



## مطالعه تجربی تolerانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ تولیدشده در فرآیند فرزکاری مارپیچ فولاد آلیاژی AISI4340

محمدحسین سعادت‌بخش<sup>1</sup>، امیر راستی<sup>2</sup>، محمدحسین صادقی<sup>3\*</sup>، حامد حسن پور<sup>2</sup>، احمدرضا امیددودمان<sup>1</sup>

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

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

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

\* تهران، صندوق پستی 14115-143 sadeghim@modares.ac.ir

### چکیده

توانایی ساخت یک محصول براساس فاکتورهایی همچون تolerانس‌های ابعادی و هندسی مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد. در واقع مهم‌ترین عنصر در نقشه ساخت یک قطعه صنعتی، مشخصه‌های تolerانس آن است. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه تجربی دقت سوراخ تولید شده به کمک فرآیند نوین فرزکاری مارپیچ، بر روی فولاد آلیاژی AISI 4340 می‌باشد. در این فرآیند، سوراخ توسط ابزار فرزکاری متحرک بر روی یک مسیر مارپیچ تولید می‌شود. با استفاده از این روش، سوراخی با کیفیت بالا تولید شده و دیگر نیازی به پرداخت کاری (پورینگ) آن نخواهد بود. روش طراحی آزمایش تاگوچی به منظور بررسی اثر پارامترهای فرآیند فرزکاری شامل؛ سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش محوری و سختی قطعه‌کار بر روی تolerانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ به کار گرفته شد. همچنین اثر استفاده از دو روش روان کاری با حداقل سیال برشی و فرزکاری خشک نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش فرزکاری مارپیچ می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوراخ کاری سنتی باشد. همچنین سرعت برشی به عنوان اصلی‌ترین پارامتر، نقش موثری بر بهبود کیفیت سوراخ تولیدی داشت. از سوی دیگر روش روان کاری با حداقل سیال برشی و روغن پایه گیاهی بهترین عملکرد روانکاری را در مقایسه با استفاده از روغن معدنی و ماشین کاری خشک از خود نشان داد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 شهریور 1393

پذیرش: 21 شهریور 1393

ارائه در سایت: 28 مهر 1393

کلید واژگان:

فرزکاری مارپیچ

سوراخ کاری

tolerانس‌های ابعادی و هندسی

روش حداقل سیال برشی

## Empirical study of dimensional and geometrical tolerances in helical milling of AISI 4340 steel

Mohammad Hosein Saadatbakhsh<sup>1</sup>, Amir Rasti<sup>2</sup>, Mohammad Hosein Sadeghi<sup>3\*</sup>, Hamed Hassanpour<sup>2</sup>, Ahmad Reza Omiddodman<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 27 August 2014  
Accepted 12 September 2014  
Available Online 20 October 2014

**Keywords:**  
Helical Milling  
Drilling  
GD&T  
Minimum Quantity Lubrication

### ABSTRACT

The productivity of a part is assessed based on factors such as dimensional and geometrical tolerances. In fact, tolerance features are the most important factors in shop drawing of an industrial part. The aim of the present study is to empirically investigate the precision of holes created by helical milling method on AISI 4340 alloyed steel. This method refers to creating a hole using milling tool, which moves along a helical path. By using helical milling, a high quality hole has been produced and there is no need for boring. Taguchi design of experiment was used to study the effects of process parameters including; cutting speed, feed rate, axial depth of cut and workpiece hardness on dimensional and geometrical tolerances of the created hole. In addition, effect of minimum quantity lubrication method with two different oils and dry milling methods was studied. Results showed that the helical milling can be a suitable replacement for conventional drilling. In addition, cutting speed as the main parameter had significant effect on quality improvement of the created hole. On the other hand, in the helical milling, minimum quantity lubrication method using vegetable-based oil showed the best performance compared to mineral oil or dry cutting.

تولیدی می‌گردد. توانایی ساخت یک محصول براساس فاکتورهای خروجی مانند تolerانس‌های ابعادی و هندسی مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد، به طوری که این فاکتورها طول عمر و نحوه عملکرد قطعه را در مجموعه بکار گرفته شده مشخص می‌کنند. از این رو مهم‌ترین پارامتر در نقشه ساخت یک قطعه

### 1- مقدمه

یکی از مراحل حساس و پایانی در تولید محصولات ماشین‌کاری، عملیات سوراخ کاری است. در این فرآیند، به علت برقراری انطباق بین مجموعه‌ها و اتصالات میان آن‌ها، کوچک‌ترین خطا و اشتباهی باعث رد شدن محصول

