

ارزیابی اصطکاک با استفاده از آزمایش فشار استوانه: دو رویکرد جدید بر مبنای تغییر شکل بشکه‌ای و نیروی شکل‌دهی

مسعود میر^{۱*} و دانیال قهرمانی مقدم^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷	در این مقاله دو رویکرد جدید و ساده جهت تعیین ضریب اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی فلزات ارائه می‌شود. در روش ارائه شده، با استفاده از داده‌های آزمایش فشار استوانه که برای تعیین منحنی تنش- کرنش انجام می‌گیرد، ضریب اصطکاک فرآیند هم محاسبه می‌شود و نیاز به اندازه‌گیری پارامتر دیگری در هنگام آزمایش نمی‌باشد. در این تحقیق دو پارامتر نمایی به نام ضرایب بشکه‌ای شدن هندسی و نیرویی تعریف می‌شوند که به ترتیب تابع تغییرات هندسه استوانه و نیروی شکل‌دهی می‌باشند. ابتدا به کمک شبیه‌سازی عددی، ضرایب بشکه‌ای شدن بر حسب کرنش حقیقی نمونه در اصطکاک‌های مختلف رسم شده و نمودار کالیبراسیون آزمایش فشار استوانه بدست می‌آید. سپس با جایگذاری داده‌های تجربی بر روی نمودار کالیبراسیون ضریب اصطکاک فرآیند تعیین می‌شود. نتایج ضرایب اصطکاک بدست آمده از هر دو نمودار کالیبراسیون هندسی و نیرویی منطبق بر یکدیگر می‌باشند. جهت اعتبار سنجی روش ارائه شده، آزمایش مرسوم فشار حلقه نیز انجام گرفته است. نتایج ضرایب اصطکاک بدست آمده از روش‌های پیشنهادی در این تحقیق با ضرایب اصطکاک آزمایش فشار حلقه یکسان است. با توجه به افزایش فاصله منحنی‌های نمودار کالیبراسیون در ضرایب اصطکاک بالاتر از ۰/۲، اصطکاک با دقت و سرعت بیشتری نسبت به آزمایش فشار حلقه تعیین می‌شود.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰	
واژگان کلیدی: اصطکاک، آزمایش فشار استوانه، ضریب بشکه‌ای شدن، شکل‌دهی حجمی فلزات.	

۱- مقدمه

شرایط تریبولوژیکی بین قالب و نمونه پارامتر مهمی در فرآیندهای شکل‌دهی فلز می‌باشد که در تعیین دقیق خواص مکانیکی ماده، نیروی شکل‌دهی و الگوی جریان ماده در درون قالب بسیار موثر است. برای مثال در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی، مانند اکستروژن و فورج، اصطکاک تاثیر بسزایی در کیفیت محصول پایانی مناسب دارد. اصطکاک زیاد باعث تولید حرارت بیشتر در حین فرآیند، خوردگی، پوسته پوسته شدن سطح قالب و عیوب سطحی محصول تولید شده خواهد شد. تاثیرات منفی

اصطکاک را می‌توان با انتخاب روان کار مناسب کنترل نمود. اما باید توجه داشت که همیشه کاهش اصطکاک امری مطلوب نیست. اصطکاک می‌تواند در توزیع جریان مواد برای رسیدن به یک محصول مناسب با کمترین عیوب موثر باشد. علاوه بر این اصطکاک از عوامل مهم تاثیرگذار بر نیروی شکل‌دهی و شکل قالب در بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی می‌باشد [۱]. برای درک رفتار تریبولوژیکی ماده در فرآیندهای شکل‌دهی فلز، لازم است که اصطکاک بین نمونه و قالب به درستی و با دقت بالا محاسبه شود. باید در نظر داشت که رفتار مکانیکی ماده و اصطکاک از مهم‌ترین

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: massoudmir@qiet.ac.ir

۱. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان
۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

همکاران [۱۰] با استفاده از نرم افزار Ansys به شبیه سازی آزمایش فشار حلقه پرداختند تا اثر دما و روانکاری را مطالعه نمایند. از نتایج مطالعه آن‌ها، می توان دریافت که تغییر دما تأثیر معنی داری در تغییر بعد ندارد و هرچه ضریب اصطکاک بالاتر باشد قطر حلقه کمتر خواهد بود.

برخی از محققین روش‌های دیگری را جهت ارزیابی اصطکاک مورد بررسی قرار داده‌اند که در آن‌ها نمونه مورد استفاده هندسه‌ای متفاوت از یک حلقه ساده یا استوانه ساده دارد. تان و همکاران [۱۱]، به بررسی اصطکاک با استفاده از آزمایش حلقه پرداختند. حلقه‌های معرفی شده توسط آن‌ها دارای سه هندسه مختلف می‌باشند. آن‌ها دریافتند که کرنش سختی^۲ مواد در تعیین ضریب اصطکاک تأثیر داشته و دارای رفتار پیچیده‌ای می‌باشد که احتمالاً ناشی از فشار عمودی^۳ است. ژانگ و همکاران [۱۲]، آزمایش فشار جدیدی را برای محاسبه اصطکاک ارائه دادند. در این تحقیق نمونه‌های اولیه به صورت استوانه بوده که به وسیله دو قالب که یکی صاف و دیگری دارای یک شیار V شکل است، فشرده می‌شوند. در نهایت با استفاده از داده‌های تجربی و نمودار کالیبراسیون بدست آمده، اصطکاک محاسبه می‌شود. تاکور و همکاران [۱۳]، هندسه جدیدی را برای نمونه‌های آزمایش فشار جهت محاسبه اصطکاک ارائه نمودند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی المان محدود، نمودار کالیبراسیون اصطکاک را برای هر هندسه خاص محاسبه نمودند. در تحقیق آن‌ها ضرایب اصطکاک محاسبه شده برای نمونه‌های دارای هندسه‌های مختلف، تطابق خوبی با هم دارند.

آزمایش فشار استوانه مهمترین و ساده‌ترین روش جهت تعیین منحنی تنش-کرنش مواد در شکل‌دهی حجمی فلزات می‌باشد که در مرجع [۴] ارائه شده است. صنیعی و فاتحی [۱۴]، روشی را برای محاسبه دقیق منحنی تنش-کرنش از آزمایش فشار استوانه ارائه دادند. آن‌ها با یک ضریب تصحیح عددی^۴ حاصل از شبیه‌سازی عددی به منحنی تنش-کرنش واقعی تری دست یافتند و تأثیرات هندسه نمونه، ضریب اصطکاک، نمای کرنش سختی^۵ و ضریب استحکام^۶ را بر ضریب تصحیح عددی بررسی نمودند. با روش مذکور می‌توان منحنی تنش-کرنش دقیقی

عوامل تاثیرگذار در فرآیندهای شکل‌دهی می‌باشند [۲] که محققین به دنبال یافتن روش‌هایی جهت محاسبه ساده، سریع و دقیق این دو پارامتر می‌باشند. تقریباً تمام روش‌های ارزیابی اصطکاک از این موضوع الهام گرفته‌اند که هندسه نهایی نمونه تغییر شکل یافته، تابع اصطکاک بین قالب و نمونه است.

یکی از روش‌های اولیه و مفید جهت محاسبه اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی فلزات که توسط کونوگی [۳] ارایه شده، آزمایش فشار حلقه می‌باشد. از آزمایش فشار حلقه می‌توان جهت محاسبه اصطکاک بین قالب و نمونه و همچنین تعیین منحنی تنش-کرنش ماده مورد آزمایش استفاده نمود [۴]. سوفولو و راستی [۵] به بررسی کاربرد نمودار کالیبراسیون آزمایش فشار حلقه برای مواد مختلف پرداختند. آن‌ها پیشنهاد کردند که برای بدست آوردن ضریب اصطکاک مناسب و دقیق‌تر باید نمودار کالیبراسیون برای هر ماده به طور مجزا و مطابق با شرایط فرآیند بدست آید. کاجمارچیک و همکاران [۶]، روش‌های مختلفی را برای محاسبه اصطکاک بر پایه هندسه‌های گوناگون نمونه و قالب مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین عنوان کردند که آزمایش فشار حلقه برای محاسبه اصطکاک فرآیندهایی که دارای کرنش بالا و فشار زیادی می‌باشند مناسب نیست. کاماچو و همکاران [۷]، الگوی کالیبراسیون اصطکاک^۱ را برای آلیاژهای فلزی صنعتی مختلف با استفاده از آزمایش فشار حلقه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بر لزوم استخراج جداگانه منحنی کالیبراسیون برای هر ماده جهت محاسبه صحیح اصطکاک تأکید کردند. دهقان و همکاران [۸] با انجام آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی آن، اثر روانکار مخلوط گرافیت در آب در کاهش اصطکاک فرآیند فورج داغ را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نیز نشان می‌دهد شبیه‌سازی شرایط فورج داغ مجموعه همگانی از منحنی‌های کالیبراسیون فراهم نمی‌آورد. ژانگ و همکاران [۹]، به بررسی تغییرات اصطکاک و صافی سطح در طی فرآیند کاهش ارتفاع در آزمایش فشار حلقه پرداختند. آن‌ها با انجام آزمایش فشار حلقه‌های فولادی دریافتند که اصطکاک و صافی سطح به طور قابل ملاحظه‌ای در چهل و پنج درصدی کاهش ارتفاع حلقه رخ می‌دهد. رزاک و

