



## تأثیر قطر شکل‌دهی و سرعت دورانی بر خواص لوله‌های شکل‌دهی شده با فرایند اسپینینگ

فرشاد نظری<sup>۱\*</sup>، علیرضا سعادت<sup>۲</sup>، محمد بلاغی اینالو<sup>۳</sup><sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

## چکیده

در این پژوهش، تأثیر قطر نهایی شکل‌دهی و سرعت دورانی بر رفتار لوله‌ها در فرایند شکل‌دهی دورانی بررسی شده است. آزمایش‌ها روی لوله‌های مسی با مندرل فولادی انجام شد و طراحی آزمایش‌ها با روش سطح پاسخ و تحلیل نتایج با ANOVA صورت گرفت. سه قطر مختلف و سه سرعت دورانی برای بررسی انتخاب شد. نتایج نشان داد که قطر نهایی شکل‌دهی یا کرنش پلاستیک تأثیر بسیار بیشتری نسبت به سرعت دورانی بر ریزساختار، سختی، استحکام و زاویه پیچش دارد. افزایش قطر نهایی و سرعت دورانی باعث افزایش زاویه پیچش می‌شود. این افزایش با بیشتر شدن تماس و اصطکاک بین ابزار و قطعه همراه است که موجب افزایش دما در نمونه‌ها می‌گردد. بالا رفتن دما سبب رشد دانه‌ها، کاهش کارسختی و افت سختی و استحکام می‌شود. در شرایط سرعت ثابت، افزایش ۲۵ درصدی قطر موجب کاهش ۴۷ درصدی سختی و استحکام می‌شود. همچنین، استفاده از سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و قطر نهایی ۱۸ میلی‌متر می‌تواند اندازه دانه‌ها را تا سه برابر افزایش داده و زاویه پیچش ۴۸ درجه ایجاد کند. به‌طور کلی، کرنش پلاستیک ناشی از تغییر قطر مهم‌ترین عامل اثرگذار در رفتار مکانیکی و ریزساختاری فرآیند شکل‌دهی دورانی است.

**کلمات کلیدی:** شکل‌دهی دورانی؛ خواص مکانیکی؛ ریزساختار؛ روش سطح پاسخ؛ آنالیز ANOVA.

## The Effect of Forming Diameter and Rotational Speed on Characterization of Formed Tubes by Spinning Process

Farshad Nazari<sup>1\*</sup>, Alireza Saadati<sup>2</sup>, Mohammad Balaghi Inaloo<sup>3</sup><sup>1</sup> Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran<sup>2</sup> BSc Student of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran<sup>3</sup> BSc Student of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

## Abstract

This study examines how the final forming diameter and rotational speed influence twist angle, microstructure, hardness, strength, and weldability in tube spinning. Analytical modeling and experimental tests were carried out on copper tubes using a steel mandrel. Experiments were designed with the response surface method and performed at three forming diameters and three rotational speeds, with results analyzed through ANOVA. Findings show that the final forming diameter—equivalently, the applied plastic strain—has a much stronger effect on mechanical properties and microstructural changes than rotational speed. Increasing both rotational speed and forming diameter leads to higher twist angles in the tubes. Elevated rotational speed and plastic strain also intensify contact and frictional forces, raising the temperature during forming. The resulting thermal increase causes grain growth and reduces work hardening, ultimately decreasing strength and hardness. At constant speed, a 25% increase in diameter can reduce hardness and strength by up to 47%. Furthermore, using a rotational speed of 1000 rpm with a final diameter of 18 mm can triple the original grain size and produce a maximum twist angle of 48°. The results highlight that plastic deformation plays the dominant role in determining the final mechanical and microstructural characteristics of spun tubes.

**Keywords:** Spinning Process; Mechanical properties; Microstructure; Response Surface; ANOVA Analysis.

## ۱- مقدمه

در صنعت فرایندهای مختلف شکل‌دهی مانند اسپینینگ، شکل‌دهی غلتکی، خمکاری و هیدروفورمینگ برای شکل دادن به ورق‌ها و لوله‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۳]. شکل‌دهی دورانی یا اسپینینگ<sup>۲</sup>، یکی از روش شکل‌دهی فلزات است که در آن یک قطعه کار دیسکی یا استوانه‌ای حول محور خود دوران کرده و با استفاده از یک ابزار شکل‌دهی و قالب، به شکل محصول نهایی درمی‌آید. این فرایند به دلیل توانایی در ایجاد شکل‌های پیچیده و متنوع، در کنار هزینه پایین، عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته و راحتی استفاده بسیار مورد توجه صنایع است [۳، ۴].

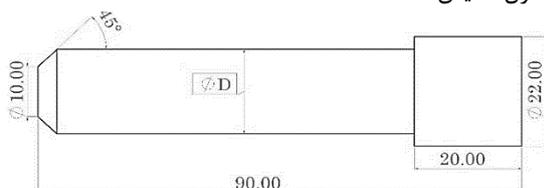
تاکنون پژوهشگران مختلفی با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی و المان محدود به مطالعه این فرایند پرداخته‌اند. Music و همکاران [۵] به بررسی مکانیک فرایند اسپینینگ پرداختند و بیان کردند، روش‌های تحلیلی می‌توانند نیروها و رفتار تغییر شکل را در فرایند اسپینینگ پیش‌بینی کنند، اما به دلیل پیچیدگی فرایند محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. عبدالرزاق و همکاران [۶] به مطالعه تنش پسماند و برگشت فنری ورق در فرایند اسپینینگ چند پاسه پرداختند. آنها از روش المان محدود در این مطالعه استفاده کردند و نشان دادند، پاس آخر بیشترین تاثیر را بر تنش‌های پسماند و مقدار برگشت فنری ورق دارد و تنش‌های پسماند مماسی بسیار موثر از تنش‌های شعاعی می‌باشند. Shu و همکاران [۷] تنش‌های پسماند در یک مخروط جداره نازک را ارزیابی کرده و بیان کردند تغییر شکل در فرایند اسپینینگ همگن نبوده و این موضوع سبب تغییرات در توزیع تنش پسماند می‌شود. مطابق نتایج، تنش پسماند شعاعی در سطح مخروط فشاری بوده و تنش پسماند مماسی در سطح نمونه کششی است. Li و همکاران [۸] به مطالعه تنش پسماند در فرایند اسپینینگ چند پاسه به صورت تغییر شکل سرد پرداختند و نشان دادند، توزیع تنش‌های پسماند بسیار به دانه‌بندی ساختار بستگی دارد. پیش از انجام شکل‌دهی به دلیل هم محور بودن دانه‌بندی، تنش‌های پسماند کوچک می‌باشند، اما با شروع تغییر شکل و تغییر اندازه دانه‌بندی تنش‌های پسماند افزایش یافته و با افزایش تعداد پاس‌ها و افزایش تغییر شکل پلاستیک مجدد دانه‌بندی نظم