ایبر و همکاران [10] به مقایسه تجربی دو فرآیند سوراخ‌کاری ماریچ و معمولی برای تولید سوراخ دقیق در فولاد ابزار AISI D2 با سختی بالا پرداختند که برتری فرزکاری ماریچ در پروفیل سوراخ تولید شده گزارش شد. همچنین نشان داده شد که پروفیل گردی در ابزار یکپارچه<sup>7</sup> بهتر از نوع اینسرتی<sup>8</sup> است. دنکنا و همکاران [5] عملیات فرزکاری ماریچ را بر روی قطعه کامپوزیتی شامل تیتانیوم و فیبر انجام دادند و با تحلیل براده به این مهم رسیدند که در فرزکاری ماریچ، ضخامت براده نتراشیده شده دارای رفتار سینوسی می‌باشد. در نتیجه براده‌های تولیدی در روش ماریچ منفصل و کوچک بوده درحالی‌که سوراخ‌کاری معمولی براده‌هایی پیوسته و بزرگ تولید می‌کند. آن‌ها همچنین نشان دادند که به علت مکانیزم حرکتی سه جهته در فرزکاری ماریچ، نیاز به ماشین‌ابزاری با نرخ تغذیه متغیر و صلیبیت کافی بوده و فقدان این شرایط باعث به هم ریختن تیرانس‌ها و خطای ابعادی می‌شود. شان و همکاران [7] مطالعاتی در زمینه افزایش عمق برش محوری (گام ماریچ) فرزکاری ماریچ انجام دادند و اذعان داشتند که طول مسیر ماشین‌کاری در فرآیند فرزکاری ماریچ بسیار بیشتر از سوراخ‌کاری سنتی بوده و با افزایش مقدار گام، طول این مسیر کاهش می‌یابد. نیروهای برشی و در پی آن لرزش و ارتعاشات ابزار نیز با افزایش گام ماریچ بیشتر شده که این پدیده منجر به وخیم‌تر شدن کیفیت سوراخ می‌گردد. ساساهاوا و همکاران [11] فرزکاری ماریچ را بر روی آلیاژ آلومینیوم و با استفاده از روان‌کاری نیمه‌خشک انجام دادند و نتیجه گرفتند که در هنگام استفاده از یک نازل برای سیستم خنک‌کاری، پروفیل مقطع دایره به یک‌طرف کشیده شده و در حالت دو ناله تیرانس‌های بهتری بدست خواهد آمد. همچنین زبری سطح در حالت MQL و روش سنتی تقریباً یکسان بوده ولی در مقایسه با حالت خشک کاهش قابل‌توجهی داشته است. لی و همکاران [6] به بررسی کیفیت سوراخ در فرزکاری ماریچ خشک آلیاژ Ti6Al4V پرداختند و گزارش کردند که بدترین کیفیت سوراخ در سوراخ‌کاری با ابزار ساییده شده به وجود می‌آید. علت این پدیده تولید حرارت بالاتر در استفاده از ابزار کند شده بود. در واقع با افزایش زمان ماشین‌کاری و سایش ابزار، کیفیت سطح نامطلوبی به وجود خواهد آمد. آلورا و همکاران [12] با مقایسه دو نوع استراتژی فرزکاری ماریچ و سوراخ‌کاری معمولی، روی آلیاژ تیتانیوم با ابزار سر کرومی مشخص کردند که تیرانس‌های ابعادی در حالت سوراخ‌کاری و تیرانس‌های هم محوری در حالت فرزکاری ماریچ نتایج بهتری را به همراه داشتند. آن‌ها همچنین علت تغییر قطر سوراخ در ارتفاع‌های مختلف را ناشی از خطای انحراف ابزار دانستند. ریبرو و همکاران [13] نیز تیرانس‌های ابعادی و هندسی را در فرزکاری یک قالب صنعتی از جنس فولاد ابزار سخت شده H13 مورد مطالعه قرار دادند. نشان داده شد که فرزکاری مخالف تیرانس‌های دقیق‌تری در سطوح داخلی و خارجی نتیجه می‌دهد. همچنین در فرزکاری فولاد آنیل شده با استفاده از ابزار سرامیکی و فرزکاری فولاد سخت با ابزار تنگستن کارباید با پوشش PVD بهترین تیرانس‌ها بدست آمد.

هدف از تحقیق حاضر، مطالعه تجربی تیرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ تولید شده با استفاده از فرآیند فرزکاری ماریچ بر روی فولاد AISI4340 با دو نوع سختی و دو نوع سیستم روان‌کاری می‌باشد. به این منظور از روش طراحی آزمایش تاگوچی بهره گرفته شد و اثر پارامترهای برشی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری بر روی تیرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ مورد بررسی قرار گرفت.

صنعتی مشخصه‌های ابعادی و تیرانسی است. بزرگ‌ترین مشکل سوراخ‌کاری سنتی، صفر بودن سرعت برشی در نوک ابزار است. این ویژگی با بالا بردن نیروی محوری برش، می‌تواند شرایط نامطلوبی از جمله انحراف ابزار و کاهش دقت ابعادی سوراخ را به همراه داشته باشد [1]. سوراخ‌کاری عمیق<sup>1</sup> روش دیگری است که برای ایجاد سوراخ‌هایی با نسبت عمق به قطر تا حدود 300 برابر استفاده می‌شود. [2,3]. معمولاً در این فرآیند سرعت برشی زیاد و پیشروی کم انتخاب می‌شود. برای طول‌های بالا، این مته‌ها دارای کانال‌های داخلی برای انتقال روان‌کار به لبه‌های برشی هستند. در این روش از مته‌های اینسرتی با نام یو-دریل<sup>2</sup> نیز استفاده می‌شود. این ابزار از اینسرت‌های متصل به هولدر تشکیل شده‌اند. از مزایای این مته‌ها می‌توان به قابلیت تعویض اینسرت‌ها برای مواد مختلف و سرعت‌های برشی بالاتر اشاره کرد. محدودیت استفاده از این مته‌ها اندازه عمق سوراخ است به‌طوری‌که حداقل عمق برش باید 4 برابر بیشتر از قطر سوراخ باشد [3].

یکی از روش‌های نوین سوراخ‌کاری، به‌منظور ایجاد سوراخی با دقت و کیفیت بالا، فرزکاری ماریچ<sup>3</sup> است. این فرآیند به تولید سوراخ توسط ابزار فرزکاری متحرک بر روی یک مسیر ماریچ اطلاق می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به برش هموار در طول عملیات، نیروی محوری کوچک و دقت بالاتر در مقایسه با سوراخ‌کاری سنتی اشاره کرد. همچنین در عملیات سوراخ‌کاری توسط مته، به دلیل هندسه گوه‌ای شکل ابزار و تغییر شکل پلاستیکی ماده‌ی قطعه‌کار، پلیسه‌های<sup>4</sup> در دهانه ابتدایی و انتهایی سوراخ ایجاد می‌گردد که با استفاده از فرزکاری ماریچ می‌توان این زائده را به نحو چشمگیری کاهش داد [4]. برتری دیگر این روش نسبت به سوراخ‌کاری معمولی، عدم نیاز به تعویض ابزار برای تولید سوراخ‌هایی با قطرهای مختلف است که به موجب آن، انعطاف‌پذیری سیستم افزایش و زمان و هزینه‌های ماشین‌کاری کاهش می‌یابد [5-7]. از این‌رو فرزکاری ماریچ به‌طور گسترده‌ای در ساخت قطعات و ابزارآلات مورد کاربرد در زمینه‌های مختلف، اعم از صنایع هوافضا، صنایع نیروگاهی و ادوات حفاری کاربرد دارد.