⁴ Numerical correction factor

⁵ strain hardening exponent

⁶ Strength coefficient

¹ Friction calibration map

² Strain hardening

³ Normal pressure

عنوان نمودار کالیبراسیون جهت تعیین ضرایب اصطکاک استفاده کردند. لوگینف و همکاران [۲۰] با استفاده از آزمایش فشار استوانه‌های ساخته شده از آلیاژ تیتانیوم-آلومینیوم به بررسی ناهمگونی سطح جانبی نمونه‌ها پرداختند. آن‌ها به پیش‌بینی ناهمگونی یکسانی در آزمایش و روش تحلیلی دست یافتند.

در روش ارائه شده توسط فن و همکاران [۱۹] که کامل‌ترین و دقیق‌ترین تحقیق موجود می‌باشد، جهت تعیین انحنا در نمونه‌های تحت فشار باید نقاط سطح جانبی نمونه تحت فشار به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین انجام این آزمون نسبتاً پیچیده و دشوار بوده و نیاز به تجهیزاتی مانند میکروسکوپ و یا دوربین CCD دارد. با توجه به دشواری و پرهزینه بودن این روش استفاده از آن در موارد خیلی خاص مقرون به صرفه می‌باشد. با بررسی تحقیقات پیشین، روش‌های متعددی برای تعیین اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی فلز ارائه شده است. همچنین، به طور کلی منحنی‌های نمودار کالیبراسیون ارائه شده در تحقیقات گذشته فاصله کافی از یکدیگر نداشته و توان تفکیک اندکی دارند و این موضوع دقت تعیین ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد. بنابراین باید دنبال روشی بود که بتواند ضریب اصطکاک را ساده و با دقت و سرعت تعیین کند. در واقع فصل مشترک تمام تحقیقات پیشین، استفاده از یک مدل هندسی و الهام گرفتن از تغییر شکل نمونه هنگام آزمایش فشار جهت تعیین اصطکاک می‌باشد اما می‌توان گفت علیرغم تشابه زیادی که بین این تحقیقات وجود دارد هر تحقیق جدیدتر سرعت، دقت و سادگی دستیابی به ضریب اصطکاک را افزایش داده است.

در این مقاله به دو رویکرد جدید برای ارزیابی اصطکاک بر پایه آزمایش فشار استوانه پرداخته شده است و با بررسی اثر اصطکاک بر بشکه‌ای شدن استوانه تحت فشار و همچنین تغییرات نیروی شکل‌دهی، اصطکاک بین قالب و نمونه مشخص می‌شود. در مقاله حاضر دو ضریب بشکه‌ای شدن معرفی شده‌اند؛ ضریب بشکه‌ای شدن هندسی^۱ به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که با استفاده از یک تابع نمایی، اختلاف ناچیز بین قطر بالا و قطر قسمت میانی استوانه بزرگنمایی شود. ضریب بشکه‌ای شدن نیرویی^۲ نیز به گونه‌ای تعریف می‌شود که اختلاف بین نیروی شکل‌دهی

بدست آورد. با توجه به تغییر شکل هندسی و بشکه‌ای شدن نمونه می‌توان به ارزیابی اصطکاک با استفاده از آزمایش فشار استوانه پرداخت. ابراهیمی و نجفی زاده [۱۵]، یک روش ساده بر اساس آزمایش فشار استوانه جهت محاسبه ضریب اصطکاک در فرآیند شکل‌دهی حجمی ارائه دادند. آن‌ها ادعا کردند که این روش بسیار ساده بوده و حساسیت تغییر هندسه استوانه به شرایط اصطکاکی زیاد می‌باشد. در روش ارائه شده نیازی به اندازه‌گیری نیرو نبوده و برای ارزیابی اصطکاک تنها نیاز به اندازه‌گیری شعاع مقطع میانی و ارتفاع استوانه پس از تغییر شکل می‌باشد. آن‌ها ادعا نمودند که تنها تغییر هندسه استوانه در محاسبه اصطکاک موثر است و از خواص مکانیکی ماده و نیروی شکل‌دهی می‌توان چشم‌پوشی نمود. صلح‌جو [۱۶]، با استفاده از یک ضریب تصحیح، روش جدیدی برای محاسبه اصطکاک در آزمایش فشار استوانه ارائه داد. در این روش برخلاف مرجع [۱۵]، جهت محاسبه نهایی ثابت اصطکاک از تغییرات شعاع استوانه تحت فشار صرف‌نظر نمی‌شود. سپس با محاسبه یک ضریب تصحیح برای ارتفاع‌های اولیه متفاوت استوانه می‌توان ثابت اصطکاک اصلاح شده را محاسبه نمود. لی و همکاران [۱۷]، رفتار اصطکاکی نمونه‌های استوانه‌ای تحت فشار را در دمای بالا مورد مطالعه قرار دادند و تغییرات لحظه‌ای اصطکاک در طول آزمایش را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که تغییرات ضریب اصطکاک تاثیر چندانی بر شکل نمونه‌های تغییر شکل یافته ندارد. یائو و همکاران [۱۸]، یک روش ارزیابی اصطکاک با استفاده از آزمایش فشار استوانه بر پایه روش تحلیلی و شبیه‌سازی عددی پیشنهاد داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که میزان بشکه‌ای شدن^۱ علاوه بر ضریب اصطکاک بین قالب و نمونه به میزان کرنش سختی ماده و نسبت طول به قطر^۲ نمونه اولیه نیز بستگی دارد. همچنین آن‌ها مدلی برای بررسی تاثیر اصطکاک و کرنش سختی بر میزان بشکه‌ای شدن برای نسبت‌های طول به قطر مختلف ارائه دادند. با توجه به اینکه در آزمایش فشار استوانه تغییرات انحنا در محل تماس قالب با سطح نمونه تحت فشار، بیشتر از سایر نقاط در سطح جانبی می‌باشد فن و همکاران [۱۹] تغییرات انحنا را در این ناحیه برای ضرایب اصطکاک متفاوت محاسبه نمودند. آن‌ها از نمودارهای تغییرات انحنا بر حسب تغییر ارتفاع به

¹ Geometrical Barrelling Factor (GBF)

² Force Barrelling Factor (FBF)

³ Barrelling

⁴ Aspect ratio

نمودار کالیبراسیون حلقه بدست می‌آید که بر اساس آن می‌توان ضریب اصطکاک فرآیند شکل‌دهی را محاسبه نمود. معمولاً نمودار کالیبراسیون آزمایش حلقه را برای نسبت ابعادی (۲:۳:۶ = ارتفاع : قطر داخلی : قطر خارجی) رسم می‌کنند. جزئیات بیشتر این روش در مراجع [۴، ۵] آمده است. شایان ذکر است که با توجه به مورد قبول بودن این روش نزد محققین، در تحقیق حاضر آزمایش فشار حلقه فقط جهت اعتبارسنجی روش‌های پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- آزمایش فشار استوانه