جدیدی پیدا کرده و تنش‌های پسماند کاهش خواهد یافت. Duhms و Homberg [۹] تنش پسماند در شکل‌دهی دورانی-اصطکاکی روی لوله‌ها را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند تنش‌های پسماند علاوه بر عوامل مکانیکی بسیار تحت تاثیر عوامل حرارتی می‌باشند. Li و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر پارامترهای فرایند بر نیروی و کیفیت شکل‌دهی در فرایند اسپینینگ یک استوانه پرداختند. آنها نشان دادند، روند تغییرات نیروی شعاعی و مماسی شکل‌دهی مشابه بوده و به پارامترهای فرایند وابسته نمی‌باشد. در شرایطی که نیروی شکل‌دهی کمینه است، بازده و کیفیت شکل‌دهی بیشینه و عیوب ایجاد شده کمتر است؛ همچنین با افزایش سرعت مندرل تغییر ضخامت قطعه کار کمتر شده و با افزایش سایر پارامترها مانند پیشروی، شعاع و زاویه حمله ابزار ابتدا تغییرات ضخامت افزایش و سپس کاهش می‌یابد. صدیقی و ناصری‌نژاد [۱۱] به بررسی تاثیر گام حرکتی بر تنش و کرنش در فرایند گنبدی کردن انتهای لوله‌ها با استفاده از فرایند اسپینینگ پرداختند. آنها در این پژوهش از یک مدل المان محدود استفاده کردند و بیان کردند کاهش گام سبب ایجاد چین و چروک در قطعه می‌گردد و تغییرات گام تاثیر قابل توجهی بر کرنش ضخامت ندارد. Huang و همکاران [۱۲] فرایند گلوبی کردن یک لوله در دمای بالا با استفاده از فرایند اسپینینگ را به صورت عددی و تجربی مطالعه کردند و نشان دادند با افزایش ضریب اصطکاک مقدار زاویه پیش در قطعه افزایش یافته و افزایش سرعت پیشروی سبب کاهش زبری سطح می‌گردد. Nakasato و همکاران [۱۳] شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی در فرایند اسپینینگ گرم را بررسی کرده و نشان دادند دمای ۴۰۰ درجه بهترین دما برای شکل‌دهی است؛ همچنین شکل‌هی در دماهای بالا سبب استفاده از تعداد پاس کمتر شده و ضخامت دیواره افزایش می‌یابد، اما مقدار ناهمواری‌های سطح داخلی نمونه نیز افزایش خواهد یافت. Roy و همکاران [۱۴] خواص تغییر شکل در فرایند اسپینینگ لوله را بصورت تجربی و با استفاده مدل المان محدود بررسی کردند و نشان دادند که شکل و ضخامت نمونه با افزایش اصطکاک تغییر کرده و مدل المان محدود بخوبی می‌تواند رفتار تغییر شکل و کرنش‌ها را پیش‌بینی نماید. Li و همکاران [۱۵] با مطالعه مسیر حرکت ابزار در اسپینینگ بدون قالب بیان کردند، حرکت ابزار در یک

<sup>2</sup> Spinning Process

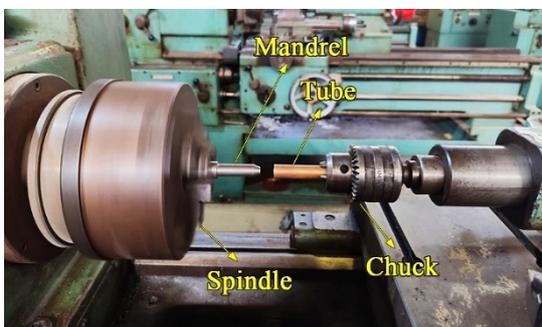
## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از لوله‌ای با جنس مس خالص تجاری با قطر داخلی ۱۴ mm، ضخامت ۱ mm و طول ۷۰ mm و قالب (مندرل) با جنس فولاد St37 استفاده شده است؛ همچنین تلاش شد تا تمامی مندرل‌ها با شرایط مشابه ماشینکاری شده و کیفیت سطحی مشابه داشته باشند. در شکل (۱) شماتیک مندرل نمایش داده شده است.