فاکتور موثر دیگر در تولید سوراخ با کیفیت و دقت بالا، نحوه دفع حرارت تولیدی حین فرآیند با استفاده از روان‌کاری و خنک‌کاری مناسب است. استفاده از روش‌های سنتی روان‌کاری، علاوه بر افزایش چشم‌گیر هزینه‌های ماشین‌کاری و مصرف بیش از حد سیال برشی، عدم توانایی کافی جهت نفوذ کامل سیال به منطقه برش را در پی دارد. از سوی دیگر، توجه روزافزون به مقوله‌های زیست‌محیطی و بهداشتی فعالیت‌های صنعتی و نیز افزایش سخت‌گیری مقررات دولتی، صاحبان صنایع را وادار به کاهش استفاده از سیالات برشی پایه معدنی کرده است [8]. به همین دلیل امروزه تحقیقات زیادی به‌منظور یافتن روش‌هایی جهت جایگزین کردن سیالات کم‌خطر برای محیط‌زیست، کم‌هزینه برای صنعت و کارآمد از نظر خواص روان‌کاری صورت گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان روان‌کاری جامد، خنک‌کاری برودتی و همچنین روان‌کاری نیمه‌خشک (MQL<sup>5</sup>) با استفاده از سیالات تجدیدپذیر مانند روغن‌های پایه گیاهی<sup>6</sup> را نام برد [9]. در ادامه به برخی از مطالعات صورت گرفته در زمینه ایجاد سوراخ به روش فرزکاری ماریچ اشاره شده است.

1- Deep-Hole Drilling (Gun Drilling)  
2- UDrill  
3- Helical Milling  
4- Burr  
5- Minimum Quantity Lubrication  
6- Vegetable Based Oil

7- Solid  
8- Indexable

### 2- سینماتیک فرآیند فرزکاری مارپیچ

در فرزکاری مارپیچ بر خلاف سوراخ‌کاری معمولی، قطر اسمی سوراخ نهایی ترکیبی از قطر ابزار و قطر مسیر مارپیچ است. شکل 1 سینماتیک فرزکاری مارپیچ را به تصویر کشیده است. در این فرآیند سه نوع حرکت همزمان، شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول دایره مسیر مارپیچ و حرکت محوری وجود دارد.

پیشروی در فرزکاری مارپیچ دارای سه مؤلفه است؛ سرعت پیشروی محوری به ازای هر دندان (رابطه 1)، سرعت پیشروی مماس بر لبه برشی (رابطه 2) و سرعت پیشروی مماس بر دایره مارپیچ (رابطه 3). سرعت پیشروی مماس بر مسیر ابزار از رابطه 4 قابل محاسبه است. همچنین زاویه مارپیچ حرکت ابزار و عمق محوری به ازای هر دور چرخش یا همان گام مارپیچ به ترتیب از روابط 5 و 6 بدست می‌آیند [5].

$$V_{fha} = f_{za} \times z \times n \quad (1)$$

$$V_{ft} = f_{zt} \times z \times n \quad (2)$$

$$V_{fht} = V_{ft} \times \frac{D_h}{D_B} \quad (3)$$

$$V_f = \sqrt{V_{fha}^2 + V_{fht}^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_{fha}}{V_{fht}}\right) \quad (5)$$

$$a_p = \tan(\alpha) \times \pi \times D_h \quad (6)$$

در این روابط  $z$  همان تعداد دندانه‌های تیغه فرز،  $n$  تعداد دوران اسپیندل در دقیقه، اندیس  $Z_t$  و  $Z_a$  به ترتیب پیشروی محوری و مماسی به ازای هر دندانه،  $D_h$  قطر مسیر مارپیچ و  $D_z$  قطر سوراخ می‌باشند. در فرزکاری مارپیچ هر چه نسبت قطر سوراخ به قطر ابزار بیشتر شود، نرخ براده‌برداری بیشتر شده و در نتیجه راندمان فرآیند افزایش پیدا خواهد کرد. اما این افزایش نسبت، در ایجاد سوراخ کور دارای محدودیتی است. اگر قطر ابزار کوچک‌تر از نصف قطر سوراخ باشد، عملیات به درستی انجام نخواهد گرفت. ضمن آنکه نیروهای ماشین‌کاری نیز افزایش پیدا کرده و اثرات نامطلوبی را در پی خواهند داشت.

### 3- مواد و تجهیزات مورد استفاده

آزمایش‌ها روی فولاد آلیاژی AISI4340 با دو نوع سختی انجام شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول 1 آورده شده است. به‌منظور افزایش سختی، نمونه‌ها در کوره با دمای 870 درجه سانتی‌گراد آستنیت‌گشته، سپس به مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی‌گراد برگشت داده شدند و در نهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند.

آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی دستگاه فرز کنترل عددی سه محوره کنترل همزمان مدل S1354A، با کنترلر میتسوبیسی و حداکثر دور اسپیندل 8000 دور بر دقیقه انجام شد. ابزار بکار گرفته شده نیز، تیغچه فرز سرتخت یکپارچه، 4 پر، به قطر 6 میلی‌متر، با زاویه مارپیچ 30 درجه و روکش TiAlN، ساخت شرکت گریسون<sup>1</sup> بود. تصویر ابزارها در شکل 2 آمده است.