وقتی یک استوانه تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد، با توجه به میزان اصطکاک بین قالب و نمونه، شکل هندسی متفاوتی به خود می‌گیرد. اگر ضریب اصطکاک بین نمونه و قالب صفر باشد، نمونه تغییر شکل یافته، استوانه‌ای با قطر بیشتر و ارتفاع کمتر خواهد بود. اگر ضریب اصطکاک بین نمونه استوانه‌ای و قالب غیر صفر باشد سطح جانبی استوانه مطابق شکل (۱) نمونه حالت بشکته‌ای پیدا می‌کند و هر چه میزان اصطکاک بیشتر باشد، بشکته‌ای شدن استوانه نیز شدیدتر است. بنابراین قطر قسمت میانی استوانه (DM) نسبت به قطر بالا و پایین استوانه (DT) رشد بیشتری می‌کند. از این تغییر هندسه استوانه میتوان به عنوان پارامتری جهت محاسبه اصطکاک استفاده نمود. در این تحقیق، این پارامتر ضریب بشکته‌ای شدن هندسی نامیده میشود. همچنین در آزمایش فشار استوانه نیروی شکل‌دهی بین قالب و نمونه تحت فشار با افزایش ضریب اصطکاک افزایش خواهد یافت. میزان اختلاف مقدار نیروی لازم برای تغییر شکل استوانه در شرایط با اصطکاک و بدون اصطکاک را نیز می‌توان به عنوان پارامتر جدیدی برای تعیین ضریب اصطکاک به کار برد. این پارامتر با عنوان ضریب بشکته‌ای شدن نیرویی معرفی شده است. محققین پارامترهای مختلفی را پیشنهاد داده اند که براساس آن می‌توان نمودار کالیبراسیون را رسم نموده و پس از جایگذاری داده‌های آزمایشگاهی بر روی آن ضریب اصطکاک را محاسبه کرد. در واقع پیشنهاد این پارامترها، بر اساس شناخت تغییر هندسه نمونه و شناخت و تجربه محققین به صورت ابتکاری صورت می‌گیرد. به عنوان مثال یائو و همکاران [۱۸] از نسبت اختلاف بین قطر بالا و قسمت میانی به ارتفاع استوانه، جهت محاسبه ضریب بشکته‌ای شدن استفاده

آزمایش‌های دارای اصطکاک در مقایسه با آزمایش دارای ضریب اصطکاک صفر به کمک یک تابع نمایی بزرگنمایی شود. نمودار کالیبراسیون حاصل از این دو روش توان تفکیک بالایی داشته لذا پس از جایگذاری داده‌های تجربی در این نمودار می‌توان ضریب اصطکاک را براحتی و دقت بیشتر تعیین نمود. بنابراین می‌توان با انجام یک آزمایش ساده فشار استوانه که برای تعیین منحنی تنش-کرنش انجام می‌گیرد، بر پایه روش ارائه شده در مقاله حاضر به‌طور هم‌زمان و با استفاده از همان داده‌های آزمایشگاهی، ضریب اصطکاک بین قالب و نمونه را نیز بدست آورد که این موضوع نوآوری تحقیق حاضر می‌باشد. لازم به ذکر است، روش تعیین ضریب اصطکاک با استفاده از تغییرات نیروی شکل‌دهی در آزمایش فشار استوانه برای اولین بار در این مقاله ارائه می‌شود.

۲- روش‌های ارزیابی اصطکاک

همان‌طور که در بررسی پیشینه پژوهش ذکر شد، محققین هندسه‌های مختلفی را برای نمونه‌های آزمایش جهت ارزیابی اصطکاک پیشنهاد داده‌اند. در بین این هندسه‌ها دو هندسه حلقه و استوانه به دلیل سادگی ساخت و انجام آزمایش و همچنین سادگی اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش، بیشتر مورد توجه محققین می‌باشند. آزمایش حلقه را می‌توان جهت ارزیابی اصطکاک و همچنین تعیین منحنی تنش-کرنش ماده مورد آزمایش به کار برد [۴]. همچنین از آزمایش فشار استوانه نیز می‌توان جهت تعیین منحنی تنش-کرنش [۴، ۱۴] و تعیین اصطکاک فرآیند شکل‌دهی [۱۴، ۱۸] استفاده نمود.

در این تحقیق دو رویکرد جدید برای ارزیابی اصطکاک ارائه شده است که در آن با استفاده از داده‌های آزمایش فشار استوانه علاوه بر استخراج منحنی تنش-کرنش، اصطکاک نیز به‌طور هم‌زمان با دقت بالاتری تعیین می‌شود.

۲-۱- آزمایش فشار حلقه

مرسوم‌ترین آزمایش جهت تعیین اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی، آزمایش فشار حلقه است که در آن حلقه‌ای با هندسه مشخص تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد و تغییر هندسه آن تابع شرایط اصطکاکی بین حلقه و قالب می‌باشد. در اصطکاک کم قطر داخلی حلقه زیاد شده و در اصطکاک زیاد، قطر داخلی کاهش می‌یابد. با ترسیم تغییرات قطر داخلی بر حسب تغییرات ارتفاع حلقه،

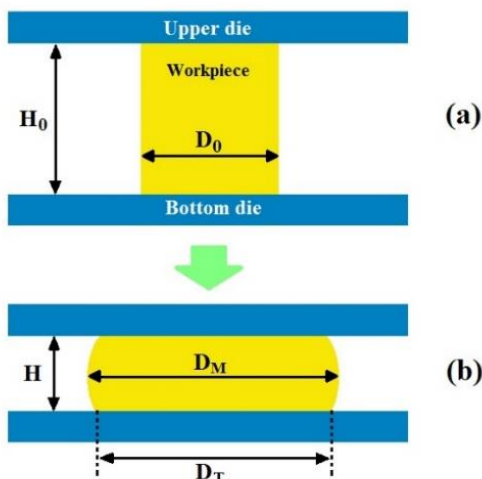
نیروی شکل‌دهی رسم نمود.

$$BBF = \exp\left(n_D \frac{F_\mu - F_0}{F_\mu}\right) \quad (2)$$

در این رابطه، F_μ نیروی شکل‌دهی در حالتی با ضریب اصطکاک μ ، F_0 نیروی شکل‌دهی در حالت بدون اصطکاک ($\mu=0$) و n_D پارامتری است که مانند رابطه (۱) به صورت D_M/D_0 تعریف می‌شود. لازم به ذکر است، نیروی شکل‌دهی در حالت بدون اصطکاک با استفاده از روش عددی شبیه‌سازی شده و تعیین می‌گردد.

۳-۳- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده و رابطه تنش- کرنش ماده شبیه‌سازی شده به صورت $\sigma=100\varepsilon^{0.25}$ (MPa) در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن هندسی و بارگذاری مسأله، مدل اجزا محدود به صورت تقارن محوری مدل‌سازی شده است. قالب به صورت صلب مدل شده و نمونه‌ها از جنس سرب بوده و با نرخ کرنش ۰,۰۶ تحت فشار قرار گرفته‌اند. در استوانه کوتاه از ۵۷۰ و در استوانه بلند از ۷۶۰ المان چهارگره‌ای متقارن محوری CAX4R جهت شبیه‌سازی مسأله استفاده شده است. خواص ماده از نوع سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و معیار تسلیم ون‌میزز فرض شده است. همچنین مدل اصطکاک کلمب و ضریب اصطکاک ثابت برای شبیه‌سازی مسئله در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- تاثیر اصطکاک بر تغییر شکل و بشکه‌ای شدن نمونه استوانه‌ای الف: قبل از تغییر شکل، ب: بعد از تغییر شکل

نمودار کالیبراسیون آزمایش فشار استوانه از شبیه‌سازی عددی فشار استوانه در اصطکاک‌های مختلف بدست آمده

کردند. در مقاله حاضر پارامتر بشکه‌های شدن طوری تعریف شده است که فاصله بین منحنی‌ها در نمودار کالیبراسیون بیشتر شود و بتوان با دقت بالاتری ضریب اصطکاک را تعیین نمود.

۳- ارزیابی اصطکاک

آزمایش فشار استوانه چند دهه بعد از آزمایش فشار حلقه جهت ارزیابی اصطکاک مورد توجه محققین قرار گرفت و با توجه به سادگی انجام آزمایش فشار استوانه و همچنین سادگی ساخت نمونه‌های آزمایش نسبت به آزمایش فشار حلقه، کاربرد آن جهت ارزیابی اصطکاک توسعه بیشتری یافته است. در این بخش ضرایب بشکه‌ای بکار رفته در این تحقیق تعریف شده و روش‌های عددی و تجربی که توأمان جهت ارزیابی اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرند، بررسی می‌شوند.

