



## تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر روی زبری سطح و نیروهای برشی در فرآیند برقوزنی فولاد ابزار سخت‌شده D2 با استفاده از ابزار چند لبه

حجت‌الله رنجبر<sup>۱</sup>، نوید ملارمضانی<sup>۱</sup>، محمدحسین صادقی<sup>۲\*</sup>، امیر راستی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، sadeghim@modares.ac.ir

### چکیده

هدف مهندسی تولید در ایجاد یک سوراخ دقیق، دستیابی به کیفیت بالا و کمینه کردن حداقل هزینه تولید است. فولاد سخت‌کاری شده D2 به خاطر ویژگی‌های خاص خود کاربرد زیادی در صنعت دارد. ماشین‌کاری این فولاد پس از انجام عملیات حرارتی سخت‌کاری، می‌تواند باعث افزایش تولیدپذیری، کاهش هزینه‌ی تولید و بهبود خواص قطعه‌کار شود. زبری سطح نهایی در فرآیند ماشین‌کاری نقش مهمی را در عملکرد قطعه ایجاد کرده و مهم‌ترین شاخص سطح ماشین‌کاری شده است. این مقاله به بررسی کیفیت سطح سوراخ‌های پرداخت شده با فرآیند برقوزنی روی قطعه‌ای از جنس فولاد آلیاژی D2 سخت شده می‌پردازد. آزمایش‌ها با استفاده از برقوی کاربیدی یکپارچه با پوشش TiAlN، با شش لبه و شیارهای مستقیم انجام شد. پارامترهای اصلی برش شامل نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برشی در نظر گرفته شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در رنج پارامترهای مورد بررسی، بهترین کیفیت سوراخ را می‌توان با به‌کارگیری سطوح پایین پارامترهای برش به دست آورد.

کلید واژگان: برقوزنی، فولاد سخت‌کاری شده D2، زبری سطح، نیروی ماشین‌کاری

## The effects of machining parameters on the surface roughness and cutting forces in hard reaming of D2 steel by using multi-flutes tool

Hojjatollah Ranjbar, Navid Ramezani, Mohammad Hosein Sadeghi\*, Amir Rasti

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115 - 143 Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

### ABSTRACT

The purpose of engineering in making of accurate holes is to acquire high quality and minimize the produce cost. The hardened D2 steel has wide ranges of applications in industry with regards to its special properties. Machining of this steel after hardening heat treatment can increase productivity and reduce the cost and enhance the work piece properties. Surface finishing plays an important role in operation of workpiece and is the most important factor of the surface that is machined. This article investigates the surface quality of the finished holes with process of reaming on AISI D2 tool steel workpiece. Experiments have been done by utilizing integrated TiAlN coated carbide reamer with six straight flutes. The main parameters of cutting are feed rate, cutting speed and depth of cut. The experiments demonstrated that the best quality can be achieved with using low levels cutting parameters in the investigated parameter ranges.

**Keywords:** D2 Hardened Steel, Machining Forces, Reaming, Surface Roughness.

۱- مقدمه  
اکستروژن می‌شود [۲]. با توجه به نحوه حرکت ابزار و نوع براده‌برداری، در حین فرآیند سوراخ‌کاری با مشکلاتی از قبیل طول تماس بالای ابزار و براده، حجم براده‌برداری بالا، انتقال نیروها و گشتاور به ابزار، عدم مقاومت کافی ابزار، حرارت تولیدی بالای ناشی از برش مواجه شده که دستیابی به کیفیت سطح مناسب بسیار سخت خواهد بود.

به‌منظور رفع کاستی‌های ذکرشده و دستیابی به کیفیت سطح مناسب، سوراخ‌کاری سنتی همیشه با فرآیندی تکمیلی مانند برقوزنی همراه می‌شود. برقوزنی یک فرآیند پرداخت‌کاری برای رسیدن به اندازه نهایی سوراخ است. این فرآیند می‌تواند کیفیت سطح و دقت هندسی بسیار خوبی را به وجود آورده و جایگزین فرآیندهای دقیقی مانند سنگ‌زنی و هونینگ شود [۳]. به دلیل نرخ باربرداری کم و یکنواختی برش، این فرآیند دارای عمر ابزار بالایی