از سیستم روان‌کاری MQL نیز با دو نازل در زاویه 45 درجه نسبت به محور ابزار بهره گرفته شد. آزمایش‌ها در حالت MQL با دو روغن معدنی و گیاهی و نیز حالت خشک با هوای فشرده انجام گرفت. دبی خروجی روغن مورد استفاده در سیستم MQL برابر با 100 میلی‌لیتر بر ساعت و فشار هوای 3 بار بودند. شکل 3 تصویر چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد.

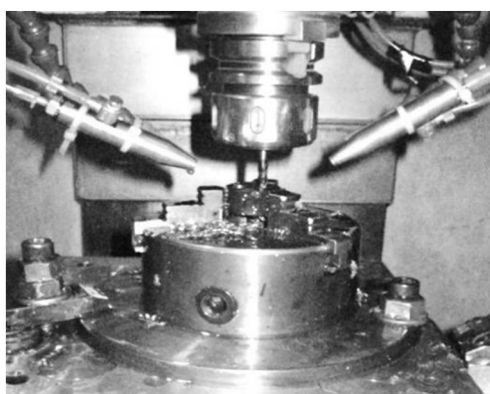
برای اندازه‌گیری تلرانس‌های ابعادی و هندسی یکی از بهترین گزینه‌ها ماشین اندازه‌گیری مختصات است. لذا در این تحقیق، از دستگاه ماشین

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4340

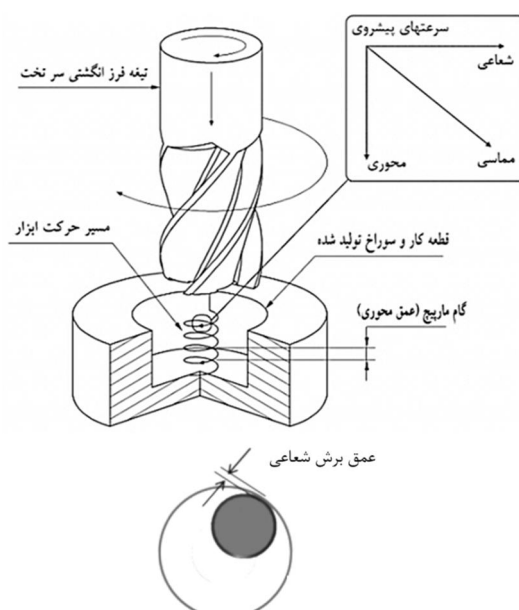
عنصر	درصد وزنی (%)
کربن	0.38
نیکل	1.7
کروم	0.9
منگنز	0.69
مولیبدن	0.3
سیلیسیوم	0.28
آهن	پایه



شکل 2 ابزار مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها



شکل 3 نمایی از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها



شکل 1 نمای سه‌بعدی نحوه حرکت ابزار داخل قطعه‌کار در فرزکاری مارپیچ

1- Garryson  
2- Coordinate Measuring Machine (CMM)

جدول 3 آرایه طراحی آزمایش L18 به‌همراه ترانس‌های اندازه‌گیری شده

شماره آزمایش	H	Vc	fz	ap	Lub	قطر سوراخ	ترانس گردی	ترانس استوانه‌ای
1	34	10	0/01	0/05	veg	8/143	0/024	0/041
2	34	10	0/04	0/1	min	8/19	0/027	0/038
3	34	10	0/07	0/15	air	8/235	0/03	0/042
4	34	40	0/01	0/05	min	8/129	0/027	0/03
5	34	40	0/04	0/1	air	8/185	0/029	0/029
6	34	40	0/07	0/15	veg	8/159	0/025	0/032
7	34	70	0/01	0/1	veg	8/124	0/015	0/023
8	34	70	0/04	0/15	min	8/15	0/02	0/029
9	34	70	0/07	0/05	air	8/184	0/029	0/041
10	45	10	0/01	0/15	air	8/231	0/03	0/043
11	45	10	0/04	0/05	veg	8/18	0/031	0/044
12	45	10	0/07	0/1	min	8/203	0/032	0/044
13	45	40	0/01	0/1	air	8/191	0/027	0/035
14	45	40	0/04	0/15	veg	8/177	0/026	0/032
15	45	40	0/07	0/05	min	8/182	0/03	0/039
16	45	70	0/01	0/15	min	8/16	0/02	0/026
17	45	70	0/04	0/05	air	8/178	0/028	0/045
18	45	70	0/07	0/1	veg	8/158	0/023	0/035

جدول 4 تحلیل واریانس قطر سوراخ تولید شده

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P
H	0/001413	1	23/65794	0/0005
Vc	0/004328	1	72/4495	< 0/0001
fz	0/001619	1	27/10643	0/0003
ap	0/001141	1	19/09495	0/001
روان کاری	0/006119	2	51/21324	< 0/0001
باقیمانده	0/000657	11		
کل	0/015278	17		

شکل 4 تا شکل 8 نیز اثر فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق را بر اندازه اسمی سوراخ به تصویر می‌کشند. مشاهده می‌شود که اندازه قطر سوراخ با توجه به شرایط برشی مختلف در بازه 8/1 میلی‌متر تا 8/2 میلی‌متر متغیر بود. شکل 4 نشان می‌دهد که افزایش سرعت برشی موجب بهبود ترانس‌های ابعادی قطعه‌کار شده و سوراخ دقیق‌تری تولید می‌کند. سرعت برشی تنها پارامتری است که دارای چنین اثر مثبتی بر روی کیفیت سوراخ می‌باشد. در واقع افزایش این پارامتر موجب افزایش حرارت و نرم‌شدن ماده در ناحیه برش شده و بهبود ترانس‌ها را به‌همراه دارد. با توجه به شکل 5 اثر پیشروی نیز بر روی دقت سوراخ به نحوی است که نرخ تغذیه بیشتر، باعث افزایش ضخامت براده نتراشیده شده و به‌موجب آن، نیروی هدایت‌کننده در راستای مسیر پیشروی ابزار ازدیاد می‌یابد. این افزایش نیرو، انحراف ابزار را در پی داشته و در نتیجه منجر به دورتر شدن قطر سوراخ از اندازه اسمی آن می‌شود [6]. شکل 6 نیز تأثیر افزایش عمق برشی محوری را بر روی اندازه اسمی سوراخ نشان می‌دهد. براساس سینماتیک فرآیند فرزکاری ماریچ، با افزایش عمق برشی محوری، گام ماریچ و در پی آن نیروهای برش افزایش می‌یابد. این