شکل ۱- شماتیک و ابعاد مندرل

جهت جازنی و شکل‌دهی لوله مسی روی مندرل فولادی از دستگاه تراش استفاده شد. در این راستا، مندرل فولادی بر روی سه نظام بسته شده و با سرعت تعیین شده دوران می‌کند و لوله مسی بر روی سه نظام مرغک بسته شده و به آرامی روی قالب جازنی می‌شود. نحوه قرارگیری تجهیزات روی دستگاه تراش در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه قرارگیری مندرل و لوله مسی در دستگاه تراش

جهت بررسی تاثیر سرعت دوران و میزان کرنش بر ریزساختار، سختی، استحکام نهایی، زاویه پیچش لوله مسی و امکان سنجی جوش خوردگی جهت تولید مقاطع دوفلزی از سه سرعت دوران ۳۵۵ rpm، ۵۰۰ rpm و ۱۰۰۰ rpm و سه مندرل با قطرهای ۱۴/۵ mm، ۱۶ mm و ۱۸ mm استفاده گردید. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ و با تکنیک Faced-Centered Central Composite (CCF) انجام گرفت.

مسیر مقعر سبب می‌شود، تغییرات ضخامت ورق به درجه خمش حساس نباشد. Rentsch و همکاران [۱۶] با استفاده از یک مدل عددی به بررسی فرایند اسپینینگ پرداختند و بیان کردند استفاده از المان shell با صرف زمان حل بسیار کمتر از المان solid می‌تواند جواب‌های نزدیک به المان solid را ارائه دهد. عبدالرزاق و همکاران [۱۷] با ارزیابی دقت هندسی در تولید مخازن CNG با فرایند اسپینینگ نشان دادند با استفاده از روانکاری مناسب می‌توان به حداقل ضخامت ورق، کمترین برگشت فنری و بالاترین دقت ابعادی دست یافت. Huang و همکاران [۱۸] بصورت تئوری به بررسی چروک شدن ورق در فرایند شکل‌دهی دورانی پرداختند و بیان کردند، افزایش سرعت پیشروی ابزار سبب افزایش میزان چروک شدن در قطعه خواهد شد. Gondo و همکاران [۱۹] توزیع بافت در راستای ضخامت را روی ورق‌های آلومینیوم اسپینینگ شده، مورد مطالعه قرار دادند و چگالی بافت را به جهت‌های کریستالی ریزساختار نسبت دادند. Gao و همکاران [۲۰] تغییر شکل و تغییرات ضخامت دیواره را در اسپینینگ ورق‌های فلزی بررسی کردند و بیان کردند در فرایند اسپینینگ سه حالت تغییر شکل برشی، فشاری-برشی و کششی-برشی بصورت پیوسته اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود، ضخامت دیواره متناسب با هر حالت شکل‌دهی تغییر نماید. Zhai و همکاران [۲۱] شبیه‌سازی فرایند اسپینینگ با استفاده از روش مش‌زنی چندگانه را مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند این روش با حفظ دقت در محاسبه ضخامت و میزان کرنش‌ها، می‌تواند زمان حل را به میزان ۶۷٪ کاهش دهد.

با توجه به پیشینه پژوهش بیان شده مشاهده می‌شود بسیاری از پژوهش‌ها به بررسی هندسه و ویژگی‌های سطحی و هندسی در فرایند شکل‌دهی دورانی لوله‌ها پرداخته و تاثیر قطر نهایی شکل‌دهی (کرنش پلاستیک) و سرعت دوران بر خواص مکانیکی و ریزساختار در فرایند شکل‌دهی دورانی لوله‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش تاثیر قطر نهایی شکل‌دهی (کرنش پلاستیک) و سرعت دورانی بر زاویه پیچش لوله، ریزساختار، سختی، استحکام نهایی و امکان جوش خوردگی در شکل‌دهی دورانی لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در این راستا از آزمایشات تجربی و محاسبات تحلیلی استفاده شده است.

آزمایش ها در روش CCF به صورت سه سطحی با مقادیر غیر پیوسته و با یک نقطه مرکزی و مقدار آلفای ۱ طراحی شد و نتایج با استفاده از تحلیل ANOVA مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۱) شرایط آزمایش را برای سرعت ها و قطرهای مختلف نشان می دهد.

جدول ۱- ترکیب پارامترهای آزمایش

شماره نمونه	قطر مندرل (mm)	سرعت دوران (rpm)
۱	۱۴/۵	۳۵۵
۲	۱۶	۳۵۵
۳	۱۸	۳۵۵
۴	۱۴/۵	۵۰۰
۵	۱۶	۵۰۰
۶	۱۸	۵۰۰
۷	۱۴/۵	۱۰۰۰
۸	۱۶	۱۰۰۰
۹	۱۸	۱۰۰۰

Krishna و همکاران [۲۳] در پژوهشی بیان کردند که در آلیاژهای مس بین سختی و استحکام نهایی یک رابطه خطی برقرار بوده که می تواند استحکام نهایی ماده را بر اساس سختی ویکرز با دقت قابل قبولی تخمین بزند. آنها نشان دادند، این رابطه برای سختی های زیر ۱۲۰ ویکرز دقت بسیار بالایی دارد. در این راستا جهت بررسی استحکام نمونه ها از رابطه (۱) برای تخمین استحکام نهایی استفاده گردید. در این رابطه  $S_{ut}$  استحکام نهایی بر حسب MPa و HV سختی بر حسب ویکرز است [۲۳].

$$S_{ut} = 3.353 \times HV \quad (1)$$

### ۳- معادلات حاکم بر مسئله:

بر اساس آزمایش های تجربی طول نمونه ها قبل و بعد از شکل دهی تغییر محسوسی نداشته و کرنش محوری صفر است ( $\epsilon_t = 0$ ). با فرض همگن بودن ماده و با در نظر گرفتن ثابت بودن حجم ماده می توان رابطه (۲) را ارائه نمود که در این رابطه  $L$  طول نمونه و  $A$  مساحت سطح مقطع نمونه است.