۳-۱- ضریب بشکه‌ای شدن هندسی

با توجه به اینکه در آزمایش فشار استوانه باید پارامتری به عنوان ضریب بشکه‌ای شدن جهت ارزیابی اصطکاک در نظر گرفته شود، در این تحقیق با انجام چندین آزمایش و رسم نمودار کالیبراسیون با شبیه‌سازی عددی و سعی و خطای بسیار، رابطه (۱) به عنوان ضریب بشکه‌ای شدن هندسی پیشنهاد شده است.

$$GBF = \exp\left(n_D \frac{D_M - D_T}{D_M - D_0}\right) \quad (1)$$

که D_0 ، D_T و D_M در شکل (۱) نشان داده شده‌اند و به ترتیب قطر اولیه استوانه، قطر مقطع بالایی و قطر مقطع میانی پس از تغییر شکل می‌باشند که در شکل نشان داده شده‌اند. در این رابطه ضریب بزرگنمایی می‌باشد که با توجه به اینکه همواره قطر مقطع میانی (D_M) در آزمایش فشار استوانه در حال افزایش است، می‌توان ضریب بزرگنمایی (n_D) را به صورت D_M/D_0 در نظر گرفت تا فاصله بین منحنی‌ها در نمودار کالیبراسیون اصطکاک استوانه افزایش یافته و بتوان به سادگی مقدار ضریب اصطکاک را تعیین نمود.

۳-۲- ضریب بشکه‌ای شدن نیرویی

با توجه به اینکه با افزایش ضریب اصطکاک در آزمایش فشار استوانه، نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد، می‌توان با استفاده از رابطه (۲) به کمک یک تابع نمایی و بزرگنمایی این اختلاف، نمودار کالیبراسیون را بر حسب تغییرات

ابتدا ریخته‌گری و سپس ماشین‌کاری شده‌اند تا به ابعاد دلخواه درآیند. ریخته‌گری در دمای نزدیک به نقطه ذوب انجام شده است و سپس نمونه‌ها به سرعت سرد شده‌اند تا دانه‌بندی ریزتر بوده و نمونه‌ها خواص همگن‌تری داشته باشند. در نهایت با ماشین‌کاری، نمونه‌های استوانه‌ای بدست آمده‌اند. جزئیات عناصر موجود در نمونه‌های سربی در جدول ۱ آورده شده است. همچنین منحنی تنش-کرنش سرب که از آزمایش فشار استوانه بدست آمده است [۱۴] به صورت شکل (۵) می‌باشد.

جهت بررسی پارامترهای مورد نیاز دو نسبت ابعادی ($H_0:D_0$) برای استوانه در نظر گرفته شده است. استوانه کوتاه دارای ارتفاع ۱۸mm، قطر ۱۵mm و استوانه بلند دارای ارتفاع ۲۴mm و قطر ۱۵mm می‌باشند. روان‌کارهای استفاده شده شامل روان‌کارهای مایع و جامد (پودری) می‌باشند و عبارتند از: وازلین، کائولین، تیتانیا یا اکسید تیتانیوم (TiO_2)، وازلین به همراه ورق‌های پلاستیکی و یک هم حالت بدون روان‌کار انجام شده است.

تمامی این روان‌کارها برای نمونه‌های استوانه‌ای کوتاه و بلند و همچنین نمونه‌های حلقه مورد استفاده قرار گرفته و آزمایش شده‌اند. تمامی آزمایش‌ها به صورت بازه‌ای^۱ انجام شده است. یعنی تغییر ارتفاع کلی که به صورت کاهش ارتفاع به حدود ۷۰٪ ارتفاع اولیه می‌باشد در چندین مرحله انجام شده است. در هر مرحله پس از تعیین نیرو توسط نیروسنج^۲، نمونه برداشته شده، ابعاد و پارامترهای مورد نظر یادداشت شده و پس از روان‌کاری مجدد، آماده انجام آزمایش در مرحله بعد شده است. برای افزایش دقت اندازه‌گیری قطر نمونه‌ها در هر مرحله، اندازه‌گیری بر روی دو قطر عمود بر هم انجام شده و سپس میانگین آن لحاظ شده است. شکل (۶) دستگاه، قالب‌های مورد استفاده برای آزمایش و شکل قرارگیری نمونه را بین قالب‌ها نشان می‌دهد. شکل (۷) نمونه‌های اولیه و آزمایش شده برای هر سه مدل هندسی (یک حلقه و دو نسبت ابعادی استوانه) که با استفاده از روان‌کارهای مختلف انجام شده است را نشان می‌دهد.

۴- بحث و نتایج

آزمایش فشار حلقه یک آزمایش شناخته شده برای محاسبه اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی فلزات است.

استوانه‌های شبیه‌سازی شده دارای نسبت ابعادی (قطر:ارتفاع)، $H_0:D_0=1/2$ و $H_0:D_0=1/6$ می‌باشند. همچنین آزمایش فشار حلقه نیز انجام شده و نمودار کالیبراسیون آن برای نسبت ابعادی ($D_0:D_i:H=6:3:2$) رسم شده است. شکل (۲) نتایج توزیع کرنش لگاریتمی بیشینه حاصل از شبیه‌سازی عددی را برای استوانه بلند در دو ضریب اصطکاک متفاوت نشان می‌دهد.

شکل (۳) نمودار کالیبراسیون مربوط به استوانه کوتاه ($H_0:D_0=1/2$) را نشان می‌دهد. محور افقی در این نمودارها، کرنش حقیقی و محور عمودی، در نمودار $a-2$ ضریب بشکه‌ای شدن هندسی (رابطه (۱)) و در نمودار $b-2$ ضریب بشکه‌ای شدن نیرویی (رابطه (۲)) می‌باشد. وقتی در نمودار کالیبراسیون، محور افقی، کرنش حقیقی در نظر گرفته می‌شود منحنی مربوط به اصطکاک‌های مختلف فاصله چشمی بیشتری پیدا می‌کنند. در تغییرات ارتفاع کم (ابتدای نمودار) مقدار ضریب کالیبراسیون هندسی به بینهایت میل می‌کند به همین منظور در نمودار کالیبراسیون هندسی استوانه، مقادیر ابتدایی حذف می‌شوند. البته حذف ابتدای نمودار تأثیری در نتایج حاصله ندارد، فقط باعث می‌شود انسجام نمودار بهتر شده و ارتفاع نمودار کالیبراسیون کمتر شود.

شکل (۴) نمودار کالیبراسیون مربوط به حلقه ($D_0:D_i:H=6:3:2$) می‌باشد. محور افقی می‌تواند درصد کاهش ارتفاع، کرنش مهندسی و یا کرنش حقیقی تعریف شود اما مشاهده شده است که با انتخاب کرنش حقیقی فاصله منحنی‌ها در نمودار کالیبراسیون افزایش می‌یابد و به همین دلیل محور افقی کرنش حقیقی (رابطه کرنش حقیقی) انتخاب شده است. محور عمودی نیز درصد تغییرات قطر داخلی می‌باشد.

۳-۴ بررسی تجربی

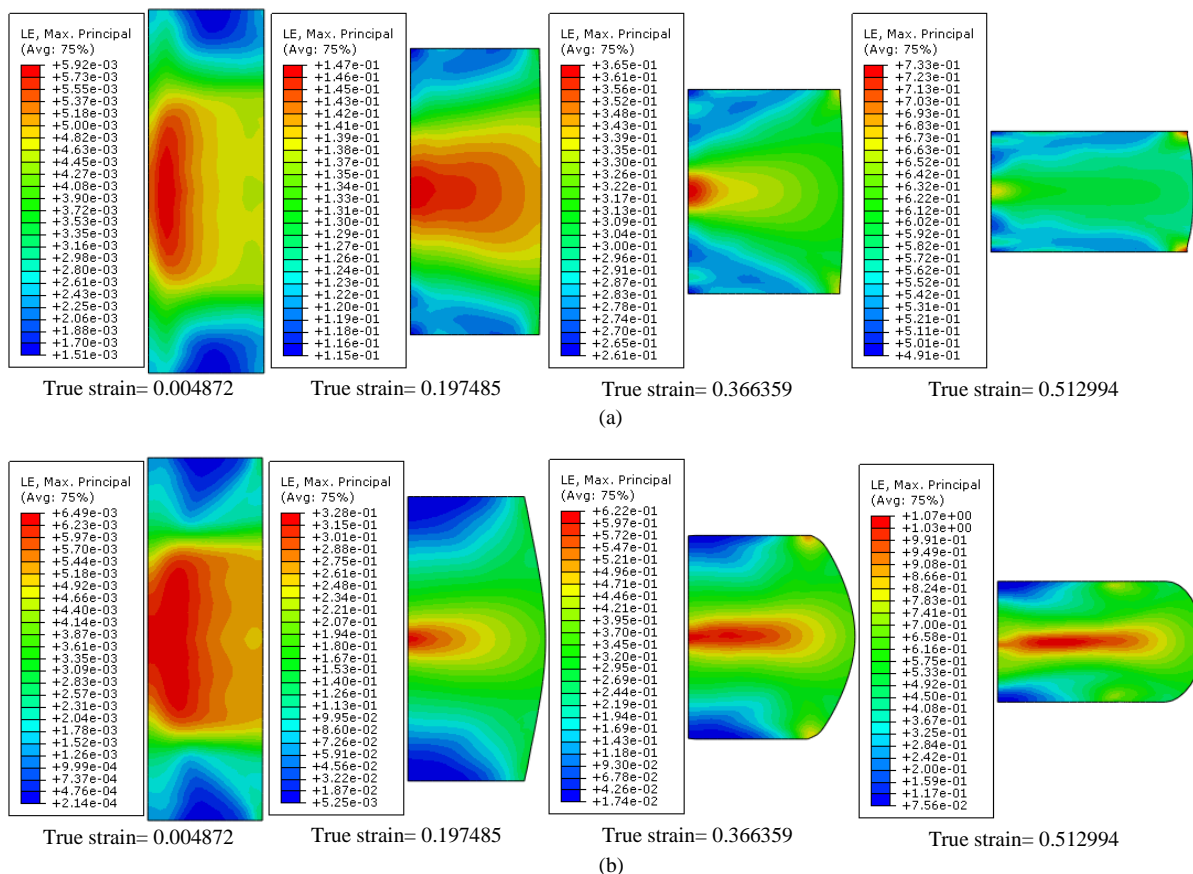
برای بررسی تجربی روش‌های پیشنهاد شده در این مقاله نمونه‌های استوانه‌ای با چند روان‌کار مورد آزمایش قرار گرفته و ضریب اصطکاک فرآیند تعیین می‌شود. برای انجام آزمایش‌ها از نمونه‌های سربی استفاده شده است. سرب ماده نرمی است و شکل‌دهی آن ساده‌تر و با نیروی کمتری صورت می‌گیرد و همچنین با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود، استفاده از آن مورد توجه قرار گرفته است. نمونه‌ها