سوراخ‌کاری با مته یکی از متداول‌ترین و اساسی‌ترین روش‌های ساخت در میان تمام فرآیندهای براده‌برداری است و اغلب به عنوان اولین مرحله در فرآیندهایی مانند برقوزنی و بورینگ استفاده می‌شود. سوراخ‌کاری با مته را می‌توان یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای ساخت دانست. در هنگام فرآیند سوراخ‌کاری شاهد تغییراتی در زاویه ماریج، زاویه براده و سرعت برش در طول شعاع ابزار هستیم. به‌خصوص زاویه براده که هرچه قدر به مرکز ابزار نزدیک می‌شویم، مقدار آن کاهش‌یافته و این منجر به ایجاد نیروی محوری زیاد می‌شود [۱]. از طرفی دیگر همین حالت برای سرعت برش در مرکز ابزار تکرار می‌شود به طوری که پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر حاکی از آن است که در ناحیه کوچکی اطراف مرکز ابزار فرآیند براده‌برداری تبدیل به

Please cite this article using:

H. Ranjbar, N. Ramezani, M.H. Sadeghi, A. Rasti, The Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness and Cutting Forces in Hard Reaming of D2 Tool Steel Process by Using Multi-Flutes Tool, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 275-279, 2015. (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و سختی قطعه‌کار از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در فرآیند برقوزنی می‌باشند که تأثیر بسزایی بر زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری دارند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری در برقوزنی فولاد ابزار D2 با سختی ۵۵ راکولسی<sup>۲</sup> با استفاده از طراحی آزمایش فاکتوریل<sup>۳</sup> کامل بررسی گردید. قابل ذکر است که تاکنون بررسی‌های قابل‌توجهی در زمینه برقوزنی فولادهای سخت انجام نشده است.

## ۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

تمامی آزمایش‌های برقوزنی بر روی نمونه‌های مکعبی شکل از جنس فولاد آلیاژی D2 و سختی ۵۵ راکولسی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰ میلی‌متر و ترکیب شیمیایی مشخص شده در جدول ۱ انجام شد.

برای انجام آزمایش‌ها از ماشین کنترل عددی سه محوره کنترل همزمان، مدل VMC850 ساخت کشور آلمان با ماکزیمم دوران اسپیندل ۸۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده گردید. تمامی مت‌های استفاده شده در این آزمایش از نوع کاربیدی با پوشش TiAlN در قطرهای ۹/۸ و ۹/۹ میلی‌متر بوده است. برقوی استفاده شده از نوع کاربیدی شش لپه با پوشش TiAlN، زاویه مارپیچ صفر (برقوی با شیار مستقیم بهترین دقت و نیروی محوری کمتری را باعث می‌شود [۵]) و سایر مشخصات ذکر شده در جدول ۲ است.

اندازه‌گیری زبری با استفاده از دستگاه زبری‌سنج ماهر<sup>۴</sup> مدل PSI مجهز به شعاع نوک پراب ۲ میکرومتر انجام شد. برای هر سوراخ استوانه‌ای زبری در دو ساعت ۶ و ۱۲ و در ۴ ارتفاع مختلف اندازه‌گیری شد که جمعاً ۲۴ اندازه زبری برای سوراخ ثبت و میانگین آن به‌عنوان مقدار زبری انتخاب گردید. برای هر عملیات برقوزنی، متوسط نیروی محوری با استفاده از دینامومتر پیزوالکتریک کیستلر<sup>۵</sup> که در زیر فیکسچر قطعه‌کار و بر روی میز ماشین نصب شده بود، اندازه‌گیری شد. شکل ۱ تصویری از چیدمان وسایل آزمایش را نشان می‌دهد. به‌منظور کالیبراسیون دقیق دینامومتر، در ابتدا سطح میز ماشین‌ابزار کاملاً تمیز و دینامومتر دقیقاً ساعت و تنظیم گردید. متوسط نیروی محوری به‌صورت سیگنال‌هایی که در شکل ۲ نمایان است، تبدیل شده و در یک بازه پایدار ثبت گردید. روند انجام آزمایش به‌گونه‌ای است که ابتدا سوراخ‌های

است [۴]. یکی از کاربردهای گسترده‌ی فرآیند برقوزنی استفاده در صنایع خودروسازی است به‌طوری‌که برای ایجاد سوراخ‌های استوانه‌ای در سر سیلندرهای موتورهای احتراقی از این فرآیند استفاده می‌شود [۵].