اندازه‌گیری مختصات مدل LH87 ساخت شرکت ونزل<sup>1</sup>، با قطر پراب 2 میلی‌متر از نوع تماسی و با دقت 2/7 میکرومتر استفاده گردید.

#### 4- روش انجام آزمایش

به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و بررسی و ارزیابی پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند، پنج فاکتور سختی قطعه‌کار (H)، سرعت برشی (Vc)، سرعت پیشروی (fz)، عمق برش محوری (ap) و نوع سیستم روان کاری با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از این روش طراحی آزمایش، می‌توان با اطمینان بالا و در عین حال صرف زمان کمی، تأثیر پارامترهای ورودی را بر روی خروجی آزمایش بررسی کرد. مطالعات زیادی در زمینه استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در فرآیندهای مختلف مانند فرزکاری [14] و سوراخ کاری [15] صورت گرفته و کارایی این روش به اثبات رسیده است.

برای انجام آزمایش‌ها از آرایه متعام L18 استفاده گردید و در مجموع 18 آزمایش انجام شد. جدول 2 متغیرهای آزمایش را به همراه سطوح آن‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اگر تمام حالت‌های آزمایش در نظر گرفته می‌شد، نیاز به انجام  $3^5=243$  آزمایش بود که این امر از لحاظ وقت و هزینه‌کرد، ممکن نیست. به‌منظور حذف خطای انجام آزمایش، تمامی آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام گرفت. همچنین به‌منظور بالا رفتن دقت آزمایش‌ها و کاهش خطای به وجود آمده در اثر سایش ابزار، بعد از هر 5 سیکل ماشین‌کاری، ابزار مورد استفاده تعویض گردید.

#### 5- بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که بیان شد، در مجموع 18 آزمایش صورت گرفت و در نهایت مقادیر اندازه اسمی و ترانس‌های سوراخ تولیدی به عنوان پارامترهای کیفیت سوراخ توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات اندازه‌گیری شدند. جدول 3 آرایه طراحی آزمایش L18 به‌همراه ترانس‌های اندازه‌گیری شده در هر آزمایش را نشان می‌دهد. در ادامه هرکدام از این خروجی‌ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌است.

#### 5-1- اندازه اسمی سوراخ

اندازه اسمی سوراخ به عنوان یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های کیفیت آن بوده و بیش‌ترین تأثیرپذیری را از پارامترهای برشی دارا می‌باشد. هدف ایجاد سوراخی به قطر 8/1 میلی‌متر است. جدول 4 تحلیل واریانس قطر سوراخ تولید شده را برای پارامترهای اصلی نشان می‌دهد.

مطابق جدول، مقادیر P با بزرگی کمتر از 0/05 (قابلیت اطمینان بالاتر از 95%) نشان‌دهنده معنی‌داری فاکتورها می‌باشند. نتایج حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی دارد.

جدول 2 پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها

فاکتورها	سطوح		
	سطح 1	سطح 2	سطح 3
سختی قطعه‌کار (H) (HRC)	34	45	-
سرعت برشی (Vc) (m/min)	10	40	70
پیشروی (fz) (mm/tooth)	0/01	0/04	0/07
عمق برش محوری (ap) (mm)	0/05	0/1	0/15
روان کاری (Lub)	MQL (معدنی)	MQL (گیاهی)	هوا

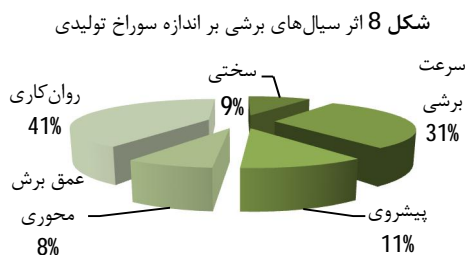
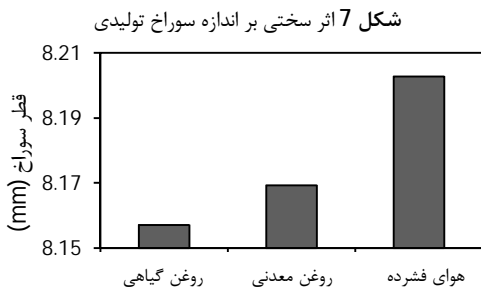
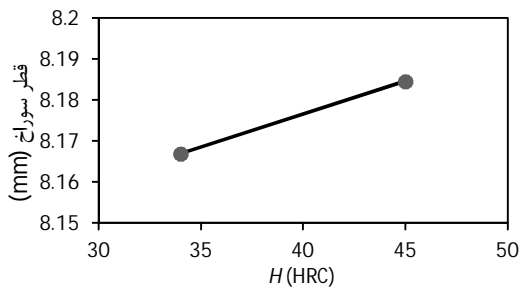
1- Wenzel

روی دقت سوراخ تولیدشده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روش روان کاری و سرعت برشی بیشترین سهم را در تغییرات تلرانس‌های ابعادی ایفا کرده و پارامترهای نرخ پیشروی، سختی قطعه کار و گام ماریچ دارای سهم کمتری می‌باشند. این تأثیر بالاتر روش روان کاری، ناشی از توانایی بالای روش MQL در مقایسه با روش‌های دیگر است.