¹ Loadcell

² Incremental

عنوان خواص ماده به نرم‌افزار داده شده و برای ضرایب اصطکاک مختلف شبیه‌سازی انجام شده است و با استفاده از داده‌های نرم‌افزار نمودار کالیبراسیون مربوط به آزمایش حلقه رسم شده است. در شکل (۸) نمودار کالیبراسیون آزمایش فشار حلقه نشان داده شده است. جهت تعیین ضریب اصطکاک روان کارهای مختلف، داده‌های تجربی حاصل از آزمایش فشار حلقه با روانکارهای متفاوت، بر روی شکل (۸) جایگذاری شده است.

تاکید می‌شود که هدف از انجام آزمایش حلقه اعتبارسنجی نتایج حاصل از دو روش ارائه شده در این مقاله می‌باشد. برخی محققین [۷،۵] گزارش کرده‌اند که نمودار کالیبراسیون حلقه تابع خواص ماده می‌باشد. برای این منظور با توجه به منحنی تنش- کرنش بدست آمده برای نمونه‌های سربی، نمودار کالیبراسیون مربوط به این منحنی تنش- کرنش (شکل ۵) به کمک شبیه‌سازی عددی رسم شده است. به عبارت دیگر، منحنی تنش- کرنش سرب به



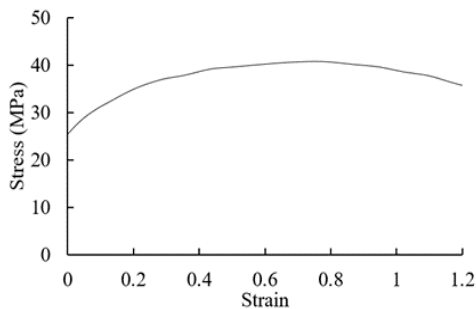
شکل ۲- توزیع بیشینه کرنش لگاریتمی اصلی در نمونه استوانه‌ای بلند؛ الف) ضریب اصطکاک ۰/۰۳ و ب) ضریب اصطکاک ۰/۵۷۷

برای حفظ وضوح و دقت نمودار، منحنی‌های غیر لازم ترسیم نشده‌اند. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که ضرایب اصطکاک بدست آمده برای تیتانیا (TiO_2)، کائولین، وازلین به ترتیب ۰/۵۷۷، ۰/۳ و ۰/۰۹ می‌باشند، همچنین استفاده از ورق‌های پلاستیکی به همراه وازلین، اصطکاک را تا مقدار ۰/۰۳ کاهش می‌دهد. ضریب اصطکاک حالت خشک (بدون روان‌کار) هم ۰/۱۷ بدست آمده است. همانطور که پیشتر ذکر شد، محققین گزارش نموده‌اند که نمودار کالیبراسیون در آزمایش فشار حلقه برای مواد مختلف متفاوت است.

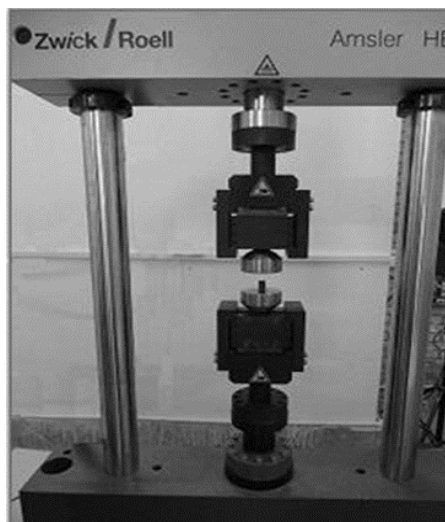
جدول ۱- جزئیات عناصر موجود در ماده تشکیل دهنده

نمونه‌های سربی آزمایش‌ها

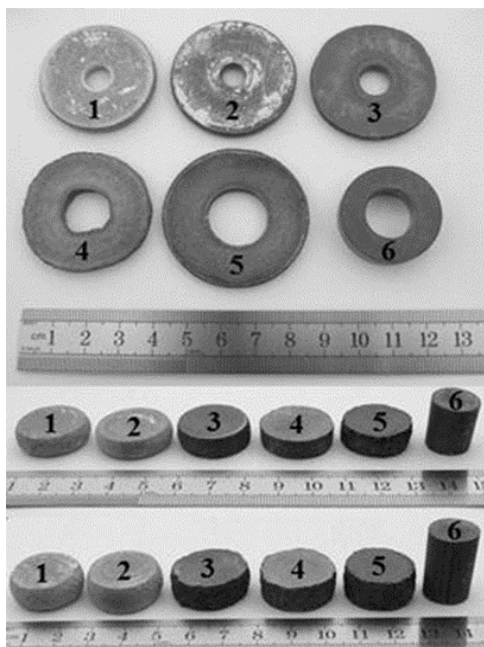
عناصر	درصد عناصر
Pb	۹۸/۹۲
Si	۰/۲۷
Cu	۰/۱۵
Zr	۰/۳۴
Ca	۸۴۳ PPM
Cr	۰/۱۱
K	۰/۱۳



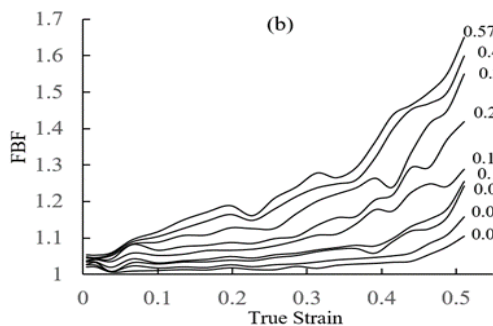
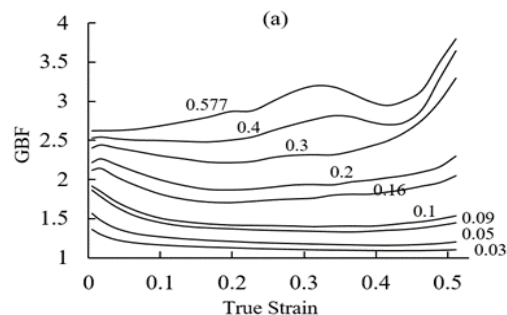
شکل ۵- منحنی تنش- کرنش سرب



شکل ۶- دستگاه استفاده شده برای آزمایش‌ها به همراه قالب‌ها و نمونه استوانه‌ای

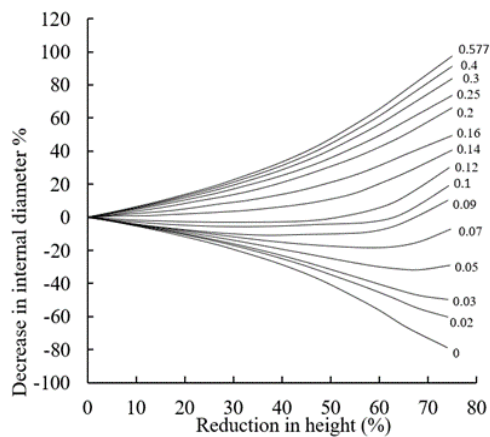


شکل ۷- نمونه‌های سربی قبل و بعد از آزمایش در شرایط اصطکاکی مختلف: ۱. اکسید تیتانیوم، ۲. کائولین، ۳. بدون روانکار، ۴. وازلین، ۵. وازلین و ورق‌های پلاستیکی و ۶. ابعاد اولیه نمونه



شکل ۸- نمودار کالیبراسیون مربوط به استوانه کوتاه همراه با مقادیر ضریب اصطکاک، (H:D=۱/۲) الف) ضریب بشکهای شدن هندسی، ب) ضریب بشکهای شدن نیرویی.