در فولادهای سخت معمولاً برای رسیدن به‌اندازه‌ی نهایی از روش سنگ‌زنی استفاده می‌شود، اما این روش دارای بازده پایین و محدودیت ابعادی است. در نتیجه فرآیند برقوزنی می‌تواند جایگزین مناسبی برای ایجاد سوراخ‌هایی با دقت بالا در فولادهای سخت محسوب شود. مهم‌ترین معیارهای عملکرد فرآیند برقوزنی متعلق به نیرو و گشتاور برقوزنی، زبری سطح سوراخ، دقت ابعادی و هندسی سوراخ است [۶]. به‌عبارت‌دیگر کیفیت مطلوب سوراخ برقو شده، به فاکتورهایی مانند هندسه ابزار برقو، صلبیت ماشین و کلمپ‌ها، کیفیت سوراخ اولیه، و پارامترهای برش بستگی دارد [۶]. نیروی محوری یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در فرآیند برقوزنی برای برداشتن براده است. کوچک‌ترین افزایش نیرو در این فرآیند، به دلیل حجم براده‌برداری پایین باعث ارتعاش ابزار، انحراف ابزار و بروز خطاهای ابعادی و هندسی می‌شود. به این علت مطالعه‌ی نیروی برقوزنی و اهمیت آن روی دقت سوراخ از مهم‌ترین عوامل در عملکرد قطعات است.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری در زمینه فرآیند برقوزنی صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد. بزرا و همکاران [۵] چگونگی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر عملکرد فرآیند برقوزنی، با استفاده از لپه‌های سمنتیت کارباید k10 جوش داده شده به بدنه‌ی ابزار، روی آلیاژ سیلیکون آلومینیوم را بررسی کردند و دریافتند که عمق برش کمتر، سرعت برش پایین، نرخ پیشروی بیشتر و شیارهای مستقیم با تعداد دندان‌های بیشتر بهترین کیفیت سوراخ را می‌تواند تولید کند. بایلی و همکاران [۷] یک مدل شبه استاتیک از فرآیند برقوزنی ایجاد کردند و تأثیر ابزار و پارامترهای برش بر روی زبری سطح سوراخ را بررسی کردند و بهترین کیفیت سطحی سوراخ و صلبیت فرآیند را در زاویه گام‌های متغیر به‌دست آوردند. دودمان و همکاران [۸] زبری سطح و نیرو را در فرآیند ماشین‌کاری روی فولاد سختی بالا بررسی کردند و دریافتند که پیشروی مهم‌ترین عامل در تعیین نیروی برش و زبری سطح بوده و افزایش آن باعث بالا رفتن نیروی برش و بدتر شدن کیفیت سطح می‌شود. چیفر و همکاران [۴] ثابت کردند که استفاده از حداقل مقدار سیال برش عملکرد کیفی بالایی در ابعاد سوراخ و پرداخت سطح دارد. اونیک و همکاران [۹] یک مدل مکانیکی را ایجاد کردند، که خطاهای اسپیندل و ابزار را در نظر گرفته و گشتاور، نیروی محوری، نیروی شعاعی را با دادن پارامترهای ورودی مانند هندسه ابزار، پیشروی، سرعت برش، عمق برش و هندسه سوراخ اولیه پیش‌بینی می‌کند. ساکوما و همکاران [۱۰] مطالعاتی تجربی به‌منظور بررسی دقت سوراخ با ابزار برقوی کاربیدی چندلپه را انجام دادند. آن‌ها به بررسی ارتعاشات ایجاد شده در فرآیند برقوزنی پرداختند و مشاهده کردند که در عمق برش زیاد پدیده چتر<sup>۱</sup> در قطعه‌کار رخ می‌دهد. اوگو و همکاران [۱۱] برقوزنی چند خاکستری را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سرعت برشی تأثیر قابل توجهی بر روی دقت ابعادی سوراخ برقو شده ندارد. در مطالعاتی دیگر کیوتا و همکاران [۱۲] بر اهمیت نسبی موقعیت محور ابزار، محور اسپیندل و محور سوراخ اولیه، و میزان تأثیر آن‌ها بر روی کیفیت نهایی سوراخ برقو شده تأکید کردند.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان بیان نمود،

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی فولاد ابزار AiSi D2

ترکیبات شیمیایی	درصد عناصر	ترکیبات شیمیایی	درصد عناصر
C	۱/۶	Mo	۰/۷۱
Si	۰/۵۰	Ni	۰/۲۰
Mn	۰/۳۰	Al	۰/۰۱۵
P	۰/۰۰۵	Cu	۰/۰۶
W	۰/۰۲	Co	۰/۰۰۲
Cr	۱۲	V	۰/۸۰