$$A_1 L_1 = A_2 L_2 \rightarrow A_1 = A_2 \quad (2)$$

با نوشتن مساحت می توان رابطه (۲) را بصورت زیر بازنویسی کرد. به این ترتیب رابطه ای بین تغییرات ضخامت و تغییرات قطر بدست آمده و می توان کرنش حقیقی در راستای ضخامت را از رابطه (۳) محاسبه کرد. در این رابطه  $D$  قطر،  $t$  ضخامت نمونه و  $\epsilon_t$  کرنش حقیقی در راستای ضخامت است.

$$t_1 D_1 \pi = t_2 D_2 \pi \rightarrow \frac{t_2}{t_1} = \frac{D_1}{D_2} \quad (3)$$

$$\epsilon_t = \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)$$

با توجه به اینکه همواره باید جمع کرنش ها برابر صفر باشد [۲۴، ۲۵] پس مطابق رابطه (۴) کرنش محیطی ( $\epsilon_c$ ) با قرینه کرنش در راستای ضخامت برابر است.

$$\epsilon_c = -\epsilon_t = -\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) = \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (4)$$

پس از شکل دهی، ابتدا نمونه ها جهت بررسی جوش خوردگی با استفاده از کشش ساده مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این راستا، نمونه ها بصورت جازنی شده تحت کشش قرار گرفته و نیروی کشش ارزیابی گردید. جهت بررسی مقدار پیچش لوله ها در فرایند شکل دهی، با تصویربرداری و بررسی اثر جریان ماده روی سطح نمونه ها زاویه پیچش اندازه گیری شد و در این راستا از نرم افزار MIPCloud بهره گرفته شد. جهت متالوگرافی و مطالعه ریزساختار، نمونه ها به اندازه مناسب برش خورده و پس از آماده سازی، میکروساختار بوسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. از محلول با درصد ترکیب ۹۶ اتانول، gr ۵ کلراید آهن ( $FeCl_3$ ) و ۲ cc هیدروکلریک اسید (HCl) به مدت ۲۵-۳۰ ثانیه جهت اچ نمونه ها استفاده شد؛ همچنین جهت محاسبه میانگین اندازه دانه ها از روش تقاطع بر اساس استاندارد ASTM E112-96 [۲۲] بصورت میانگین جهت های عمودی و افقی بهره گرفته شد. برای اندازه گیری سختی، سه نقطه با زاویه ۱۲۰ درجه بر روی سطح مقطع هر نمونه مورد سختی سنجی ویکرز با نیروی ۲ N قرار گرفت و میانگین مقادیر به عنوان سختی میانگین ارائه شد. جهت تخمین استحکام نهایی نمونه ها پس از شکل دهی از نتایج سختی سنجی استفاده گردید.

#### ۴- نتایج و بحث

جهت بررسی تاثیر سرعت و مقدار کرنش بر خواص مکانیکی و ریزساختار، نمونه‌ها از نظر سختی و میکروساختار مورد بررسی قرار گرفتند. جدول (۲) مقادیر سختی، استحکام، زاویه پیچش نمونه‌ها، کرنش در راستای ضخامت و اندازه دانه را نشان می‌دهد.

با توجه به روابط ۲-۴ هرچه اختلاف قطر اولیه و قطر نهایی بیشتر باشد کرنش در راستای ضخامت و کرنش محیطی بیشتر است به این ترتیب نمونه با قطر نهایی ۱۸ mm با داشتن کرنش ۰/۲۵۱ بیشترین کرنش را تجربه کرده و نمونه با قطر نهایی ۱۴/۵ mm با داشتن کرنش ۰/۰۳۵ کمترین کرنش را دارد.

جدول ۲- کرنش در راستای ضخامت، زاویه پیچش، سختی، استحکام نهایی و اندازه دانه در نمونه‌های شکل‌دهی شده

شماره نمونه	سرعت دوران (rpm)	قطر مندرل (cm)	کرنش $\epsilon_t$	زاویه پیچش ( $^\circ$ )	سختی (HV)	استحکام نهایی (MPa)	اندازه دانه ( $\mu\text{m}$ )
۱	۳۵۵	۱۴/۵	۰/۰۳۵	۰	۱۲۵/۳۶	۴۲۰/۳۳	۲/۷۶
۲	۳۵۵	۱۶	۰/۱۳۳	۱۲	۷۵/۵۶	۲۵۳/۳۵	۴/۵۹
۳	۳۵۵	۱۸	۰/۲۵۱	۲۶	۶۷/۷	۲۲۶/۹۹	۴/۲۵
۴	۵۰۰	۱۴/۵	۰/۰۳۵	۰	۱۱۷/۳۶	۳۹۳/۵	۲/۵۳
۵	۵۰۰	۱۶	۰/۱۳۳	۱۸	۶۷/۵۶	۲۲۶/۵۲	۴/۶۳
۶	۵۰۰	۱۸	۰/۲۵۱	۳۳	۶۳/۲۶	۲۱۲/۱۱	۵/۷۸
۷	۱۰۰۰	۱۴/۵	۰/۰۳۵	۰	۱۱۷/۳۶	۳۹۳/۵	۳/۰۲
۸	۱۰۰۰	۱۶	۰/۱۳۳	۱۵	۶۷/۵۳	۲۲۶/۴۲	۵/۶۳
۹	۱۰۰۰	۱۸	۰/۲۵۱	۴۸	۵۸/۸	۱۹۷/۱۵	۱۰/۰۳

