

# بررسی تاثیر محلول نانو ذرات در رفتار اصطکاک کولمبی در شکل دهی آلیاژ

## آلومینیوم به روش آزمون فشار حلقه

ولی علی میرزالو، سعید شیدایی گورچین قلعه، پیمان مشهدی کشتیان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

(دریافت مقاله: ۹۵/۰۵/۰۶ - پذیرش مقاله: ۹۶/۰۴/۱۹)

### چکیده

اصطکاک یکی از مهم ترین فاکتورهای مؤثر بر فرآیندهای شکل دهی فلزات است. علاوه بر رعایت یک سری اصول اساسی، انجام روانکاری صحیح، بهترین روش کنترل اصطکاک و سایش در یک فرآیند است. یکی از روش های ارزیابی تاثیر روان کارها بر اصطکاک در فرآیندهای شکل دهی، آزمون فشار حلقه است. با استفاده از منحنی های کالیبراسیون در فرآیند فشار حلقه، ضریب اصطکاک محاسبه می شود. در این مقاله تاثیر محلول نانو ذرات اکسید مس و آلومینا در روانکارهای پایه پارافین و روغن ۱۰ در تاثیر بر اصطکاک طبق مدل اصطکاک کولمب بررسی شده است. از روش تاگوچی و آرایه متعامد L8 با توجه به تعداد عوامل مورد بررسی، جهت طراحی آزمایش ها و بدست آوردن حالت بهینه استفاده شده است. با انجام آزمایشات پیشنهادی و بکارگیری منحنی های کالیبراسیون برای ماده A17xxx، ضرایب اصطکاک کولمب برای روانکارهای مختلف بدست آمده است. پارامترهای درصد وزنی نانو ذرات، نوع روانکار پایه و نوع نانو ذرات افزودنی، به عنوان متغیرهای ورودی، و ضریب اصطکاک کولمب به عنوان متغیرهای هدف در نظر گرفته شدند. با روش آنالیز واریانس میزان تاثیرگذاری هر متغیر ورودی بر روی پارامتر هدف بررسی شد و مقادیر پارامترهای ورودی جهت کمینه کردن مقدار ضریب اصطکاک با روش سیگنال به نویز تاگوچی استخراج شدند. نتایج نشان می دهد که بیشترین تاثیر را درصد وزنی نانو ذرات با سهم درصد ۶۲/۱۵ روی ضریب اصطکاک دارد و با افزایش درصد وزنی نانو ذرات، ضریب اصطکاک افزایش می یابد. همچنین بهترین ترکیب برای به حداقل رساندن ضریب اصطکاک، ترکیب ۰/۸٪ نانو ذرات آلومینا در روانکار روغن ۱۰ بدست آمد.

واژه های کلیدی: اصطکاک، نانو ذرات، آزمون فشار حلقه، منحنی کالیبراسیون، تاگوچی.

## Effect of the Nano Particle Solution on the Coulomb Friction Behavior of Aluminum Alloy Forming Process Using the Ring Compression Test

Vali Alimirzaloo, Saeid Sheydayi Gurchin Qaleh, Peyman Mashhadi Keshtiban

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

(Received 27 July 2016, accepted 10 July 2017)

### Abstract

Friction is one of the important factors influencing metal forming processes e.g. forging. Besides considering a set of basic principles, efficient lubrication is the best way to control friction and wear. One way to evaluate the effect of lubricants on the friction in forming processes, is ring compression test. By using calibration curves in the forging process, friction coefficient is calculated. In this paper, the effects of nano-particles solution including copper oxide and alumina within paraffin and oil-10 as the base lubricants on the Coulomb friction model has been studied. In order to obtain the optimal design of experiments Taguchi method has been used and considering the number of investigating factors, L8 orthogonal array selected. After carrying out all suggested tests and using calibration curves for A17xxx, Coulomb friction coefficients for different lubricants have been obtained. Weight percentage of nano-particles and the type of both base lubricant and nano-particles additives, considered as input variables, and the Coulomb friction coefficient selected as objective variable. Through variance analysis the effectiveness of each input variable on the objective evaluated and values of the input parameters to minimize friction coefficient by Taguchi signal-to-noise method were extracted. The results show that the greatest impact belongs to weight percentage of nanoparticles with a share of 62.15 percent on the friction coefficient and increasing the weight percentage of nanoparticles lead to increasing the friction coefficient. Also, the best combination to minimize friction coefficient is 0.8% solution of alumina nanoparticles with oil 10 as base lubricant.