جدول ۲ مشخصات هندسی ابزار برقو

هندسه ابزار	اندازه‌ها	هندسه ابزار	اندازه‌ها
قطر (mm)	۱۰	زاویه مارپیچ (درجه)	۰
طول ابزار (mm)	۱۱۰	زاویه آزاد (درجه)	۱۲
تعداد شیارها	۶	زاویه چمفر (درجه)	۴۵
زاویه براده (درجه)	۱۵	طول چمفر (mm)	۱

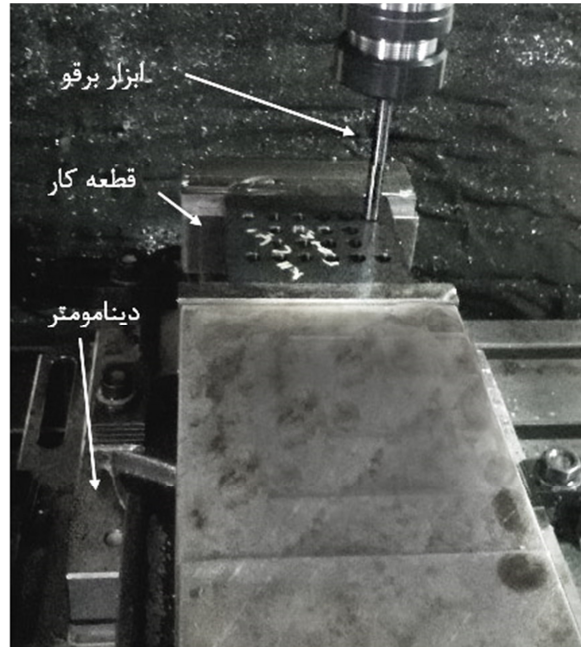
2. HRC  
3. Full Factorial  
4. Mahr  
5. kistler

1. Chatter

اندازه‌گیری نیرو توسط دینامومتر تنها نیروی محوری وارد بر ابزار را می‌توان اندازه گرفت و نیروی شعاعی و برشی به دلیل بیان شده و عمق براده شعاعی مساوی در اطراف سوراخ، قابل اندازه‌گیری نیست. بدین علت بررسی نیروی محوری برقوزنی کاری بود که در این پژوهش انجام شد و مقادیر آن برای پارامترهای مختلف به دست آمد. از طرف دیگر مولفه‌ی نیروی محوری ابزار متاثرترین عامل در برش و پیشروی ابزار می‌باشد و در تعیین مشخصه‌های نهایی قطعه تولیدی مانند کیفیت سطح، نقش اساسی ایفا می‌کند. در شکل ۲ گراف نیروی عمودی هنگام برقوزنی، در زمان پایدار برش نشان داده شده است.

جدول ۴ پارامترهای متغیر آزمایش به همراه خروجی‌های اندازه‌گیری شده

شماره آزمایش	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_e$ (mm)	$Ra$ ( $\mu$ m)	$F$ (N)
۱	۳/۷۶۸	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۹۹۸	۷۶
۲	۳/۷۶۸	۰/۰۲	۰/۱	۰/۱۹۸۵	۱۰۷
۳	۳/۷۶۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳۸۴۲	۱۰۵
۴	۳/۷۶۸	۰/۰۵	۰/۱	۰/۶۰۵۵	۱۲۲
۵	۳/۷۶۸	۰/۱	۰/۰۵	۰/۵۹۸۰	۱۶۲
۶	۳/۷۶۸	۰/۱	۰/۱	۰/۸۵۶۰	۱۳۵
۷	۴/۷۱۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۳۴۷	۲۸
۸	۴/۷۱۰	۰/۰۲	۰/۱	۰/۲۲۸۷	۵۳
۹	۴/۷۱۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴۷۶۸	۳۲
۱۰	۴/۷۱۰	۰/۰۵	۰/۱	۰/۶۵۳۰	۴۶
۱۱	۴/۷۱۰	۰/۱	۰/۰۵	۰/۷۷۸۸	۷۴
۱۲	۴/۷۱۰	۰/۱	۰/۱	۰/۹۵۹۷	۶۷
۱۳	۵/۶۵۲	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۱۸۰	۴۴
۱۴	۵/۶۵۲	۰/۰۲	۰/۱	۰/۲۲۵۸	۱۰۲
۱۵	۵/۶۵۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴۳۱۰	۵۱
۱۶	۵/۶۵۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۶۳۰۷	۱۰۸
۱۷	۵/۶۵۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۶۱۱۵	۱۰۴
۱۸	۵/۶۵۲	۰/۱	۰/۱	۰/۸۳۸۷	۱۱۸