برای بررسی این مطلب در مورد نمونه‌های استوانه‌ای و نمودار کالیبراسیون بدست آمده براساس روش پیشنهاد شده در این تحقیق، چهار معادله فرضی با معادله هالومون [۲۱] $(\sigma = k\epsilon^n)$ در نظر گرفته شده است و نمودار کالیبراسیون آن‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

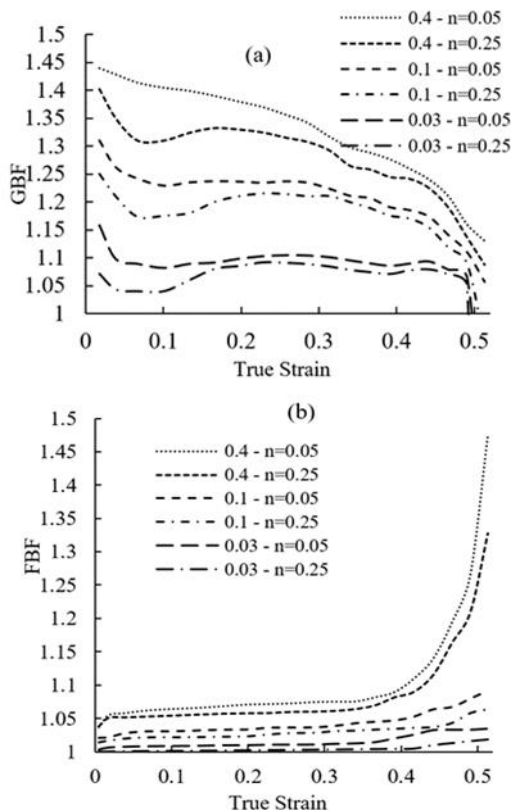


شکل ۹- نمودار کالیبراسیون مربوط به حلقه همراه با مقادیر ضریب اصطکاک، (D_o:D_i:H=۶:۳:۲)

آزمایش فشار استوانه برای چهار ماده با معادله تنش-کرنش هالومون با معادلات $\sigma = 100\epsilon^{0.05}$ (MPa)، $\sigma = 100\epsilon^{0.25}$ (MPa)، $\sigma = 200\epsilon^{0.05}$ (MPa) و $\sigma = 200\epsilon^{0.25}$ (MPa) شبیه‌سازی شده است تا اثر جنس بر روی نمودار کالیبراسیون اصطکاک بررسی شود.

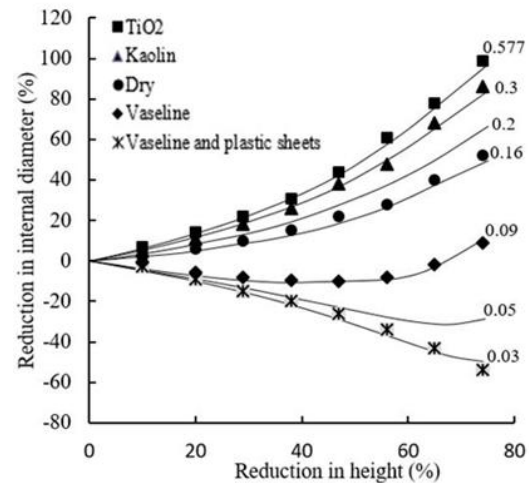
کالیبراسیون خاص برای اصطکاک‌های ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۴ را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان دریافت تغییر هندسه استوانه بر نمودار کالیبراسیون تاثیرگذار است. بنابراین برای محاسبه اصطکاک با استفاده از آزمایش فشار استوانه، باید نمودار کالیبراسیون با توجه به منحنی تنش-کرنش ماده مورد نظر و همچنین هندسه (نسبت ابعادی) استوانه تعیین گردد و سپس با جایگذاری داده‌های آزمایشگاهی بر روی آن، ضریب اصطکاک روانکار مورد نظر محاسبه شود.

با توجه به اینکه منحنی کالیبراسیون آزمایش فشار استوانه به جنس و نسبت ابعادی وابسته است. بنابراین برای محاسبه اصطکاک در هر آزمایش، باید ابتدا منحنی‌های مربوط به تمام ضرایب اصطکاک در نمودار کالیبراسیون هندسی یا نیرویی بر اساس منحنی تنش-کرنش سرب (شکل ۵) برای نسبت ابعادی مربوطه رسم شده، سپس با جایگذاری داده‌های آزمایشگاهی روانکارهای مختلف بر روی این نمودار ضریب اصطکاک محاسبه گردد.



شکل ۹- تاثیر نمای کرنش سختی بر نمودار کالیبراسیون استوانه بلند، الف) ضریب بشکه‌ای شدن هندسی، ب) ضریب بشکه‌ای شدن نیرویی

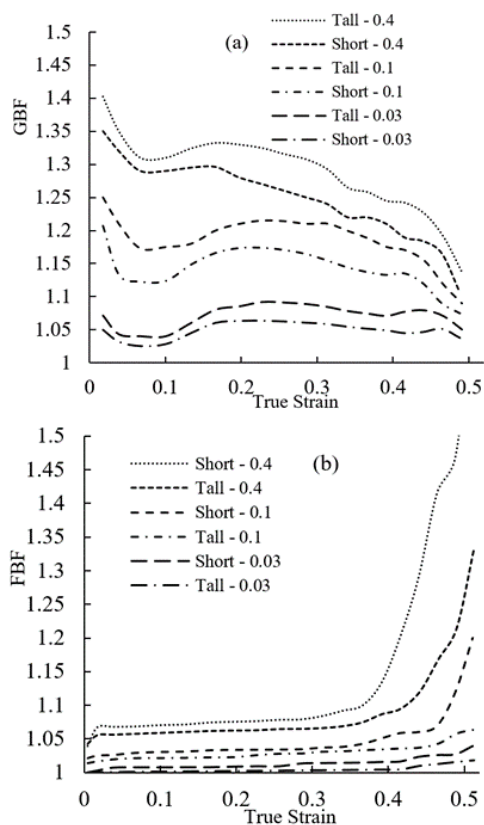
شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمودار کالیبراسیون هندسی و نیرویی اصطکاک برای دو استوانه کوتاه و بلند را بر اساس



شکل ۸- نمودار کالیبراسیون آزمایش حلقه به همراه داده‌های تجربی روانکارهای مختلف

در هر مورد این معادله به عنوان خواص ماده به نرم‌افزار داده شده و شبیه‌سازی عددی بر اساس آن انجام شده است. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که تغییر ضریب استحکام (k) در معادله هالومون باعث تغییر نمودار کالیبراسیون استوانه‌ها نمی‌شود و نمودارها بدون ذره‌ای اختلاف به طور کامل بر هم منطبق می‌شوند. درحالی‌که تغییر نمای کرنش سختی (n) باعث تغییر نمودار کالیبراسیون می‌شود، به عنوان مثال، شکل (۹) چند منحنی کالیبراسیون هندسی و نیرویی را برای دو ماده با معادله $\sigma=100\epsilon^{0.25}$ (MPa) و $\sigma=100\epsilon^{0.05}$ (MPa) در استوانه بلند و در اصطکاک‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییر نمای کرنش سختی در معادله هالومون باعث تغییر نمودار کالیبراسیون هندسی و نیرویی می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در آزمایش فشار استوانه هم مانند آزمایش فشار حلقه نمودار کالیبراسیون وابسته به جنس ماده می‌باشد. بنابراین می‌توان دریافت که در این تحقیق استفاده از نمونه‌های فولادی و آلومینیومی مزیتی ندارد و فقط نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه نمودار کالیبراسیون برای هر ماده باید جداگانه بدست آید، استفاده از نمونه‌های سربی جهت انجام آزمایش گزینه مناسبی می‌باشد.