**Keywords:** Friction, Nano Particles, Ring Compression Test, Calibration Curve, Taguchi.

**E-mail of Corresponding author:** v.alimirzaloo@urmia.ac.ir.

## مقدمه

هدف از افزایش دقت در فرآیندهای شکل دهی فلزات تولید قطعات تغییر شکل یافته بدون عیب و با کمترین مصرف مواد و هزینه ابزار است. به منظور دستیابی به این موضوع دانستن دقیق خواص مواد، پارامترهای فرآیند، ابزار شکل دهنده و رفتار سطحی مانند اصطکاک نیاز است. اصطکاک بین سطح ابزار و قطعه کار تأثیر مهمی روی تغییر شکل مواد، نیرو و انرژی مورد نیاز شکل دهی، تنش سیلان، سطح نهایی قطعه، کیفیت محصول، عمر کار ابزار، قابلیت شکل پذیری و سایش قالب دارد. برای ارزیابی اصطکاک و تاثیر روانکارها، از روش های مختلفی استفاده می شود. آزمون فشار حلقه به طور گسترده برای مطالعه تحلیلی، تجربی و عددی اصطکاک در فرآیندهای شکل دهی حجمی مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. در این آزمایش، یک نمونه حلقه ای شکل تخت، تا مقدار مشخصی از کاهش ارتفاع فشرده می شود. تغییر در قطرهای داخلی و خارجی حلقه پرس شده به میزان بسیار زیادی به اصطکاک در سطح تماس قالب- حلقه بستگی دارد. اگر اصطکاک مساوی صفر باشد، حلقه مانند یک دیسک توپر تغییر شکل می یابد که در آن هر بخش با نرخی متناسب با فاصله اش از مرکز به طور شعاعی سیلان می کند. اصطکاک این سیلان شعاعی را محدود می کند [۲، ۳]. اگر اصطکاک از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، مقاومت اصطکاک در جهت بیرونی از مقاومت اصطکاک در جهت سیلان های درونی مواد حلقه به سمت مرکز بزرگتر می شود. با افزایش تغییر شکل، اگر اصطکاک زیاد باشد، قطر داخلی کاهش یافته و اگر کم باشد، قطر داخلی افزایش می یابد. بنابراین، تغییر در قطر داخلی، یک روش ارزیابی اصطکاک سطح تماس را ارائه می کند [۲، ۴]. در تحقیقات مختلف چندین راه حل تئوری در مورد تحلیل آزمون فشار حلقه ارائه و بررسی شده است. ترکیب کردن آزمایشات مدلی فیزیکی و شبیه سازی اجزای محدود روشی ساده و موثر برای مطالعه

مکانیزم های اصطکاک در شرایط تغییر شکل پلاستیک زیاد است [۵-۸]. مهم ترین مزیت آزمایش فشار حلقه، اندازه گیری ابعاد فیزیکی فرم نهایی جهت برآورد میزان اصطکاک است، در صورتی که سایر روش های اندازه گیری اصطکاک، نیازمند اندازه گیری خواص مکانیکی ماده است. در زمینه تاثیر نانو ذرات در اصطکاک مطالعات معدودی انجام شده است. وانگ و همکارانش [۹] تاثیر استفاده از نانو ذرات افزودنی Mo را در فرآیند نورد سرد فولاد و آزمون چهار گلوله جهت سنجش اصطکاک و سایش مورد مطالعه قرار دادند، آنان دریافتند که با اندازه ذرات ۵۰nm و غلظت وزنی ۱% نانو ذرات در روانکار پایه ضریب اصطکاک و زبری سطح به ترتیب ۱۰/۸% و ۱۳/۱% نسبت به روانکار پایه فاقد نانو ذرات کاهش می یابد. ولو و همکاران [۱۰] تاثیر روانکاری تفلون، روغن معدنی، MoS<sub>2</sub> و استئارات روی را با آزمون اکستروژن سرد جهت سنجش اصطکاک روی آلیاژ آلومینیوم 6063 مورد مطالعه قرار دادند، آنان دریافتند که کمترین ضریب اصطکاک برشی را تفلون با ۰/۰۶ دارا است. زو و همکاران [۱۱] نیز تاثیر استفاده از نانو ذرات افزودنی TiO<sub>2</sub> را در روغن نورد آب-پایه، در فرآیند نورد داغ فولاد جهت سنجش پارامترهای اصطکاک و زبری سطح مورد مطالعه و بررسی قرار دادند، آنان دریافتند که با افزودن ۲% نانو ذرات TiO<sub>2</sub> در روانکار پایه، ضریب اصطکاک و زبری سطح به ترتیب ۳۰% و ۱۹/۶% نسبت به روانکار پایه فاقد نانو ذرات کاهش می یابد. در ادامه زارع دثاری و همکاران [۱۲] فرآیند کشش عمیق آلیاژ آلومینیوم 6061 را در سه حالت روانکاری (خشک، روغن معمولی و روغن معمولی حاوی نانو ذرات AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) جهت سنجش پارامترهای اصطکاک، زبری و نیروی شکل دهی مورد مطالعه قرار دادند، آنان دریافتند که با ۰/۵ درصد وزنی نانو AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مقدار اصطکاک ۳۲% نسبت به روانکار پایه فاقد نانو ذرات کاهش می یابد.