#### 5-2- تلرانس‌های گردی<sup>1</sup>

تلرانس‌های گردی، میزان خروج از گردی در یک مقطع از سوراخ را به صورت عددی بیان می‌کند. بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی این تلرانس‌های نشان می‌دهد که بیشترین انحراف با بزرگی  $0/03$  میلی‌متر در فرزکاری با سرعت پایین و در حالت استفاده از هوای خشک بدست آمد. جدول 5 تحلیل واریانس تلرانس گردی سوراخ تولیدشده را برای پارامترهای اصلی فرآیند نشان می‌دهد. مطابق جدول، مقادیر  $P$  با بزرگی کمتر از  $0/05$  (قابلیت اطمینان بالاتر از 95%) نشان‌دهنده معنی‌دار بودن فاکتورها می‌باشند. نتایج حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی دارد. تأثیر تغییرات سرعت برشی بر تلرانس‌های گردی در شکل 10 نیز قابل مشاهده است. این نمودار نشان‌دهنده اثر مثبت افزایش سرعت برشی بر روی تلرانس‌های گردی می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان مشابه اثر سرعت برشی بر روی تلرانس‌های ابعادی، در افزایش پایداری فرآیند با بالا رفتن مقدار این پارامتر دانست.

شکل 11 نیز اثر نرخ پیشروی را بر تلرانس‌های گردی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روند تغییرات تلرانس‌های گردی با نرخ پیشروی، مشابه تلرانس‌های ابعادی می‌باشد. اما در شکل 12 بر خلاف نتیجه قبلی، با افزایش عمق برش محوری یا همان گام ماریچ فرزکاری، انحراف گردی سوراخ کمتر

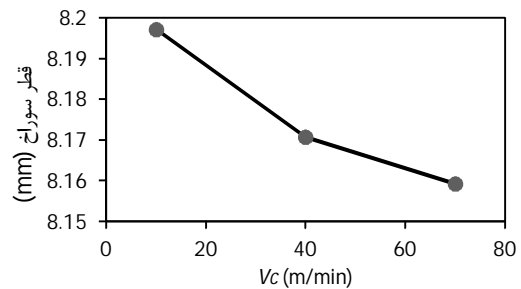


شکل 9 میزان درصد تأثیر هر یک از پارامترها بر اندازه سوراخ تولیدی

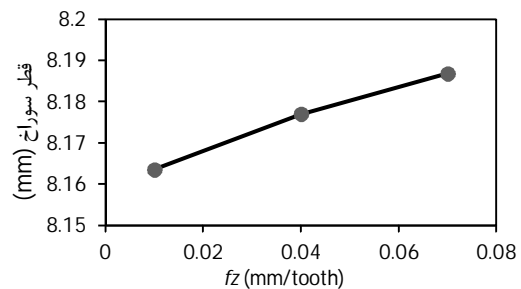
افزایش نیروی برشی، باعث بالا رفتن لرزش و ارتعاشات در فرآیند شده و وخیم‌تر شدن کیفیت سوراخ را به دنبال دارد.

همچنین براساس شکل 7 مشاهده می‌شود که با افزایش سختی قطعه کار، اندازه اسمی سوراخ تا حدودی بالاتر می‌رود، که علت را می‌توان در افزایش استحکام ماده و همچنین افزایش نیروهای ماشین‌کاری دانست [13]. علاوه بر این، نفوذپذیری کمتر ابزار در داخل قطعه کار سخت‌تر، موجب دویدگی بیشتر ابزار شده و انحرافات ابعادی را افزایش می‌دهد.

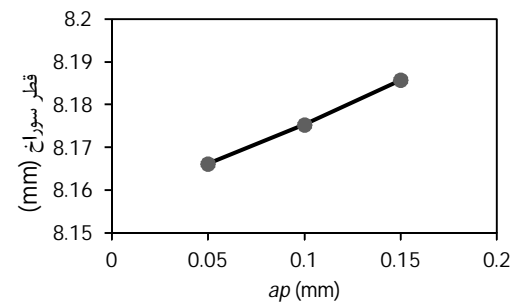
شکل 8 نیز اثر روش‌های مختلف روان کاری را بر روی اندازه اسمی سوراخ نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، فرآیند در حالت‌های خشک و روان کاری MQL با استفاده از دو سیال پایه معدنی و گیاهی انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بهترین حالت روان کاری در زمان استفاده از روش MQL می‌باشد. دلیل این برتری را می‌توان تولید یک لایه فیلم روغن در منطقه برش ما بین سطح در حال ماشین‌کاری و ابزار برش دانست. این لایه تولیدشده در زمان استفاده از روغن گیاهی به علت ویسکوزیته بالای آن، بهتر می‌تواند اصطکاک و حرارت را کاهش دهد. همچنین روغن‌های گیاهی در مقایسه با نوع معدنی مخصوصاً در مرزهای روان کاری دارای قسطیت بالایی هستند، این ویژگی به آن‌ها اجازه می‌دهد تا پیوند قوی‌تری در سطح روان کاری ایجاد کرده و پایداری لایه روانکار را افزایش دهند [8]. حالت خشک با هوای فشرده، به دلیل عدم توانایی در روان کاری و خنک‌کاری ناحیه برش، بدترین نتایج را نتیجه داد. شکل 9 میزان تأثیرگذاری پارامترها را بر