برای بررسی تاثیر نسبت ابعادی ($H_0:D_0$) بر منحنی کالیبراسیون، دو استوانه با نسبت ابعادی $1/6$ و $1/2$ در نظر گرفته شده و نمودار کالیبراسیون هندسی و نیرویی این دو هندسه با استفاده از شبیه‌سازی عددی ماده $\sigma=100\epsilon^{0.25}$ (MPa) بدست آمده است. شکل (۱۰) چند منحنی



شکل ۱۰- تاثیر نسبت طول به قطر بر منحنی کالیبراسیون نمونه‌های استوانه‌ای، الف) ضریب بشکهای شدن هندسی، ب) ضریب بشکهای شدن نیرویی.

بر روی نمودار کالیبراسیون آزمایش حلقه که از روش عددی به دست آمده‌اند تطابق مناسبی نداشته باشند؛ زیرا در شبیه‌سازی عددی قطر داخلی در مقطع میانی حلقه کاملاً قابل دسترس است و نمودار کالیبراسیون بر اساس آن رسم می‌شود. مقایسه بین شکل (۸) که مربوط به نمودار کالیبراسیون حلقه و شکل‌های (۱۱) و (۱۲) که مربوط به نمودار کالیبراسیون استوانه می‌باشند نشان می‌دهد که منحنی‌های مربوط به ضرایب اصطکاک بالاتر در نمودار کالیبراسیون آزمایش فشار استوانه، فاصله بیشتری نسبت به منحنی‌های متناظر در آزمایش فشار حلقه دارند. بنابراین دقت بیشتری را جهت محاسبه ضریب اصطکاک پس از جایگذاری نتایج آزمایشگاهی روی نمودار کالیبراسیون فراهم می‌کنند. این نکته به راحتی از مقایسه فاصله بین منحنی‌های مربوط به ضرایب اصطکاک 0.2 تا 0.577 در شکل (۸) و شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشهود است. بنابراین دو روش ارائه شده در این مقاله، در ضرایب اصطکاک بالا، توانایی بیشتری جهت تعیین ضریب اصطکاک نسبت به آزمایش معروف فشار حلقه دارند.

منحنی تنش- کرنش سرب نشان می‌دهند. داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش روان کارهای مختلف بر روی این شکل جایگذاری شده تا ضریب اصطکاک هر آزمایش تعیین گردد.

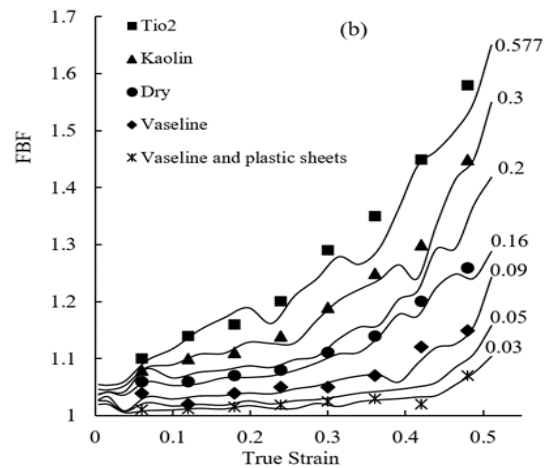
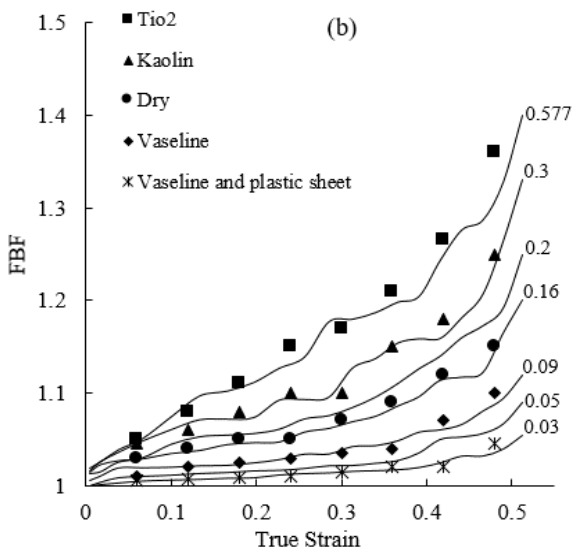
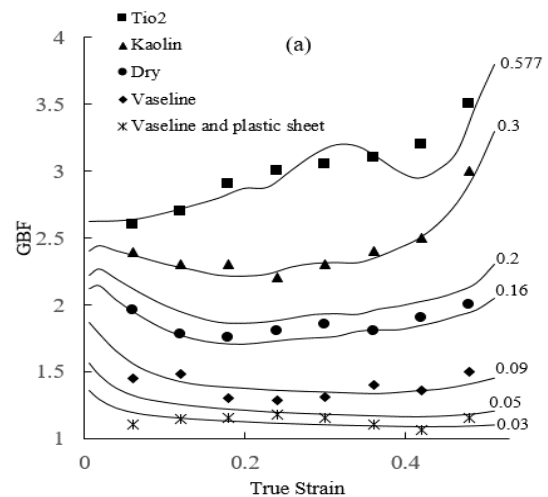
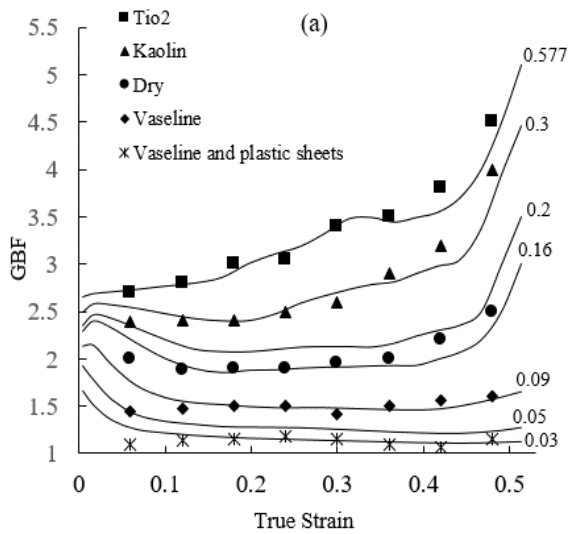
نتایج حاصل از محاسبه ضریب اصطکاک بر اساس شکل‌های (۸)، (۱۱) و (۱۲) در جدول ۲ خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از آزمایش فشار استوانه با آزمایش فشار حلقه یکسان است. علت یکسان بودن نتایج آزمایش فشار استوانه‌ها با آزمایش فشار حلقه، دقت در هنگام آزمایش و رعایت شرایط آزمایشگاهی کاملاً یکسان می‌باشد. به عنوان مثال باید اندازه‌گیری در موقعیت مناسب نمونه و با دقت صدم میلی‌متر صورت گیرد و لازم است تا شرایط آزمایش از نظر دمای محیط، دمای نمونه، دمای روان کار و صافی سطح نمونه‌ها هنگامی که یک روان کار برای آزمایش فشار استوانه و حلقه مورد بررسی قرار می‌گیرد کاملاً یکسان باشند.

آزمایش فشار استوانه یک آزمایش شناخته شده جهت استخراج منحنی تنش-کرنش مواد در شکل‌دهی حجمی فلزات می‌باشد. با توجه به روش‌های ارائه شده در این مقاله می‌توان با استفاده از همان داده‌های آزمایشگاهی، ضریب اصطکاک فرآیند را نیز محاسبه نمود.

در آزمایش فشار استوانه با اندازه‌گیری نیرو و یا تغییرات هندسی نمونه مورد نظر می‌توان ضریب اصطکاک را تعیین نمود. هرچند در مورد روش هندسی، نیاز به اندازه‌گیری نیرو هم نبوده و فقط داده‌های آزمایشگاهی که نشانگر تغییرات هندسه استوانه می‌باشد برای تعیین ضریب اصطکاک فرآیند کافی است.

تولید نمونه‌های استوانه‌ای شکل نسبت به نمونه‌های حلقه‌ای به خصوص برای فلزات نرمی مانند سرب و مس ساده‌تر می‌باشد. همچنین ماشین‌کاری نمونه‌های استوانه‌ای نیز به مراتب ساده‌تر از نمونه‌های حلقه‌ای شکل است.

