزجت‌های متفاوت ارائه شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه B (شعاع گوشه سنبه)، رخ می‌دهد. مقدار نازک‌شدگی حداکثر ورق مسی به صورت تجربی با استفاده از چهار سیال با لزجت‌های متفاوت، در جدول ۳ آمده است. شکل ۹، نمودار نازک‌شدگی حداکثر ورق مسی به صورت تجربی برحسب لزجت سیال‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج تجربی بدست آمده برای چهار سیال با لزجت‌های مختلف، مشاهده می‌شود که بیشترین نازک‌شدگی مربوط به سیال آب است که دارای کمترین لزجت است. همچنین ملاحظه می‌شود که روغن SAE 10، کمترین میزان نازک‌شدگی را در بین چهار سیال استفاده شده در این پژوهش، در پی خواهد داشت. با توجه به نمودار شکل ۹، مشاهده می‌شود که در ابتدا با افزایش لزجت، نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. از آنجائی که در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی از اورینگ جهت آب‌بندی استفاده نمی‌شود، همواره نشتی در ناحیه فلنج قالب هنگام انجام فرآیند وجود دارد. با افزایش مقدار لزجت، سرعت جریان سیال درون ماتریس کاهش یافته، در نتیجه مقدار نشتی سیال در ناحیه فلنج قالب نیز کم می‌شود و با کاهش میزان نشتی، سنبه پس از طی مسافت کمتری به نقطه فشار بیشینه (نقطه B در شکل ۶) خواهد رسید. با جابجایی کمتر سنبه و نیز تامین زودتر

فشار بیشینه، شکل‌دهی ورق مسی به طور مطلوب‌تری انجام گرفته، در نتیجه میزان نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه B کاهش می‌یابد. این موضوع با مقایسه میزان نازک‌شدگی ورق با استفاده از سه سیال آب، آب‌صابون و روغن SAE 10، قابل مشاهده است. شایان ذکر است که این افزایش لزجت تا یک حدی موثر خواهد بود. با افزایش بیش از حد لزجت (روغن SAE 40 نسبت به روغن SAE 10)، میزان نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه B افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که در شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت از جنس مس، استفاده از سیال SAE 10 در مقایسه با سه سیال دیگر استفاده شده در این پژوهش، کمترین میزان نازک‌شدگی را در پی خواهد داشت. همچنین به دلیل وجود کرنش فشاری در ناحیه انتهایی دیواره فنجان (ناحیه C) براساس نتایج شبیه‌سازی و تجربی، افزایش ضخامت مشاهده می‌شود. ضخیم‌شدگی حداکثر به میزان ۱۲٪ نسبت به ضخامت اولیه ورق بوده، برای هر چهار سیال استفاده شده یکسان است. این موضوع در شکل ۸ و در ناحیه انتهایی C، قابل مشاهده است. شکل ۱۰، قطعه شکل داده شده به روش شبیه‌سازی اجزای محدود (الف) و نیز حاصل از آزمایش تجربی با استفاده از سیال SAE 10 (ب) را نشان می‌دهد.

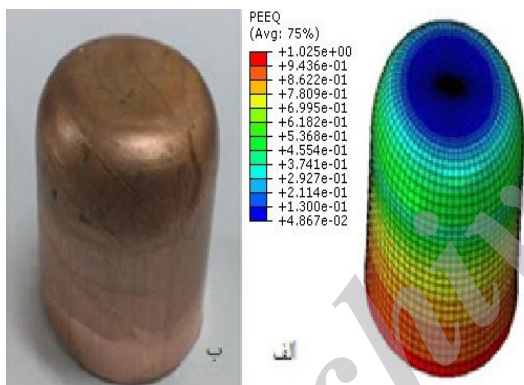
در شکل ۱۱، منحنی نیروی سنبه حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی با استفاده از روغن SAE 10 آورده شده است. نیروی بیشینه سنبه حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، به ترتیب ۱۱۷ و ۱۱۵ کیلونیوتن بدست آمد که با توجه به نمودار، دارای مطابقت قابل ملاحظه‌ای است. برای بررسی اثر لزجت سیال روی نیروی بیشینه سنبه، آزمایش‌های تجربی بیشتری با استفاده از چهار سیال مذکور انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ آمده است. با توجه به جدول استنباط می‌شود که با افزایش لزجت سیال، نیروی بیشینه سنبه نیز افزایش می‌یابد. این مطلب را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با افزایش لزجت سیال، سیال با سرعت کمتری درون ماتریس جریان می‌یابد و نفوذ سنبه به داخل ماتریس، سخت‌تر اتفاق می‌افتد؛ در نتیجه سنبه برای نفوذ به داخل ماتریس، نیاز به نیروی بیشتری دارد.

جدول ۳- لزجت سیال‌های استفاده شده در آزمایش

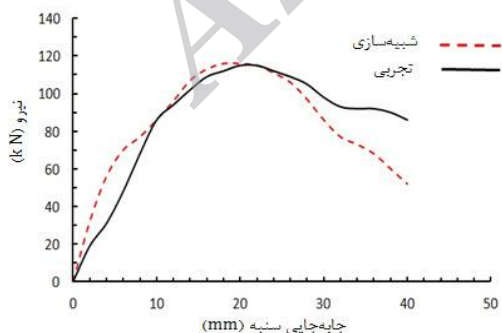
سیال	لزجت $(Pa \cdot s) \times 10^{-4}$	درصد نازک‌شدگی
روغن SAE 10	۸۶/۵	۱۵/۲
آب صابون	۱۵/۵	۱۵/۶
روغن SAE 40	۱۳۳/۵	۱۸/۸
آب	۸/۹۴	۱۹/۶