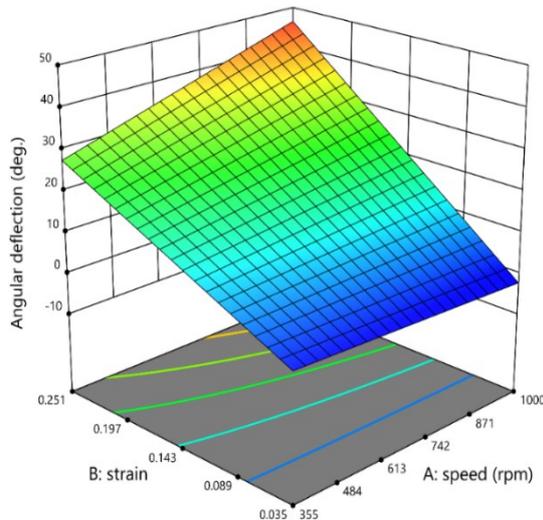
#### ۴-۱- زاویه پیچش

بیشترین زاویه پیچش به مقدار  $48^\circ$  در نمونه با قطر نهایی ۱۸ mm و سرعت ۱۰۰۰ rpm ایجاد شده و مقدار پیچش در نمونه‌هایی با قطر نهایی ۱۴/۵ mm صفر است. بدلیل حرکت دورانی مندرل درون لوله مسی و وجود اصطکاک، گرما و گشتاور پیچشی ایجاد می‌شود. هرچه مقدار کرنش بیشتر باشد، به دلیل تغییر شکل پلاستیک بیشتر، نیروی تماسی بین لوله مسی و مندرل افزایش می‌یابد. با افزایش کرنش و سرعت دوران بترتیب گشتاور پیچشی و گرمای تولید شده بیشتر شده که سبب می‌شود، زاویه پیچش در نمونه‌ها افزایش یابد. شکل (۳) زاویه پیچش تعدادی از نمونه‌ها و شکل (۴) تاثیر کرنش ناشی از قطر نهایی و سرعت را بر زاویه پیچش نشان می‌دهند.

جازنی لوله‌های مسی روی مندرل فولادی در شرایط دوران و وجود اصطکاک سبب می‌شود که در لوله مسی مقداری پیچش ایجاد گردد. با توجه به نتایج، افزایش قطر نهایی (کرنش) یا افزایش سرعت دوران سبب افزایش زاویه پیچش می‌گردد. ارزیابی نتایج با استفاده از تحلیل ANOVA نشان داد قطر نهایی یا مقدار کرنش و سرعت دوران هر دو با مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ از پارامترهای تاثیرگذار بوده، اما تاثیر کرنش با مقدار p-value ۰/۰۰۰۱ بسیار بیشتر از سرعت دوران با مقدار p-value ۰/۰۲۳ است. جدول (۳) نتایج آنالیز واریانس را برای زاویه پیچش نشان می‌دهد.

جدول ۳- تحلیل واریانس جهت بررسی نتایج زاویه پیچش

	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	۲۱۴۶/۲۷	۳	۷۱۵/۴۲	۷۳/۵۷	۰/۰۰۰۱	significant
A-speed	۱۰۱/۶۳	۱	۱۰۱/۶۳	۱۰/۴۵	۰/۰۲۳۱	
B-strain	۲۰۴۸/۸۸	۱	۲۰۴۸/۸۸	۲۱۰/۷۱	<۰/۰۰۰۱	
AB	۱۳۱/۶۱	۱	۱۳۱/۶۱	۱۳/۵۳	۰/۰۱۴۳	



شکل ۴ تعامل پارامترهای کرنش (قطر شکل‌دهی) و سرعت دوران بر زاویه پیچش



(a)



(b)



(c)

شکل ۳- زاویه پیچش در نمونه‌های شکل‌دهی شده با سرعت ۱۰۰۰ rpm و قطرهای (a) ۱۴/۵ mm، (b) ۱۶ mm و (c) ۱۸ mm

#### ۴-۲- اندازه دانه

مطالعه نمونه‌ها پیش از شکل‌دهی نشان داد، لوله‌های مسی، به دلیل تولید با استفاده از فرایند اکستروژن، ساختاری ریزدانه و کرنش سخت دارند. بررسی نتایج با استفاده از تحلیل واریانس نشان داد، قطر نهایی یا مقدار کرنش و سرعت دوران هر دو از پارامترهای تاثیرگذار بر اندازه دانه بوده، اما تاثیر کرنش با مقدار  $p\text{-value} = 0.0002$  بسیار بیشتر از سرعت دوران با مقدار  $p\text{-value} = 0.002$  است. جدول (۴) نتایج آنالیز واریانس را برای اندازه دانه نشان می‌دهد

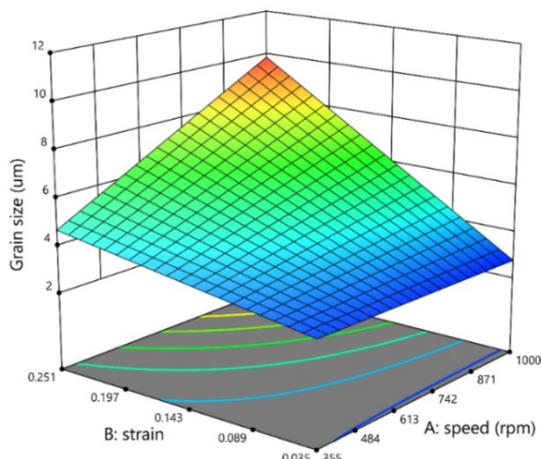
جدول ۴- تحلیل واریانس جهت بررسی نتایج اندازه دانه

	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	۴۰/۴۰	۳	۱۳/۴۷	۴۶/۱۵	۰/۰۰۰۵	significant
A-speed	۱۰/۰۸	۱	۱۰/۰۸	۳۴/۵۴	۰/۰۰۲	
B-strain	۲۷/۷۴	۱	۲۷/۷۴	۹۵/۰۷	۰/۰۰۰۲	
AB	۸/۲	۱	۸/۲	۲۸/۱۰	۰/۰۰۳۲	

مسی، پیش از شکل‌دهی حجم بسیاری از نایجایی و کرنش درون ساختار نمونه‌ها وجود داشته و افزایش دما در طول فرایند شکل‌دهی سبب فعال شدن مکانیزم‌های ریکاوری و رشد دانه‌ها می‌گردد [۲۶].