شکل ۱ نمایی از چگونگی چیدمان وسایل آزمایش

اولیه به فاصله عرضی و طولی ۱۵ میلی‌متر از همدیگر بر روی قطعه کار چیده شدند و سپس توسط مته کاربایدی با قطر ۹/۸ و ۹/۹ میلی‌متر سوراخ کاری انجام شد و در نهایت برای رسیدن به اندازه نهایی سوراخ فرآیند برقوزنی بعد از ساعت کردن ابزار برقو بر روی آن‌ها صورت گرفت.

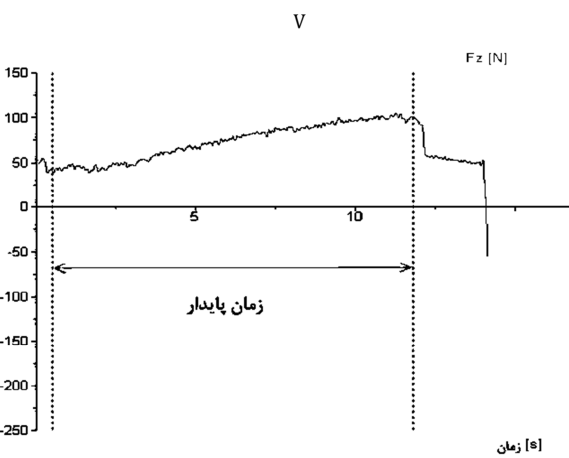
در این پژوهش سه فاکتور پیشروی ( $f$ )، سرعت برشی ( $V_c$ ) و عمق برشی شعاعی ( $a_e$ ) به عنوان اصلی‌ترین پارامترهای فرآیند برقوزنی در نظر گرفته شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش فاکتوریل کامل صورت گرفت. دو فاکتور سرعت برشی و پیشروی در سه سطح و فاکتور عمق برش در دو سطح انتخاب شد که در کل ۱۸ آزمایش با ۲ بار تکرار به منظور مقایسه‌ی آن‌ها از نظر زبری و نیروی وارد بر ابزار انجام گردید. تمامی فاکتورها و سطوح آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. در ضمن تمام آزمایش‌ها به صورت زردوم انجام شده و سایش ابزار بعد از هر ۱۸ آزمایش توسط میکروسکوپ نوری چک گردید و اندازه‌گیری‌ها میزان سایش را کمتر از ۰/۳ میلی‌متر که معیار از کارافتادگی ابزار است، نشان دادند.

### ۳- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

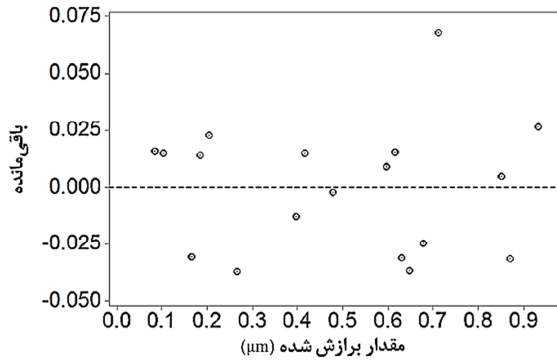
جدول ۴ مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش به همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده زبری سطح و نیروی وارد بر ابزار را در فرآیند برقوزنی نشان می‌دهد. به دلیل تشابه لبه‌های برش، نیروهای برشی در حین چرخش ابزار همدیگر را خنثی می‌کنند. نیروی برش، نیرویی است که تعیین‌کننده گشتاور وارده به لبه‌ها می‌باشد و مقدار آن کمتر از نیروی محوری است. در

جدول ۳ پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن‌ها

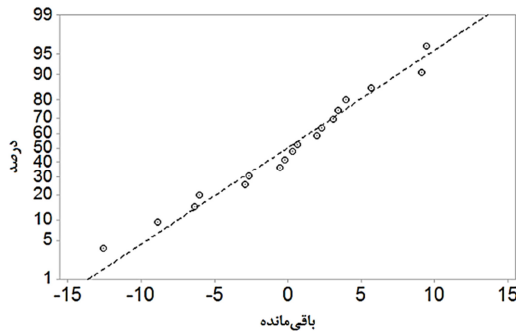
فاکتورها	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
عمق برش شعاعی ( $a_e$ ) (mm)	۰/۰۵	۰/۱	-
نرخ پیشروی ( $f$ ) (mm/rev)	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱
سرعت برشی ( $V_c$ ) (m/min)	۳/۷۶۸	۴/۷۱۰	۵/۶۵۲