۱۲۰ تنی ساخت شرکت سنگین تراش ارومیه بکار گرفته شد.

جدول ۱. خواص شیمیایی تسمه AL7xxx.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
۱/۴	۰/۳۱۷	۰/۲۱۷	۰/۶۵	۲/۹۷
Zn	Cr	Ni	Pb	Al
۵/۱۶	۰/۰۰۵	<۰/۰۰۱	۰/۱۳۷	>۸۹/۰۳۳



شکل ۱. نمونه حلقه‌ها جهت تست فشار حلقه.

در این پژوهش از نانوذرات آلومینا نوع گاما و اکسید مس، به علت هزینه‌های پایین (که امکان بکارگیری از این نوع نانوذرات را در مقیاس صنعتی فراهم می‌سازد) و همچنین پایداری ابعادی و سازگاری با محیط زیست استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات نانوذرات مورد استفاده، ارایه شده است. روغن ۱۰ و روغن پارافین به عنوان روانکار پایه برای انجام آزمایشات انتخاب شده است. جدول ۳ خصوصیات فیزیکی- شیمیایی روانکارهای پایه را نشان می‌دهد [۱۳].

براساس نتایج تحقیقات پیشین، غلظت نانوذرات آلومینا مورد استفاده در روانکار پایه، ۰/۲ الی ۱ درصد وزنی و برای اکسید مس ۰/۵ الی ۲ درصد وزنی تعیین شده است [۱۴، ۱۵]. در این پژوهش نانو ذرات آلومینا و اکسید مس با درصدهای وزنی (۰/۲، ۰/۸، ۱/۴ و ۲) در روانکارهای

به منظور افزایش راندمان، دقت در تحلیل‌ها و صرفه جویی در هزینه، باید طراحی آزمایش مناسب صورت گیرد. روش تاگوچی یکی از پرکاربردترین و اقتصادی‌ترین روش‌های طراحی آزمایش و بهینه سازی است، که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. براساس تحقیقات و مطالعات انجام شده، تاکنون رفتار اصطکاک نانوروانکارها در فرآیندهای شکل دهی فلزات توسط آزمون فشار حلقه مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین هدف تحقیق حاضر، بررسی تاثیر استفاده از نانو ذرات آلومینا و اکسید مس با درصدهای وزنی مختلف، در داخل دو نوع روانکار پایه، جهت روانکاری در فرایند فشار حلقه سرد آلیاژ آلومینیوم 7xxx است. با استفاده از آزمون فشار حلقه و طراحی آزمایشات مطابق روش تاگوچی به بهینه‌سازی شرایط روانکاری و انتخاب نوع روانکار مناسب جهت کاهش اصطکاک پرداخته شده است.

## مواد، تجهیزات و انجام آزمایش‌ها

### مواد و تجهیزات

ماده مورد استفاده جهت شکل دهی، آلیاژ آلومینیوم و جنس قالبهای مورد استفاده فولاد MO40 است. با استفاده از تست کوانتومتری، ترکیبات آلیاژ آلومینیوم 7xxx در جدول ۱ آورده شده است. برای تهیه نمونه‌های حلقه‌ای شکل، از دستگاه تراش TM50 ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شد و سپس جهت یکسان سازی زبری سطح تمام نمونه‌ها، عملیات پولیش روی آن‌ها انجام گرفت.

در روش فشار حلقه، چندین نمونه قطعه آلیاژ آلومینیوم Al7xxx با نسبت‌های ابعاد استاندارد جهت انجام تست فشار حلقه: {ضخامت: قطر داخلی: قطر خارجی} - {2: 3: 6} (ضخامت 10mm، قطر داخلی 15mm، قطر خارجی 30mm) در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ نمونه حلقه‌های آماده شده جهت انجام تست فشار حلقه مشاهده می‌شود. برای انجام آزمون، یک دستگاه پرس هیدرولیکی

### تست فشار حلقه

تحقیقات نشان می‌دهد روش صحیح محاسبه ضریب اصطکاک در آزمون فشار حلقه، برقراری ارتباط بین درصد کاهش قطر داخلی ( $\Delta D_I$ %) و درصد کاهش ارتفاع ( $\Delta H$ %) است [۱۶]. نتایج به صورت منحنی‌های کالیبراسیون برای حلقه‌هایی با نسبت‌های ابعاد استاندارد ارایه می‌شود.