میانگین اندازه دانه لوله‌های مسی پیش از شکل‌دهی  $2/5 \mu\text{m}$  بوده که پس از شکل‌دهی با سرعت ۱۰۰۰ rpm و قطر نهایی ۱۸ mm به  $10/3 \mu\text{m}$  می‌رسد و این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب پارامترها می‌تواند اندازه دانه‌ها را تا سه برابر افزایش

با توجه به نتایج اندازه‌گیری دانه، افزایش سرعت دوران و قطر شکل‌دهی سبب رشد اندازه دانه‌ها شده که این امر در نتیجه تعامل پارامترها در افزایش گرمای ناشی از اصطکاک اتفاق می‌افتد. افزایش سرعت دورانی به دلیل وجود اصطکاک سبب افزایش دما شده و هرچه مقدار کرنش بیشتر باشد به دلیل تغییر شکل پلاستیک بیشتر، نیروهای تماسی و متعاقباً نیروی اصطکاک افزایش یافته که سبب تولید گرمای بیشتر می‌گردد. عملاً به دلیل استفاده از فرایند اکستروژن در تولید لوله‌های

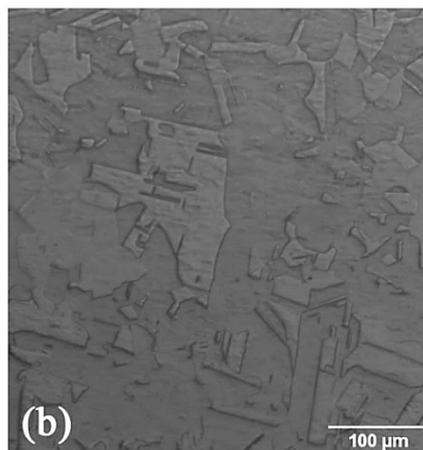
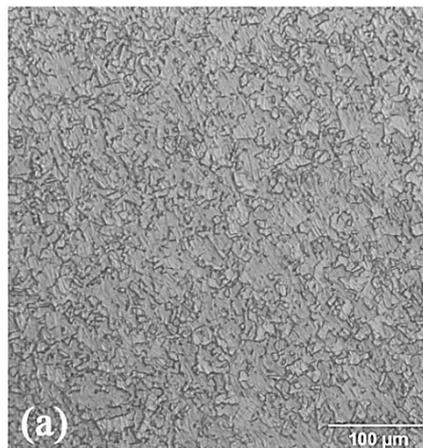


شکل ۶- تعامل پارامترهای کرنش (قطر شکل‌دهی) و سرعت دوران بر اندازه دانه

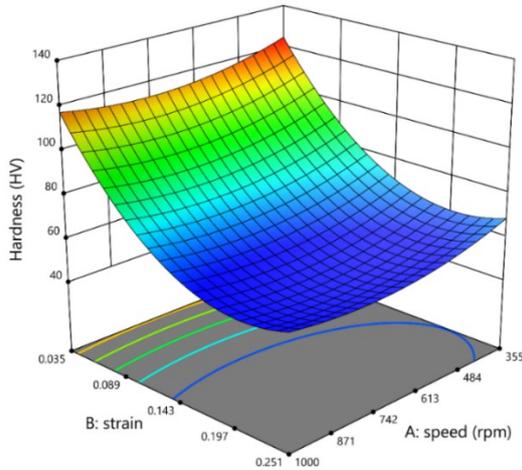
#### ۴-۳- سختی و استحکام

با توجه به پژوهش‌های پیشین و رابطه (۱)، سختی و استحکام در آلیاژهای مس با هم رابطه خطی داشته و استحکام نهایی مضرری از سختی می‌باشد. ارزیابی نتایج نشان داد مطابق آنچه برای ریزساختار و اندازه دانه بیان شد، سختی و استحکام نمونه‌ها با افزایش سرعت دوران و قطر شکل‌دهی کاهش می‌یابد که این امر در نتیجه افزایش دما در طول فرایند شکل‌دهی، افزایش اندازه دانه‌ها، فعال شدن مکانیزم ریکواری و کاهش کارسختی رخ می‌دهد. در فرایند ریکواری با افزایش دما تا زیر دمای تبلور مجدد نابجایی‌ها بازآرایی شده و چگالی نابجایی‌ها کاهش می‌یابد که سبب کاهش کارسختی ماده می‌گردد؛ همچنین همانطور که بیان شد، افزایش دما سبب افزایش اندازه دانه‌ها خواهد شد. تعامل افزایش اندازه دانه‌ها، کاهش چگالی نابجایی‌ها و کاهش کارسختی سبب کاهش سختی و استحکام ماده می‌گردد [۲۶، ۲۷]. بررسی نتایج با استفاده از تحلیل واریانس نشان داد قطر نهایی (کرنش) و سرعت دوران هر دو از پارامترهای تاثیرگذار بر سختی بوده اما تاثیر کرنش با مقدار p-value کمتر از ۰/۰۰۰۱ بسیار بیشتر از سرعت دوران با مقدار p-value ۰/۰۰۵۵ است. جدول (۵) نتایج آنالیز واریانس را برای سختی نشان می‌دهد. بررسی مقادیر سختی و استحکام نشان می‌دهد که در سرعت ثابت با ۲۵٪ افزایش قطر مقدار سختی و استحکام ۴۷٪ کاهش می‌یابد؛ همچنین در قطر شکل‌دهی ثابت افزایش سرعت

دهد. شکل (۵) تصویر زیرساختار را در نمونه‌های مورد بررسی و شکل (۶) تعامل پارامترهای کرنش و سرعت دوران را بر اندازه دانه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۵- ریزساختار نمونه‌های شکل‌دهی شده با (a) قطر ۱۴/۵ mm و سرعت ۳۵۵ rpm، (b) قطر ۱۸ mm و سرعت ۱۰۰۰ rpm



شکل ۷- تعامل پارامترهای کرنش (قطر شکل‌دهی) و سرعت دوران بر سختی

دوران باعث کاهش سختی و استحکام شده اما تاثیر آن نسبت به عامل کرنش محسوس نمی‌باشد. شکل (۷) اثر تعامل پارامترهای کرنش (قطر شکل‌دهی) و سرعت دوران را بر سختی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه استحکام و سختی با هم رابطه خطی دارند از ارائه نمودار استحکام چشم پوشی شده است.