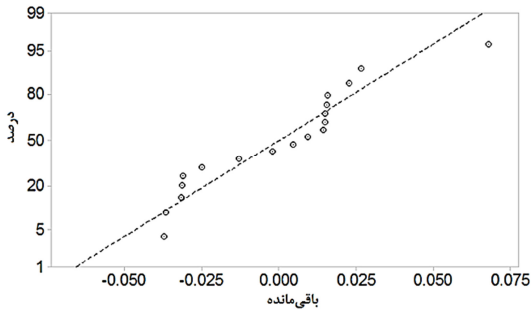
شکل ۲ گراف نیروی برش مربوط به آزمایش شماره ۳



شکل ۴ مقادیر باقیمانده‌ها برای هر فیت در مدل تخمین زبری سطح



شکل ۵ توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه یافته برای نیروی محوری



شکل ۶ توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه یافته برای زبری سطح

نیروهای ماشین کاری دارند. با افزایش پیشروی، نیروی ماشین کاری به صورت خطی افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان در بیشتر شدن نرخ براده برداری<sup>۱</sup> و افزایش تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه کار دانست. بالا رفتن سرعت برشی در ابتدا سبب کاهش نیروی ماشین کاری و در ادامه میزان آن را افزایش می‌دهد. با افزایش سرعت برشی تا ۴/۷۱ متر بر دقیقه، حرارت بیشتری در محل برقزنی ایجاد و باعث کاهش تنش سیلان و نرم شدن قطعه کار می‌شود و در نتیجه انرژی کمتری صرف تغییر شکل و براده برداری می‌گردد [۱۳]. در سرعت‌های بالاتر از ۴/۷۱ متر بر دقیقه حرارت بیشتری تولید شده و شرایط برای تشکیل لبه‌ی انباشته<sup>۲</sup> فراهم می‌شود و این را می‌توان دلیلی بر افزایش نیرو دانست و همچنین در سرعت‌های بالاتر پدیده کارسختی نیز اتفاق می‌افتد [۵]. تغییرات کمتری برای نیرو با افزایش میزان عمق برش شعاعی نسبت به سایر پارامترها داریم. این افزایش نیرو می‌تواند به سبب زیاد شدن حجم براده برداری باشد.

برای تخمین دقیق‌تر نیروی محوری و زبری سطح در حالت برقزنی و بررسی دقیق‌تر پارامترها از آنالیز واریانس استفاده گردید. یک مدل درجه ۲، شامل تمامی متغیرهای اصلی، تداخل دوتایی و توان دوم متغیرها بسط داده شد. در ادامه فاکتورهای دارای اثرات بی‌معنی حذف و مدل توسعه داده شده نهایی برای هر دو مدل زبری سطح و نیروی محوری به ترتیب در جدول ۵ و ۶ نشان داده شدند.

مقادیر  $P$  با بزرگی کمتر از ۰/۰۵، معنی‌دار بودن تأثیر پارامترها را بیان می‌کند و تأییدی بر درستی مدل توسعه داده شده است. همچنین مقادیر  $R_{sq}$  برای مدل نهایی نیرو و زبری سطح به ترتیب ۹۷/۶۷٪ و ۹۸/۹۶٪ به دست آمد. که نشان از انطباق ۹۷/۶٪ و ۹۸/۹۶٪ مدل ریاضی بر انجام آزمایش است. شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهند که مقادیر باقیمانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده دارای پراکندگی مناسب و شکل ۵ و ۶ نشان از توزیع نرمال باقیمانده‌ها دارد.