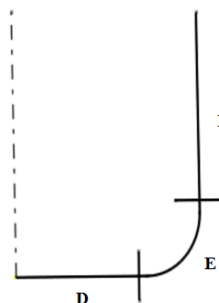
شکل ۹- نمودار درصد نازک‌شدگی در ناحیه B بر حسب لزجت سیال



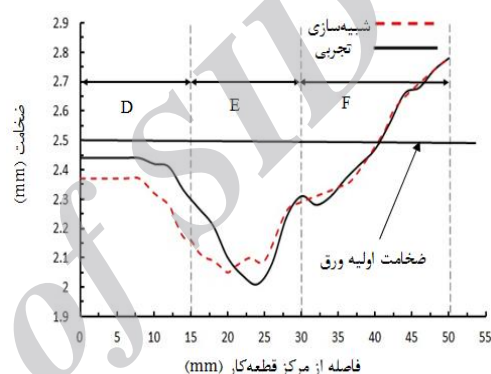
شکل ۱۰- قطعه شکل داده شده (الف) شبیه‌سازی (ب) تجربی با سیال SAE 10



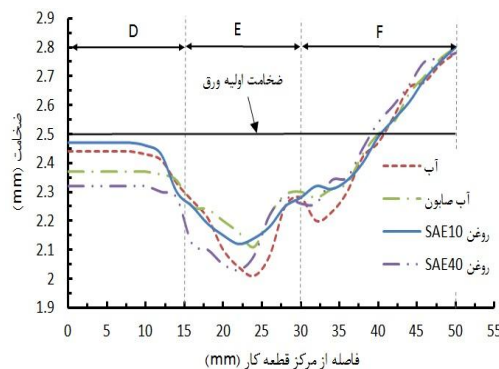
شکل ۱۱- منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی حاصل از شبیه‌سازی و با استفاده از روغن SAE 10



شکل ۶- سه ناحیه مختلف مورد بررسی در قطعه‌های استوانه‌ای سر تخت



شکل ۷- منحنی توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی با استفاده از روغن SAE 10



شکل ۸- منحنی توزیع ضخامت حاصل از آزمایش تجربی با استفاده از چهار سیال

- [3] Zhang SH, Danckert MR, Nielsen KB, Lang LH, Kang DC (2003) Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups. *Journal of Materials Processing Technology* 142: 544–550.
- [4] Kang D, Lang L, Meng M, Juan J (2000) Hydrodynamic deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology* 101: 21–24.
- [5] Lang L, Danckert J, Nielsen KB (2004) Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 148: 119–131.
- [6] Kumar RU (2012) Effect of blank radius on radial stresses in hydroforming deep drawing process. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering* 2: 6–11.
- [7] Kumar RU, Reddy PR, SitaRamaraju AV (2012) Determination of blank holder pressure in hydroforming deep drawing process. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 1: 242–249.
- [8] Liu J, Ahmetoglu M, Altan T (2000) Evaluation of sheet metal formability, viscous pressure forming (VPF) dome test. *International Journal of Materials Processing Technology* 98: 1–6.
- [9] Lang L, Danckert J, Nielsen KB (2005) Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 166: 150–161.
- [10] Gorji A, (2012) Experimental and finite element simulation method for forming a sharp conical parts. Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology.
- [11] Liu X, Xu Y, Yuan S, (2008) Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 24(3): 395–399.
- [12] Salahshoor M, (2014) Experimental and numerical study of the effect of punch profile on drawing ratio in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure. M.Sc. thesis, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology.

جدول ۴- نیروی بیشینه سنبه با استفاده از چهار سیال

سیال	نیروی بیشینه سنبه (kN)
آب	۹۹
آب صابون	۱۱۰
روغن SAE 10	۱۱۴
روغن SAE 40	۱۱۷

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر پدیده لزجت سیال روی شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت با استفاده از روش کشش عمیق هیدروودینامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا فرآیند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس تحلیل شد. در ادامه با استفاده از آزمایش‌های تجربی، مشاهده گردید که توزیع ضخامت و نیروی بیشینه سنبه، در دو روش دارای مطابقت قابل قبولی است. در ادامه به منظور تعیین اثر لزجت روی توزیع ضخامت ورق مسی و نیز نیروی بیشینه سنبه، آزمایش‌های تجربی بیشتری انجام شد. با بررسی و تحلیل نتایج، این نتیجه حاصل شد که با افزایش تفاوت در لزجت سیال‌های استفاده شده نسبت به سیال SAE 10 به عنوان سیال مبنا، نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه شعاع گوشه سنبه افزایش می‌یابد؛ ولی لزجت سیال روی ضخیم‌شدگی حداکثر ورق، واقع در ناحیه دیواره فنجان تاثیری ندارد. در این پژوهش، نشان داده شده است که با انتخاب سیال SAE 10 به عنوان سیالی با لزجت بهینه، می‌توان به قطعه‌هایی با توزیع ضخامت یکنواخت‌تر دست یافت. در پایان، این نتیجه بدست آمد که با افزایش لزجت سیال، نیروی بیشینه سنبه نیز افزایش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Qhafoori R, Javanroodi F, Pakbaz M (2008) Effect of hydroforming deep-drawing parameters and comparison of current methods of deep-drawing by finite element method. *Modares Mechanical Engineering* 8(1): 69–86.
- [2] Thiruvarudchelvan S, Travis FW (2003) Hydraulic pressure enhanced cup drawing processes-an appraisal. *Journal of Materials Processing Technology* 140: 70–75.