برای محاسبه ضریب اصطکاک توسط منحنی‌های کالیبراسیون، ابتدا بایستی دو پارامتر درصد کاهش قطر داخلی و درصد کاهش ارتفاع در نمونه های تغییر شکل یافته توسط روابط زیر محاسبه شود:

$$\% \Delta D_I = \frac{D_{if} - D_{ie}}{D_{ie}} \times 100$$

$$\% \Delta H = \frac{H_f - H_e}{H_e} \times 100 \quad (1)$$

که  $D_{ie}$  قطر داخلی اولیه،  $D_{if}$  قطر داخلی نهایی،  $H_e$  ارتفاع اولیه و  $H_f$  ارتفاع نهایی هستند. با مقایسه مقادیر  $\Delta D$  و  $\Delta H$  حاصل از آزمون عملی و نمودارهای کالیبراسیون مقدار ضریب اصطکاک بدست می‌آید.

### طراحی و انجام آزمایشات

روش تاگوچی با استفاده از جداول خاص به نام " آرایه متعامد " تعداد و شرایط آزمایش‌ها را ارایه می‌کند. استفاده از این آرایه‌ها تعداد آزمایش را کاهش می‌دهد [۱۷]. از آرایه متعامد L8 تاگوچی به منظور دستیابی به تاثیر پارامترهای مستقل بر عامل خروجی ضریب اصطکاک، مورد استفاده قرار گرفت. سطوح تغییرات هر پارامتر و ماتریس طراحی آزمایش‌ها به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارایه شده است. با اجرای آزمایشات فشار حلقه، مقدار ضریب اصطکاک برای حالت‌های مختلف مطابق جدول ۵ بدست آمد.

پایه مطابق طراحی آزمایشات به روش تاگوچی، پراکنده سازی شده‌اند که این کار به کمک همزن التراسونیک به مدت ۱/۵ ساعت انجام گرفته است. نانوروانکارهای آماده‌سازی شده بلافاصله بعد از پراکنده‌سازی نانو ذرات، مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا حتی ته‌نشینی و رسوب جزیبی احتمالی صورت گرفته با گذشت زمان در نتایج آزمایش ایجاد خطا ننماید. جهت اختلاط نانو ذرات در روانکارهای پایه، از دستگاه التراسونیک حمامی با قدرت 55KHz بکار گرفته شد. و برای توزین نانو ذرات در روانکارهای پایه از یک ترازوی دقیق آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد.

جدول ۲. خصوصیات نانو ذرات.

پارامتر	آلومینا	اکسید مس
رنگ	سفید	سیاه
متوسط اندازه ذرات (nm)	۲۰	۴۰
مساحت سطح ویژه ( $m^2/g$ )	>۱۳۸	~۲۰
شکل ذره	شبه کروی	شبه کروی
خلوص (%)	+۹۹	۹۹
چگالی ( $g/m^3$ )	۳/۰۸۹	۶/۴

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی روانکارهای پایه [۱۳].

پارامتر	روغن 10	پارافین
چگالی در $20C^0$ ( $Kg m^{-3}$ )	۹۴۵	۹۹۵
گرانروی سینماتیکی در $40$ (cSt)	۶۰	۵
شاخص گرانروی	۸۵	-
نقطه ریزش ( $C^0$ )	-۲۱	-۸
نقطه اشتعال ( $C^0$ )	۱۹۰	۱۸۰-۱۸۵

فشرده شده است و با اندازه گیری قطر داخلی نمونه ها نتایج در شکل ۳ ارائه شده است. در شکل ۳ منحنی های کالیبراسیون برای آلومینیوم 7xxx [۱۸] و محاسبات انجام شده با استفاده از رابطه ۱ برای بدست آوردن ضریب اصطکاک روانکارهای مختلف مشاهده می شود. تحقیقات نشان داده است که تحت فرآیند فشار حلقه در دمای اتاق، این منحنی ها را می توان با تقریب خوبی برای تمام آلیاژهای آلومینیوم در نظر گرفت، زیرا خواص ماده (یعنی کرنش سختی) تاثیر کمی بر منحنی دارد [۱، ۱۹]. پس از محاسبه ضریب اصطکاک توسط منحنی های کالیبراسیون مشاهده شد که از بین نانو روانکارهای مختلف استفاده شده، بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به ترکیب نوع روانکار پارافین و نانو ذرات اکسید مس با درصد وزنی ۲ است که ضریب اصطکاک برابر ۰/۱۷۵ می باشد و کمترین ضریب اصطکاک مربوط به ترکیب نوع روانکار روغن ۱۰ و نانو ذرات اکسید مس با درصد وزنی ۰/۸ و ضریب اصطکاک ۰/۱۴۸ است. نتایج برای دیگر روانکارهای مورد آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۲. نمونه های قطعات فشرده شده بعد از تست فشار حلقه.