در آزمایش فشار استوانه علاوه بر محاسبه نیرو به کمک نیروسنج، پارامترهای هندسی مورد نیاز عبارتند از: ارتفاع، قطر قسمت بالایی و قطر قسمت میانی استوانه که به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشند؛ اما در نمونه‌های حلقه‌ای شکل، اندازه‌گیری قطر داخلی دقت اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد. زیرا گاهی تقعر سطح داخلی حلقه، اندازه‌گیری قطر داخلی در سطح میانی را بسیار دشوار می‌سازد و باعث می‌شود جایگذاری داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۱۱- نمودار کالیبراسیون استوانه کوتاه سربی به همراه داده‌های تجربی روان کارهای مختلف، الف) ضریب بشکه‌ای شدن هندسی، ب) ضریب بشکه‌ای شدن نیرویی.

شکل ۱۲- نمودار کالیبراسیون استوانه بلند سربی به همراه داده‌های تجربی روان کارهای مختلف، الف) ضریب بشکه‌ای شدن هندسی، ب) ضریب بشکه‌ای شدن نیرویی.

در نهایت می‌توان دریافت که آزمایش فشار استوانه به دلیل سادگی آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی، روش ساده انجام آزمایش‌ها، دقت بیشتر در اندازه‌گیری ابعاد هندسی نسبت به آزمایش فشار حلقه و همچنین دقت بیشتر در اصطکاک‌های بالاتر، می‌تواند جایگزین مناسبی برای آزمایش فشار حلقه باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در رویکردهای جدید ارائه شده، با تعریف پارامترهایی به نام ضریب بشکه‌ای شدن هندسی و نیرویی در آزمایش فشار استوانه، می‌توان ضریب اصطکاک فرآیندهای شکل‌دهی حجمی فلزات را تعیین نمود. پس از بررسی این مطلب که

جدول ۲- ضریب اصطکاک روان کارهای استفاده شده در آزمایش‌های مختلف

روان کار	استوانه بلند		استوانه کوتاه		حلقه	-
	GBF	FBF	GBF	FBF		
اکسید تیتانیوم (TiO ₂)	۰/۵۷۷	۰/۵۷۷	۰/۵۷۷	۰/۵۷۷	۰/۵۷۷	-
کانولین خشک (بدون روآکار)	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	-
وازلین و ورق‌های پلاستیکی	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	-
وازلین	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	-
وازلین و ورق‌های پلاستیکی	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	-

۰/۲ به جهت فاصله بیشتر منحنی‌های نمودار کالیبراسیون دقت بیشتری دارد. با توجه به دو روش ارائه شده، می‌توان با استفاده از داده‌های مربوط به آزمایش فشار استوانه که جهت تعیین منحنی تنش- کرنش انجام می‌شود، ضریب اصطکاک فرآیند را نیز تعیین نمود. همچنین استفاده از تغییرات نیروی شکل‌دهی در حین آزمایش فشار استوانه جهت محاسبه ضریب اصطکاک برای اولین بار در این مقاله ارائه شده است.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه صنعتی قوچان جهت حمایت مالی این پژوهش در قالب قرارداد طرح پژوهشی به شماره ۱۰۰۶ تقدیر می‌گردد.

نمودار کالیبراسیون استوانه تابع جنس ماده مورد آزمایش می‌باشد ابتدا نمودار کالیبراسیون هندسی و نیرویی آزمایش فشار استوانه با توجه به ضرایب بشکه‌ای شدن رسم می‌شود و با جایگذاری داده‌های تجربی بر روی آن ضرایب اصطکاک تعیین می‌شوند. نمودار کالیبراسیون آزمایش فشار استوانه با تغییر نمای کرنش سختی ماده مورد آزمایش و تغییر نسبت ابعادی نمونه‌ها، تغییر می‌کند. در روش هندسی، فقط نیاز به اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع، قطر میانی و قطر بالایی استوانه می‌باشد و اندازه‌گیری نیرو لازم نیست. اندازه‌گیری‌ها در آزمایش فشار استوانه برخلاف آزمایش فشار حلقه، ساده و قابل دسترس بوده و خطای اندازه‌گیری بسیار کم است. آزمایش فشار استوانه نسبت به آزمایش مرسوم فشار حلقه در ضریب اصطکاک‌های بیشتر از حدود

مراجع

- [۱] حشمت اله حقیقت و حامد شایسته، "تحلیل کرانه بالایی فرآیند اکستروژن ورق دو فلزی با قالب گوه ای شکل"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۲۸، بهار ۱۳۹۱، صفحه ۴۳-۵۱.
- [۲] محمدرضا وزیری سرشک، محمود سلیمی و محمد مشایخی، "فرم ریاضی مدل ساختاری ماده قابل کاربرد در تحلیل رفتار پلاستیک فلزات در مدل‌سازی ماشین‌کاری"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۱، زمستان ۱۳۹۱، صفحه ۳۷-۴۸.
- [3] M. Kunogi, "A new method of cold extrusion", Journal of the Scientific Research Institute, Vol. 50, 1956, pp. 215-246.
- [4] E. M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, 1th ed., McGraw-Hill, 1991.
- [5] H. Sofuoglu, J. Rasty, "On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test", Tribology International, Vol. 32, No. 6, 1999, pp. 327-335.
- [6] I. Kačmarčík, D. Movrin, A. Ivanišević, "One contribution to the friction investigation in bulk metal forming", Journal for Technology of Plasticity, Vol. 36, No. 1, 2011, pp. 35-48.
- [7] A. M. Camacho, A. I. Torralvo, C. Bernal, L. Sevilla, "Investigations on Friction Factors in Metal Forming of Industrial Alloys", Procedia Engineering, Vol. 63, 2013, pp. 564-572.
- [۸] مجتبی دهقان، فتح‌الله قدس و جواد دعایی، "شبیه‌سازی و بررسی آزمون فشار حلقه به منظور اندازه‌گیری اصطکاک در فرآیند فورج داغ"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۱، زمستان ۱۳۹۱، صفحه ۵۹-۶۷.
- [9] D. Zhang, B. Liu, J. Li, M. Cui, S. Zhao, "Variation of the friction conditions in cold ring compression tests of medium carbon steel", Friction, 2019, pp. 1-12.
- [10] R. Fadli, W. A Wirawan, A. Zulkarnaen, H. B. Wahjono. "The Influence Of Temperature And Lubrication Variation On The Dimension Change In Ring Compression Test Using Ansys Software", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1273, No. 1, IOP Publishing, 2019, p. 012080.
- [11] X. Tan, P. A. F. Martins, N. Bay, W. Zhang, "Friction studies at different normal pressures with alternative ring-compression tests", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80-81, 1998, pp. 292-297.
- [12] Q. Zhang, E. Felder, S. Bruschi, "Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 17, 2009, pp. 5720-5729.
- [13] R. Thakur, M. Gangwar, P. Jain, "Development of New Design of Specimens for Friction Determination in Metal Forming", Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 3, No. 5, 2012, pp. 21-26.

- [14] F. Fereshteh-Saniee, F. Fatehi-Sichani, "An investigation on determination of flow curves at room temperature and under forming conditions", *Journal of materials processing technology*, Vol. 177, No. 1, 2006, pp. 478-482.
- [15] R. Ebrahimi, A. Najafizadeh, "A new method for evaluation of friction in bulk metal forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, No. 2, 2004, pp. 136-143.
- [16] S. Solhjoo, "A note on "Barrel Compression Test": A method for evaluation of friction", *Computational Materials Science*, Vol. 49, No. 2, 2010, pp. 435-438.
- [17] Y. Li, E. Onodera, A. Chiba, "Friction coefficient in hot compression of cylindrical sample", *Materials transactions*, Vol. 51, No. 7, 2010, pp. 1210-1215.
- [18] Z. Yao, D. Mei, H. Shen, Z. Chen, "A friction evaluation method based on barrel compression test", *Tribology Letters*, Vol. 51, No. 3, 2013, pp. 525-535.
- [19] X.G. Fan, Y.D. Dong, H. Yang, P.F. Gao, M. Zhan, "Friction assessment in uniaxial compression test: A new evaluation method based on local bulge profile", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 243, No. 1, 2017, pp. 282-290.
- [20] Y. N. Loginov, A. I. Golodnov, I. S. Stepan, "Effect of Friction on Compression Test of Ti-6Al-4V with Open-Cellular Structure", *Solid State Phenomena*, Vol. 299, 2020, pp. 452-456.
- [21] J.H. Hollomon, "Tensile deformation", *Trans. AIME* 162, Vol. 162, 1945, pp. 268-288.