جدول ۵- تحلیل واریانس جهت بررسی نتایج سختی

	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	significant
Model	۵۸۷۱/۸۰	۵	۱۱۷۴/۳۶	۵۸۴/۱۹	۰/۰۰۰۱	significant
A-speed	۱۰۴/۳۰	۱	۱۰۴/۳۰	۵۱/۸۹	۰/۰۰۵۵	
B-strain	۴۶۵۶/۵۱	۱	۴۶۵۶/۵۱	۲۳۱۶/۴۰	< ۰/۰۰۰۱	
AB	۱/۳۵	۱	۱/۳۵	۰/۶۷۱۹	۰/۴۷۲۵	
A <sup>2</sup>	۴۴/۴۲	۱	۴۴/۴۲	۲۲/۱۰	۰/۰۱۸۲	
B <sup>2</sup>	۱۱۵۳/۶۷	۱	۱۱۵۳/۶۷	۵۷۳/۹۰	۰/۰۰۰۲	

#### ۵- نتیجه‌گیری

شکل‌دهی دورانی از روش‌های رایج شکل‌دهی بوده که در شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌ها کاربرد دارد. در این پژوهش تاثیر پارامترهای سرعت و قطر نهایی (کرنش) بر خواص مکانیکی و ریزساختار با استفاده از روابط تحلیلی، آزمایش‌های تجربی و آنالیز ANOVA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش بطور خلاصه در ادامه بیان شده‌است:

- بررسی نتایج نشان داد، کرنش پلاستیک و سرعت دوران هر دو از پارامترهای موثر بوده، اما تاثیر کرنش پلاستیک بسیار بیشتر از سرعت دوران است.
- بررسی زاویه پیچش نشان داد افزایش کرنش پلاستیک و سرعت دوران موجب افزایش زاویه پیچش می‌گردد و صرفنظر از سرعت دوران، در کرنش‌های پلاستیک کوچک مقدار زاویه پیچش صفر است.

#### ۴-۴- جوش پذیری

بررسی شرایط جوش‌پذیری لوله‌های مسی به مندرل فولادی نشان داد، هیچ کدام از لوله‌ها به ماندل جوش نخورده و به سادگی از هم جدا می‌شود. این امر نشان می‌دهد که نیروهای الاستیک-پلاستیک، دما و شرایط اصطکاکی برای جوش دادن دو ماده کافی نبوده و تولید لوله‌های دوفلزی مشابه فرایند فلوفرمینگ [۲۸، ۲۹] به نیروی بسیار بیشتری نیاز داشته و با استفاده از این روش میسر نمی‌باشد؛ زیرا در فرآیند فلوفرمینگ از یک یا چند غلطک جانبی جهت اعمال فشار به لوله بیرونی استفاده شده که سبب افزایش نیروی اصطکاکی، تماس بیشتر و کامل‌تر، افزایش دما و کنترل جریان ماده شده و فرآیند نفوذ و جوش خوردن بخوبی اتفاق می‌افتد [۳۰، ۳۱]. اما در روش حاضر غلتک‌های جانبی حذف شده و نیروهای الاستیک-پلاستیک حین شکل‌دهی به تنهایی برای جوش دادن دو ماده کافی نمی‌باشد.