شکل 4 اثر سرعت برشی بر اندازه سوراخ تولیدی



شکل 5 اثر پیشروی بر اندازه سوراخ تولیدی

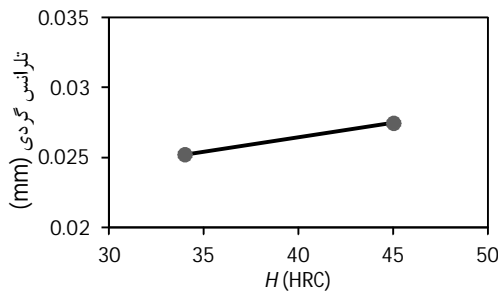


شکل 6 اثر عمق برش محوری بر اندازه سوراخ تولیدی

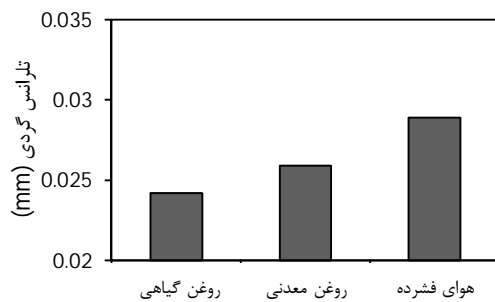
اثر سختی قطعه‌کار نیز بر روی تلرانس‌های گردی (شکل 13)، مشابه نتایج قبلی می‌باشد. شکل 14 اثر استفاده از روش‌های مختلف روان‌کاری را بر روی تلرانس‌های گردی سوراخ نشان می‌دهد. همانند تلرانس‌های ابعادی، در اینجا نیز برتری روغن گیاهی نسبت به روغن معدنی و هوای فشرده مشهود است. همچنین در شکل 15 سهم تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی تلرانس‌های گردی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که سرعت برشی بیش‌ترین تأثیر را بر روی این تلرانس‌های داشته و در ادامه نوع سیستم خنک‌کاری، پیشروی، گام ماریچ و سختی قطعه‌کار به ترتیب دارای بالاترین نقش هستند. همچنین سهم تأثیرگذاری روش روان‌کاری بر روی تلرانس‌های گردی در مقایسه با تلرانس‌های ابعادی به نصف کاهش یافته است.

### 3-5- تلرانس‌های استوانه‌ای<sup>1</sup>

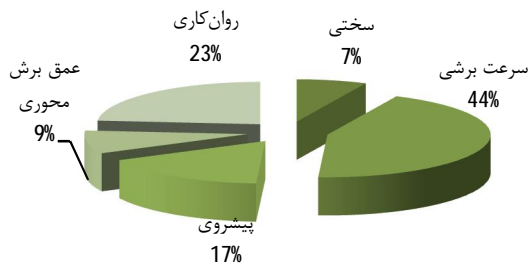
خطای استوانه‌ای بودن نوعی تلرانس‌های سه‌بعدی است که علاوه بر گردی، پارامتر دیگری بنام مستقیم بودن<sup>2</sup> محور سوراخ را نیز شامل می‌شود. در نگاه اول و با مقایسه نتایج، می‌توان افزایش قابل توجهی را در مقادیر اندازه‌گیری شده تلرانس‌های استوانه‌ای، نسبت به مقادیر تلرانس‌های گردی مشاهده کرد. این افزایش، نشان دهنده میزان تأثیر معنی‌دار پارامترهای فرآیند بر روی مستقیم‌بودن محور سوراخ تولیدی است. جدول 6 تحلیل واریانس تلرانس استوانه‌ای بودن سوراخ تولیدشده را برای پارامترهای اصلی فرآیند نشان



شکل 13 اثر سختی بر تلرانس‌های گردی سوراخ



شکل 14 اثر سیال‌های برشی بر تلرانس‌های گردی سوراخ

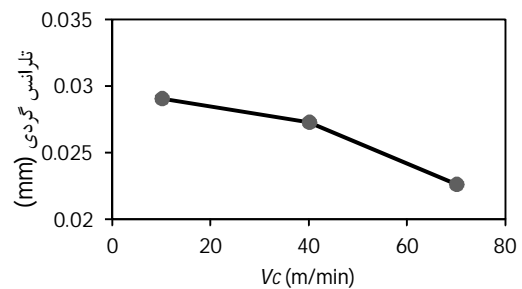


شکل 15 میزان درصد تأثیر هر یک از پارامترها بر روی تلرانس‌های گردی سوراخ

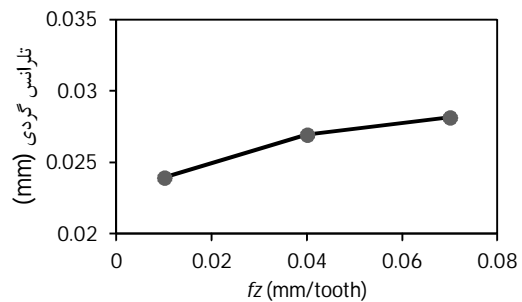
شده و در نتیجه تلرانس‌های گردی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش عمق برش محوری، هم نیروهای برشی و هم سطح درگیری ابزار با سوراخ بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و ابزار در هر مرحله باربرداری، با سطح بیشتری از قطعه‌کار درگیر می‌شود. این پدیده باعث می‌گردد که در نهایت سوراخی با پستی و بلندی کمتر به وجود آید. از سوی دیگر، با افزایش مقدار عمق برش محوری، تعداد حلقه‌های ماریچ مسیر حرکت ابزار کاهش یافته و در نتیجه طول مسیر کوتاه‌تر می‌شود. این کاهش طول مسیر، خطاهای ناشی از ماشین‌ابزار و عوامل خارجی موثر بر عملیات را کمتر کرده و پایداری بیشتر فرآیند برش را به همراه دارد [16].