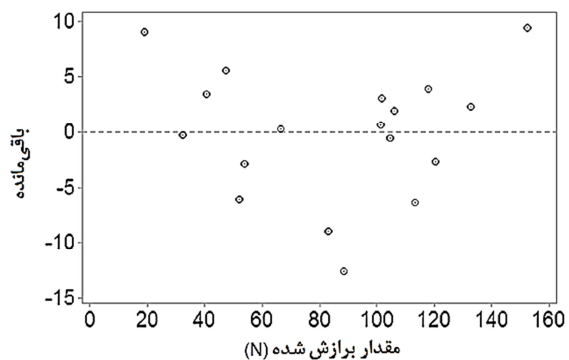
نتایج حاصل از تحلیل آماری همان‌طور که در شکل ۷ نمایان است، نشان می‌دهد که به ترتیب سرعت برشی و پیشروی بیش‌ترین تأثیر را روی

جدول ۵ تحلیل واریانس مدل زبری سطح در حالت برقزنی

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار $F$	مقدار $P$	سهم تأثیر (%)
$V_c$	۰/۰۲۱۸۹	۲	۸/۰۹	۰/۰۰۸	۱/۶۸
$f$	۰/۱۱۶۶۰	۲	۴۱۲/۴	۰	۸۵/۸۶
$a_e$	۰/۱۳۵۸۶	۱	۱۰۰/۳۵	۰	۱۰/۴۵
$f \times a_e$	۰/۰۱۲۵۸	۲	۴/۶۵	۰/۰۳۷	۰/۹۷
خطا	۰/۰۱۳۵۴	۱۰			۱/۰۴
کل	۱/۳۰۰۴۸	۱۷			۱۰۰

جدول ۶ تحلیل واریانس مدل نیروی محوری در حالت برقزنی

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار $F$	مقدار $P$	سهم تأثیر (%)
$V_c$	۱۳۸۶۵/۴	۲	۹۵/۵۵	۰	۵۵/۶۵
$f$	۵۷۶۸/۴	۲	۳۹/۷۵	۰	۲۳/۱۵
$a_e$	۱۸۴۰/۲	۱	۲۵/۳۶	۰/۰۰۱	۷/۳۹
$V_c \times a_e$	۱۱۷۷/۰۴	۲	۸/۱۱	۰/۰۱۲	۴/۷۳
$f \times a_e$	۱۶۸۳/۱	۲	۱۱/۶۰	۰/۰۰۴	۶/۷۶
خطا	۵۸۰/۴	۸			۲/۳۳
کل	۲۴۹۱۵	۱۷			۱۰۰



شکل ۳ مقادیر باقیمانده‌ها برای هر فیت در مدل تخمین نیروی

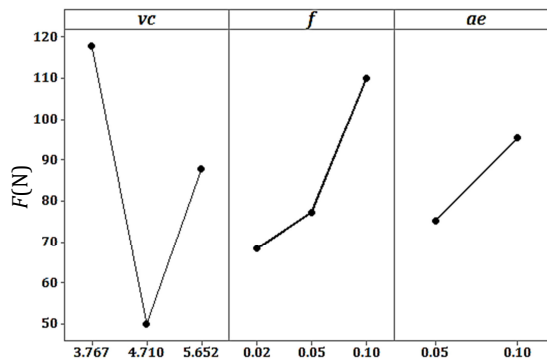
1. Removal Rate  
2. Built - Up - Edge

۳- سرعت برشی و پیشروی به عنوان مهم ترین پارامتر بر روی نیروی برش در فرآیند برقزنی تعیین گردید.

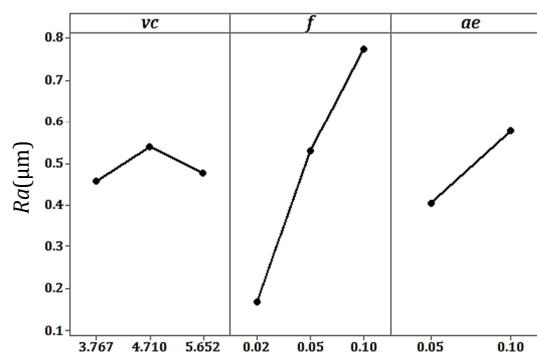
۴- به طور کلی زبری سطح با افزایش پیشروی و عمق برش افزایش یافت، در حالی که سرعت برشی تا  $4/71$  متر بر دقیقه باعث افزایش زبری سطح و در سرعت های بالاتر اثر کاهنده ای بر روی زبری سطح داشت.