جدول ۴. پارامترهای متغیر و مقادیر سطوح مربوطه.

سطح	۱	۲	۳	۴
درصد وزنی نانو ذرات (% wt)	۰/۲	۰/۸	۱/۴	۲
نوع روانکار پایه (TL)	پارافین (Paraffin)	روغن ۱۰ (Oil10)	-	-
نوع نانو ذرات (TP)	آلومینا (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	اکسید مس (CuO)	-	-

جدول ۵. طراحی آزمایش تاگوچی با آرایه های متعامد L8 و مقادیر اصطکاک.

شماره آزمایش	درصد وزنی نانو ذرات	نوع روانکار پایه	نوع نانو ذرات	ضریب اصطکاک
۱	۰/۲	پارافین	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۶۰
۲	۰/۲	روغن ۱۰	CuO	۰/۱۵۰
۳	۰/۸	پارافین	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۴۹
۴	۰/۸	روغن ۱۰	CuO	۰/۱۴۸
۵	۱/۴	پارافین	CuO	۰/۱۷۰
۶	۱/۴	روغن ۱۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۵۰
۷	۲	پارافین	CuO	۰/۱۷۵
۸	۲	روغن ۱۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۶۵

## نتایج و بحث

با طراحی آزمایشات لازم طبق آرایه متعامد L8 و اجرای آزمون فشار حلقه، مقادیر ضریب اصطکاک کولمب برای هر یک از شرایط مطابق جدول ۵ استخراج شد و با استفاده از روش های آنالیز واریانس، سیگنال به نویز تاگوچی و نمودارهای سطوح پاسخ، تاثیر پارامترهای نوع و درصد نانو ذرات و روانکار پایه بر ضریب اصطکاک بررسی می شود.

## نتایج فشار حلقه

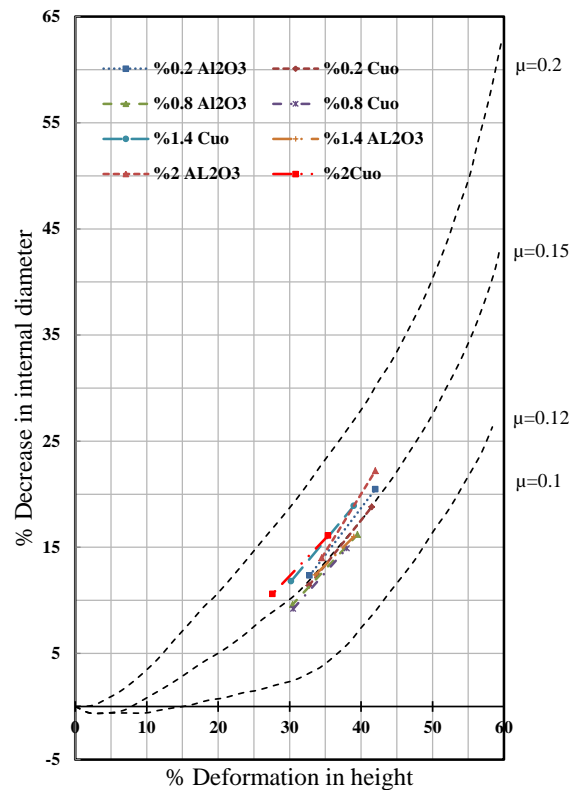
شکل ۲ نمونه هایی از آزمایش عملی فشار حلقه با استفاده از روانکارهای مختلف با توجه به تعداد آزمایش جدول ۵ را نشان می دهد. نمونه ها در درصد ارتفاع های متفاوتی

جدول ۶. آنالیز واریانس برای ضریب اصطکاک.

Contribution (%)	P	F	Adj MS	Seq SS	F	Factor
۶۲/۱۵	۰/۱۲۳	۷/۲۷	۰/۰۰۰۱۶۴۵	۰/۰۰۰۴۹۳۴	۳	%wt
۲۶/۴۶	۰/۰۹۳	۹/۲۹	۰/۰۰۰۲۱۰۱	۰/۰۰۰۲۱۰۱	۱	TL
۵/۶۸	۰/۲۹۳	۱/۹۹	۰/۰۰۰۰۴۵۱	۰/۰۰۰۰۴۵۱	۱	TP
۵/۷۱			۰/۰۰۰۰۲۲۶	۰/۰۰۰۰۴۵۳	۲	Error
۱۰۰				۰/۰۰۰۷۹۳۹	۷	Total