- [5] Music O., Allwood J. and Kawai K. (2010) A review of the mechanics of metal spinning. *J. Mater. Process. Technol.* 210(1): 3-23.
- [6] Abd-Alrazzaq M., Ahmed M. H. and Younes M. A. (2019). Prediction of Residual Stresses and Springback in Multi-pass Sheet Metal Spinning Using Finite Element Analysis. *Proc. Eighth Int. Conf. Adv. Civ. Struct. Mech. Eng. Egypt*: 90-105.
- [7] Shu X., Chang Y., Zhu Y., Ye B. and Li Z. (2020) Production mechanism of residual stress in spinning of thin wall cone parts with variable section. *Procedia Manufacturing* 50: 286-290.
- [8] Zixuan L. and Xuedao S. (2022) Residual stress analysis of multi-pass cold spinning process. *Chin. J. Aeronaut.* 35(3): 259-271.
- [9] Dahms F. and Homberg W. (2022) Manufacture of defined residual stress distributions in the friction-spinning process: investigations and run-to-run predictive control. *Metals* 12(1): 158.
- [10] Li L., Chen S., Lu Q., Shu X., Zhang J. and Shen W. (2023) Effect of Process Parameters on Spinning Force and Forming Quality of Deep Cylinder Parts in Multi-Pass Spinning Process. *Metals* 13(3): 620.
- [11] Sedighi M. and Naserinejad K. (2021) Feed effect on strain and stress in dome forming (spinning) of a tube in an aluminum CNG vessel manufacturing *J. Appl. Comput. Sci. Mech.* 32(2): 43-60.
- [12] Huang C.-C., Hung J.-C., Hung C. and Lin C.-R. (2011) Finite element analysis on neck-spinning process of tube at elevated temperature. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 56: 1039-1048.
- [13] Nakasato S., Kobayashi J. and Itoh G. (2018) Hot spinning formability of aluminum alloy tube. *Procedia Manufacturing* 15: 1263-1269.
- [14] Roy B. K., Korkolis Y. P., Arai Y., Araki W., Iijima T. and Kouyama J. (2020) Experimental and numerical investigation of deformation characteristics during tube spinning. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 110: 1851-1867.
- [15] Li Y., Wang J., Lu G.-d. and Pan G.-j. (2014) A numerical study of the effects of roller paths on dimensional precision in die-less spinning of sheet metal. *J. Zhejiang Univ. Sci. A* 15(6): 432-446.
- [16] Rentsch B., Manopulo N. and Hora P. (2017) Numerical modelling, validation and analysis of
- مطالعه ریزساختار نشان داد، افزایش سرعت دوران و قطر شکل‌دهی سبب رشد اندازه دانه‌ها شده که این امر در نتیجه تعامل پارامترها و افزایش گرمای ناشی از اصطکاک اتفاق می‌افتد.
  - مطالعه نتایج سختی و استحکام نشان داد، سختی و استحکام نمونه‌ها با افزایش سرعت دوران و قطر شکل‌دهی کاهش می‌یابد. کاهش سختی و استحکام در نتیجه کاهش اثر کارسختی با افزایش دمای ناشی از اصطکاک و ایجاد پدیده ریکآوری و همچنین رشد اندازه دانه‌ها اتفاق می‌افتد.
  - بررسی شرایط جوش‌پذیری لوله به مندرل نشان داد نیروهای لاستیک-پلاستیک، دما و شرایط اصطکاکی برای جوش دادن دو ماده کافی نبوده و تولید لوله‌های دوفلزی به نیروی تماسی بسیار بیشتری نیاز دارد.
- با توجه به بررسی‌های انجام شده در این پژوهش تاثیر پارامترهای شکل‌دهی و روانکاری بر دمای قطعه طی فرایند اسپینینگ به عنوان یک عامل بسیار موثر بر خواص مکانیکی و ریزساختار می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.
- تقدیر و تشکر**
- بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز از این پژوهش در قالب پژوهانه SCU.EM1403.73332 تشکر و قدردانی می‌گردد.
- منابع**
- [1] Golmakani H., Dadgar Asl Y. and Seyedkashi S. M. H. (2024) Numerical and Experimental Analysis of Bowing Defect in the Flexible Roll Forming Process of Copper-Aluminum Double Layer Sheets. *J. Solid Fluid Mech.* 13(6): 75-87.
- [2] Elyasi M., Modanloo V., AhmadKkhatir F. and Talebi-Ghadikolaee H. (2023) Experimental investigation of the formability of heat treated AA6063 tubes using hydraulic rotary draw bending process. *J. Solid Fluid Mech.* 13(4): 95-106.
- [3] Wong C., Dean T. and Lin J. (2003) A review of spinning, shear forming and flow forming processes. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43(14): 1419-1435.
- [4] Groover M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*, John Wiley & Sons.

- [24] Hosford W. F. and Caddell R. M. (2011). Metal forming: mechanics and metallurgy, Cambridge university press.
- [25] Molotnikov V. and Molotnikova A. (2021). Theory of elasticity and plasticity, Springer.
- [26] Callister Jr W. D. and Rethwisch D. G. (2020). Materials science and engineering: an introduction, John wiley & sons.
- [27] Zheng F., Chen H., Zhang Y., Wang W., Nie H., (2022) Microstructure evolution and corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy tube by stagger spinning. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 29(7): 1361-1372.
- [28] Jin K., Yuan Q., Tao J., Domblesky J. and Guo X. (2019) Analysis of the forming characteristics for Cu/Al bimetal tubes produced by the spinning process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101: 147-155.
- [29] Rezaei Ashtiani H. R. and Deilami Azodi H. (2021) Experimental investigation of the effect of processing parameters on mechanical properties and dimensional changes of warm flow formed 6061 aluminum alloy tube. *Modares Mech. Eng.* 21(7): 489-499.
- [30] Music O. and Sariyarlioglu E. C. (2022) Mechanics of tube spinning: a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 123(3): 709-735.
- [31] Zheng J., Zixuan L., Xuedao S., Haijie X., Tangjian X. (2024) Tube spinning process: Recent advances and challenges. *J. Adv. Manuf. Sci. Technol.* 4(4). multi-pass sheet metal spinning processes. *Int. J. Mater. Form.* 10: 641-651.
- [17] Abd-Alrazzaq M., Ahmed M. and Younes M. (2018) Experimental investigation on the geometrical accuracy of the CNC multi-pass sheet metal spinning process. *J. Manuf. Mater. Process.* 2(3): 59.
- [18] Huang J., Jin J., Deng L., Wang X., Gong P., Zhang M. and Gao C. (2021) Theoretical prediction of flange wrinkling in the first-pass conventional spinning of dual-metal sheets. *J. Manuf. Process.* 62: 368-377.
- [19] Gondo S., Arai H., Kajino S. and Hanada K. (2022) Evolution of texture distribution in thickness direction of aluminum sheet in metal spinning. *Mater. Charact.* 188: 111877.
- [20] Gao P., Yan X., Li F., Zhan M., Ma F. and Fu M. (2022) Deformation mode and wall thickness variation in conventional spinning of metal sheets. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 173: 103846.
- [21] Zhuolei Z., Mei Z., Zhipeng S., Yunda D. and Xiaoguang F. (2024) Acceleration of sheet metal spinning simulation by multi-mesh method. *Chin. J. Aeronaut.*
- [22] ASTM E.-. (2004). Standard test methods for determining average grain size. West Conshohocken, PA, USA, ASTM International.
- [23] Krishna S. C., Gangwar N. K., Jha A. K. and Pant B. (2013) On the prediction of strength from hardness for copper alloys. *J. Mater.* 2013(1): 1-6.