#### ۵- مراجع

- [1] J. A. Yang, V. Jaganathan, R. Du, A new dynamic model for drilling and reaming processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 2, pp. 299-311, 2002.
- [2] C. Oxford Jr, On the drilling of metals 1: basic mechanics of the process, *Trans. ASME*, Vol. 77, No. 2, pp. 103-111, 1955.
- [3] M. Shunmugam, G. Somasundaram, Investigations into reaming processes using a frequency-decomposition technique, *The International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 11, pp. 2065-2074, 1990.
- [4] L. De Chiffre, G. Tosello, M. Piška, P. Müller, Investigation on capability of the reaming process using minimal quantity lubrication, *CIRP journal of manufacturing science and technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 47-54, 2009.
- [5] A. Bezerra, A. Machado, A. Souza, E. Ezugwu, Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, No. 2, pp. 185-198, 2001.
- [6] E. Lugscheider, O. Knotek, C. Barimani, T. Leyendecker, O. Lemmer, R. Wenke, Investigations on hard coated reamers in different lubricant free cutting operations, *Surface and coatings technology*, Vol. 90, No. 1, pp. 172-177, 1997.
- [7] P. V. Bayly, K. A. Young, S. G. Calvert, J. E. Halley, Analysis of tool oscillation and hole roundness error in a quasi-static model of reaming, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 387-396, 2001.
- [8] a. R. Omiddodman, h. Hassanpour, m. H. Sadeghi, a. Rasti, m. H. Saadatbakhsh, evaluation of workpiece hardness and cutting parameters effects on cutting force and surface roughness in drilling using vegetable-based cutting fluid, 2015.
- [9] O. Bhattacharyya, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, Mechanistic model for the reaming process with emphasis on process faults, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 7, pp. 836-846, 2006.
- [10] K. Sakuma, H. Kiyota, 'Hole Accuracy with Carbide-Tipped Reamers: 1st Report, *Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 19, pp. 89-95, 1986.
- [11] K. Ohgo, A. Satoh, T. Mizuno, T. Itoh, Relation between cutting conditions and precision in the reaming of gray iron castings, *Wear*, Vol. 52, No. 1, pp. 79-88, 1979.
- [12] K. Sakuma, H. Kiyota, Hole accuracy with carbide-tipped reamers (2nd report): effect of alignment error of pre-bored hole on reaming action, *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 103-108, 1986.
- [13] M. A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanour, J.-F. Rigal, Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 1092-1104, 2009.



شکل ۷ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر نیروی محوری میانگین



شکل ۸ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر زبری سطح میانگین

مطابق تحلیل آماری و با توجه به شکل ۸، به ترتیب پیشروی با  $86/85\%$ ، عمق برش محوری با  $45/10\%$  و سرعت برشی با  $67/1\%$  دارای بیشترین تأثیر بر روی زبری سطح است. زبری سطح تغییر زیادی با افزایش سرعت برشی ندارد و تأثیر کمی بر میزان زبری دارد. در سرعت های برشی بالاتر زبری سطح کمی بهبود می یابد و این می تواند به سبب افزایش درجه حرارت در سرعت های برشی بالا و کمتر شدن میزان تماس براده با سطح ماشین کاری شده دانست. یکی از دلایل بیشتر شدن زبری سطح در سرعت های برشی پایین را می توان، برخورد براده ای تولیدی با سطح ماشین کاری شده در هنگام خروج دانست. افزایش پیشروی باعث بدتر شدن زبری سطح می شود. این کاهش کیفیت سطح می تواند به دلیل ازدیاد نیروی ماشین کاری که متأثر از افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته است، باشد؛ اما در مورد عمق برش، با افزایش آن صافی سطح نامطلوبی مشاهده می شود که این می تواند به علت افزایش ارتعاش و پدیده چتر و همچنین میزان براده برداری بالاتر باشد.

#### ۴- نتایج

در این پژوهش، برقزنی فولاد ابزار AISI D2 با سختی ۵۵ راکول سی در حالت خشک و با ابزار کاربایدی مورد بررسی قرار گرفت و اثر ۳ پارامتر اصلی برش روی زبری سطح و نیروی برقزنی تعیین گردید. نتایج به صورت خلاصه در ادامه آمده است.

- ۱- برقزنی سخت فولاد AISI D2 به خوبی در حالت خشک مورد استفاده قرار گرفت و در بازه مورد مطالعه نتایج مطلوبی را در برداشت.
- ۲- از بین پارامترهای مورد بررسی، پیشروی با  $86/85\%$  بیشترین تأثیر را روی زبری سطح داشت و سپس به ترتیب عمق برش و سرعت برشی با  $45/10\%$  و  $67/1\%$  تأثیر بسیار کمی بر روی زبری سطح داشتند.