### سطوح پاسخ

ارزیابی دیگری که بر تاثیر پارمترهای فرآیند در پارامترهای خروجی می‌توان انجام داد استفاده از نمودارهای سطوح پاسخ ۳ بعدی است [۱۷, ۲۱]. در سطوح ترسیم شده، ۲ پارامتر تغییر می‌کند و پارامتر دیگر ثابت نگه داشته شده است. سطوح ۳ بعدی برای درصد وزنی نانو ذرات، نوع روانکار و نوع نانو ذرات در شکل‌های (۴-۶) نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانو ذرات ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴ نوع روانکار پارافین دارای ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نوع روانکار روغن ۱۰ است. همچنین بیشترین ضریب اصطکاک در نوع روانکار پارافین با درصد وزنی ۲ و کمترین ضریب اصطکاک، در نوع روانکار روغن ۱۰ با درصد وزنی ۰/۲ هستند. شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانو ذرات ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۵ در درصد وزنی نانو ذرات پایین‌تر، کمترین ضریب اصطکاک را نوع نانو ذرات اکسید مس و بیشترین ضریب اصطکاک را نوع نانو ذرات آلومینا دارند در حالی که در درصد وزنی نانو ذرات بالاتر، بیشترین ضریب اصطکاک را نوع نانو ذرات اکسید مس و کمترین ضریب اصطکاک را نوع نانو ذرات آلومینا دارند. شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشترین ضریب اصطکاک را ترکیب نوع روانکار پارافین و نوع نانو ذرات اکسید مس دارد. همچنین کمترین ضریب اصطکاک را ترکیب نوع روانکار روغن ۱۰ و نوع نانو ذرات اکسید مس دارد.



شکل ۳. منحنی‌های کالیبراسیون و منحنی‌های حاصل از تست تجربی.

### آنالیز واریانس

روش آنالیز واریانس (ANOVA) یک روش مهم برای تجزیه و تحلیل اثر عوامل قطعی در یک پاسخ است. آنالیز آماری واریانس برای بررسی این‌که آیا پارامترهای فرآیند تاثیر عمده و معنی‌داری از نظر آماری بر روی ضریب اصطکاک دارند یا نه، انجام شد. مقدار F (نسبت واریانس) و سهم درصد برای هر پارامتر، نشان می‌دهد که کدام پارامترهای ورودی و به چه اندازه‌ای در پاسخ سهم دارد [۲۰]. تاثیر فاکتورهای ورودی و مقادیر آن‌ها در جدول ۶ آورده شده است که بیشترین تاثیر را درصد وزنی نانو ذرات با سهم درصد ۶۲/۱۵ و سپس نوع روانکار پایه با ۲۶/۴۶ درصد و در نهایت نوع نانو ذرات با ۵/۶۸ درصد بر روی اصطکاک دارند.

### بهینه سازی با روش تاگوچی

در روش تاگوچی جهت بهینه کردن از نسبت S/N استفاده می شود. ترم "سیگنال" نشان دهنده اثر مطلوب برای مشخصه خروجی و ترم "نویز" مخفف اثر نامطلوب برای مشخصه خروجی است.

از آنجا که هدف در این مقاله دستیابی به ضریب اصطکاک کمتر مد نظر است از نسبت S/N هر چه کوچکتر، بهتر است استفاده گردید [۱۷].

$$S/N = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \right] \quad (1)$$

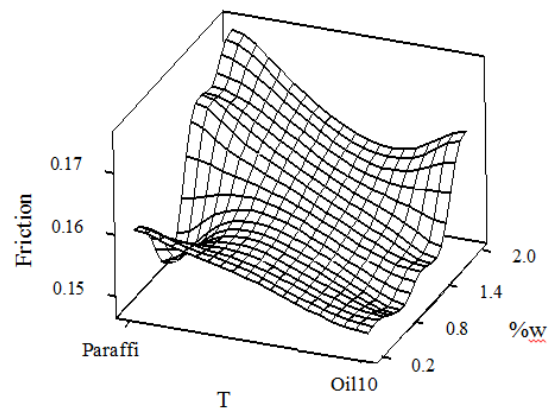
از مقدار پاسخ اندازه گیری شده در n آزمون آزمایش و n تعداد تکرارهای هر آزمایش است. مقادیر نسبت S/N محاسبه شده از رابطه ۲ در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج S/N

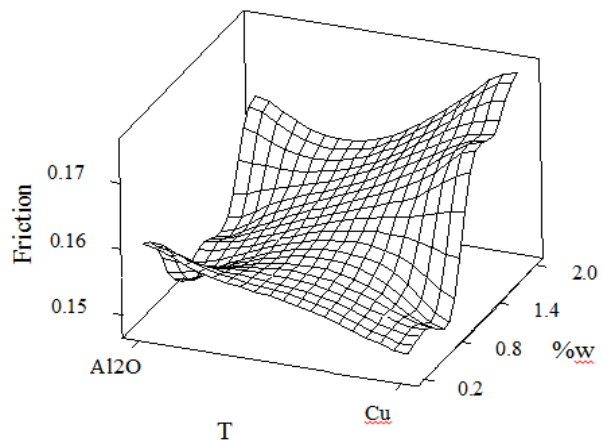
آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
S/N	۱۵/۹۲	۱۶/۴۸	۱۶/۵۴	۱۶/۵۹	۱۵/۳۹	۱۶/۴۸	۱۵/۱۴	۱۵/۶۵

سطحی از پارامتری که بالاترین نسبت S/N را دارد، سطح مطلوب است. در نمودار اصلی، انحراف از خط افقی، تاثیر بیشتر پارامتر فرآیند در متغیر پاسخ را نشان می دهد.

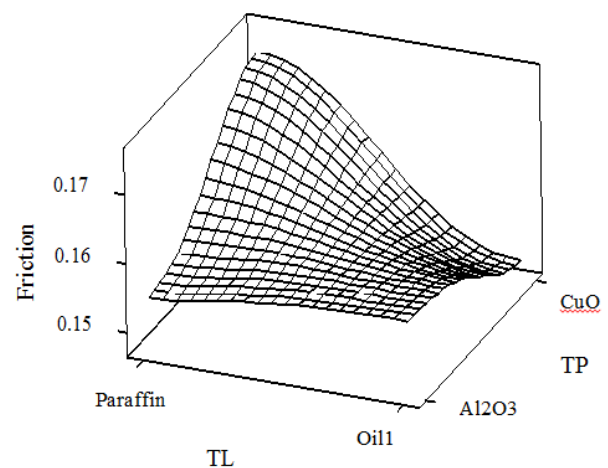
شکل ۷، پارامتر فرآیند بهینه برای ضریب اصطکاک است. همه پارامترهای مطلوب با دایره مشخص شده است. مطابق شکل ۷، مقادیر بهترین ترکیب برای به حداقل رساندن ضریب اصطکاک، برای درصد وزنی نانو ذرات ۰/۸، نوع روانکار پایه روغن ۱۰ و نوع نانو ذرات افزودنی آلومینا است. همچنین از نمودار شکل ۷ دیده می شود که فاکتور درصد وزنی نانو ذرات بیشترین تاثیر را بر ضریب اصطکاک دارد.



شکل ۴. نمودار سطوح سه بعدی برای اثرات درصد وزنی نانو ذرات و نوع روانکار بر ضریب اصطکاک.



شکل ۵. نمودار سطوح سه بعدی برای اثرات درصد وزنی نانو ذرات و نوع نانو ذرات بر ضریب اصطکاک.



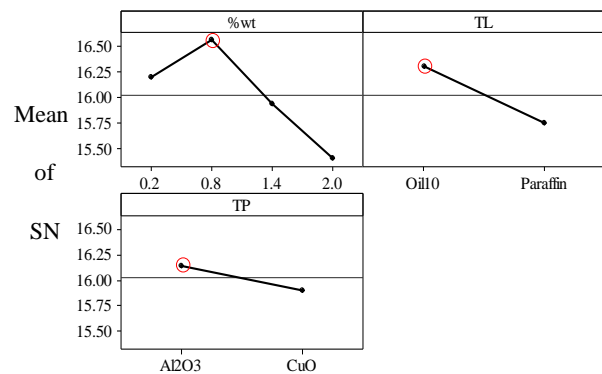
شکل ۶. نمودار سطوح سه بعدی برای اثرات نوع نانو ذرات و نوع روانکار بر ضریب اصطکاک.

### تشکر و قدردانی

از مسئول محترم کارگاه تراش دانشکده فنی و آزمایشگاه شیمی دانشکده علوم پایه دانشگاه ارومیه به خاطر فراهم نمودن امکانات لازم جهت اجرای آزمایشات لازم تشکر و قدردانی می شود.

### مراجع

1. K. Manisekar, R. Narayanasamy, S. Malayappan, *Effect of friction on barrelling in square billets of aluminium during cold upset forging*, Materials & design, 27 (2006)147-155.
2. R. Hartley, T. Cloete, G. Nurick, *An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test*, International Journal of Impact Engineering, 34(2007) 1705-1728.
3. D. Hayhurst, M. Chan, *Determination of friction models for metallic die-workpiece interfaces*, International journal of mechanical sciences, 47(2005)1-25.
4. W.-C. Yeh, M.-C. Wu, *Effect of natural boundary condition and the neutral surface of nonlinear type on the upper-bound solution to upset forging of rings using a variational approach*, Mechanics of Materials, 40(2008)427-445.
5. O.M. Ettouney, K.A. Stelson, *An approximate model to calculate foldover and strains during cold upsetting of cylinders Part II: Use of the foldover model to estimate friction*, Journal of engineering for industry, 112(1990)267-271.
6. O.M. Ettouney, K.A. Stelson, *An Approximate Model to Calculate Foldover and Strains During Cold Upsetting of Cylinders Part I: Formulation and Evaluation of the Foldover Model*, Journal of engineering for industry, 112(1990)260-266.
7. E. Rajesh, M. SivaPrakash, *Analysis of friction factor by employing the ring compression test under different lubricants*,



شکل ۷. نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای ضریب اصطکاک.

### نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام آزمون فشار حلقه و با استفاده از منحنی کالیبراسیون در فرآیند فشار حلقه، ضریب اصطکاک محاسبه شد. همچنین از روش تاگوشی با توجه به تعداد عوامل مورد بررسی، جهت بدست آوردن تعداد آزمایش‌ها استفاده گردید. سپس با استفاده از منحنی‌های استخراج شده برای ماده Al7xxx، ضرایب اصطکاک برای روانکارهای مختلف بدست آمد که نتایج حاصل عبارتند از:

- ۱- با توجه به منحنی‌های کالیبراسیون از بین نانو روانکارهای مختلف استفاده شده، بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به ترکیب نوع روانکار پارافین و نانو ذرات اکسید مس با درصد وزنی ۲ است و کمترین ضریب اصطکاک مربوط به ترکیب نوع روانکار روغن ۱۰ و نانو ذرات اکسید مس با درصد وزنی ۰/۸ است.
- ۲- با توجه به نسبت S/N، مقادیر بهترین ترکیب برای به حداقل رساندن ضریب اصطکاک با درصد وزنی نانو ذرات ۰/۸، نوع روانکار روغن ۱۰ و نوع نانو ذرات آلومینا است. همچنین فاکتور درصد وزنی نانو ذرات بیشترین تاثیر را بر ضریب اصطکاک دارد.
- ۳- آنالیز ANOVA نشان داد که بیشترین تاثیر را درصد وزنی نانو ذرات با سهم درصد ۶۲/۱۵ و کمترین تاثیر را نوع نانو ذرات با ۵/۶۸ درصد بر روی اصطکاک دارند.



16. E.M. Mielnik, *Metalworking science and engineering*, McGraw-Hill, Inc.(USA), (1991) 976.
17. E. Kuram, B. Ozcelik, *Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill*, Measurement, 46(2013)1849-1864.
18. H. Sofuoglu, H. Gedikli, *Determination of friction coefficient by employing the ring compression test*, Tribology International, 35(2002)27-34.
19. T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, *Cold and hot forging: fundamentals and applications*, ASM international, (2005).
20. J. Prasanna, L. Karunamoorthy, M.V. Raman, S. Prashanth, *Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis*, D.R. Chordia, Measurement, 48(2014)346-354.
21. B.V. Patil, U. Chakkingal, T.P. Kumar, *Effect of geometric parameters on strain, strain inhomogeneity and peak pressure in equal channel angular pressing—A study based on 3D finite element analysis*, Journal of Manufacturing Processes, 17(2015)88-97.
- International Journal of Scientific and Engineering Research, 4(2013)1163-1171.
8. P. Keshtiban, M. Zadshakouyan, G. Faraji, *Friction study in Equal Channel Multi Angular Pressing: Load Curve and Ring Compression tests* Transactions of the Indian Institute of Metals, 69(2016)1793-1800.
9. B. Wang, J.L. Sun, Y.Y. Wu, *Lubricating performances of nano organic molybdenum as additives in water-based liquid during cold rolling*, Advanced Materials Research, Trans Tech(2011)550-555.
10. R. Velu, M. Cecil, *Quantifying Interfacial Friction in Cold Forming using Forward Rod Backward Cup Extrusion Test*, Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 93(2012)157-161.
11. Z. Zhu, J. Sun, T. Niu, N. Liu, *Experimental research on tribological performance of water-based rolling liquid containing nano-TiO<sub>2</sub>*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems, 229(2015)104-109.
12. D.B. Zareh, Y.M. Abbaszadeh, B. Davoodi, *Lubrication enhancement in deep drawing process by utilizing nanoparticle additives*, Modares Mechanical Engineering, 15(2015)317-322.
13. V. Alimirzaloo, S. SheydayiGurchinQaleh, P. MashhadiKeshtiban, S. Ahmadi, *Investigation of the effect of CuO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanolubricants on the surface roughness in the forging process of aluminum alloy*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, (2017).
14. A.H. Battez, R. González, CuO, ZrO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants, J. Viesca, J. Fernández, J.D. Fernández, A. Machado, R. Chou, J. Riba, Wear, 265(2008)422-428.
15. T. Luo, X. Wei, X. Huang, L. Huang, F. Yang, *Tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as lubricating oil additives*, Ceramics International, 40(2014)7143-7149.