جدول 5 تحلیل واریانس تلرانس گردی سوراخ تولیدشده

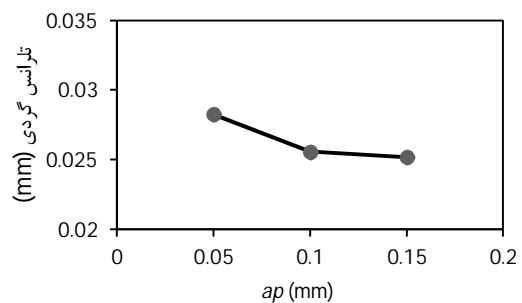
عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P
H	2/31 e-5	1	7/837288	0/0173
Vc	1/25 e-4	1	42/52655	< 0/0001
fz	5/29 e-5	1	17/93898	0/0014
ae	2/82 e-5	1	9/563842	0/0102
روان‌کاری	6/7 e-5	2	11/35989	0/0021
باقیمانده	3/25 e-5	11		
کل	3/2 e-4	17		



شکل 10 اثر سرعت برشی بر تلرانس‌های گردی سوراخ



شکل 11 اثر پیشروی بر تلرانس‌های گردی سوراخ



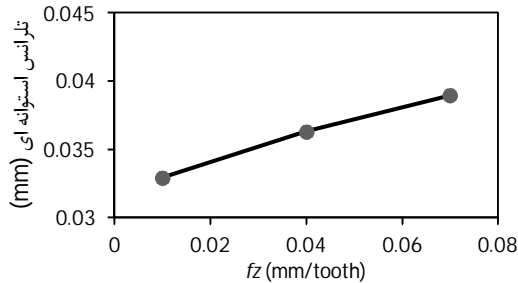
شکل 12 اثر عمق برش محوری بر تلرانس‌های گردی سوراخ

1- Cylindricity  
2- Straightness

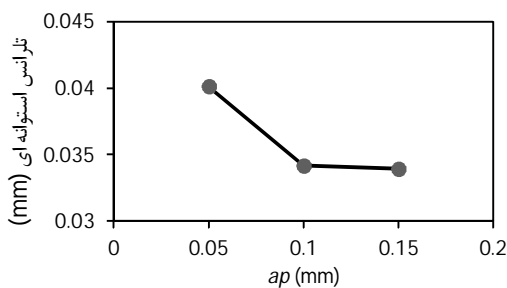
محوری و روش روان کاری، در میزان و نحوه تأثیر آن‌ها بر روی تلرانس‌های مستقیم بودن به عنوان یکی از مؤلفه‌های تلرانس‌های استوانه‌ای است.

### 6- نتیجه‌گیری

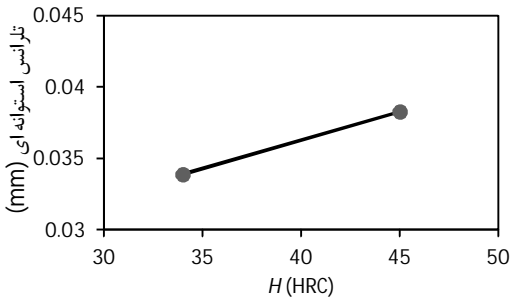
در این پژوهش فرآیند فرزکاری ماریچ به عنوان روشی نوین به منظور انجام



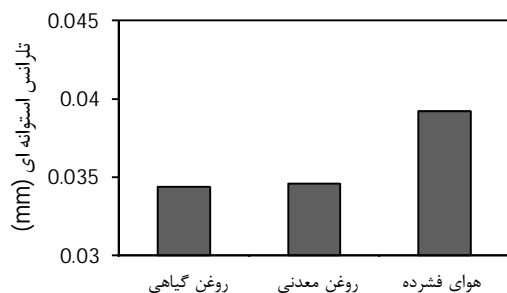
شکل 17 اثر پیشروی بر تلرانس‌های استوانه‌ای سوراخ



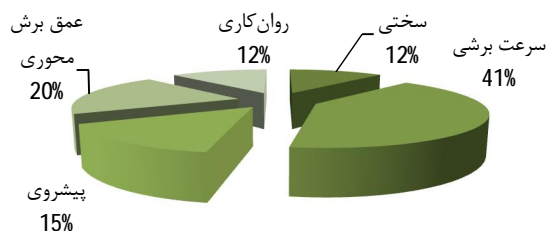
شکل 18 اثر عمق برش محوری بر تلرانس‌های استوانه‌ای سوراخ



شکل 19 اثر سختی بر تلرانس‌های استوانه‌ای سوراخ



شکل 20 اثر سیال برشی بر تلرانس‌های استوانه‌ای سوراخ



شکل 21 میزان درصد تأثیر هر یک از پارامترها در انحراف استوانه‌ای سوراخ

می‌دهد. مطابق جدول، مقادیر  $P$  با بزرگی کمتر از  $0/1$  (قابلیت اطمینان بالاتر از 90%) نشان‌دهنده معنی‌دار بودن فاکتورها می‌باشند. نتایج حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی دارد. همان‌گونه که در شکل 16 دیده می‌شود، سرعت برشی نیز دارای اثر مثبتی بر کاهش تلرانس‌های استوانه‌ای بوده و از تأثیرگذارترین عوامل می‌باشد.

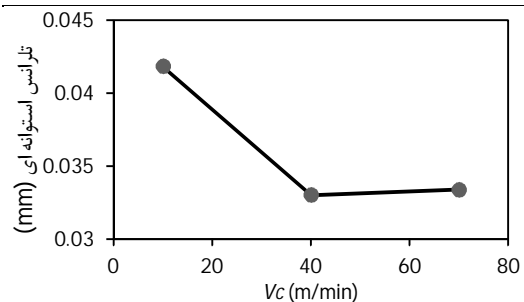
مطابق شکل 17 تا شکل 19، اثر فاکتورهای نرخ پیشروی، عمق برش محوری و سختی قطعه کار روی تلرانس‌های استوانه‌ای دارای روندی مشابه با نتایج تلرانس‌های گردی است.

نکته مهم در این نمودارها، افزایش اثر عمق برش محوری بر روی تلرانس‌های استوانه‌ای (شکل 18) است. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، این پدیده با توجه به کاهش طول مسیر حرکت ابزار و کم شدن اثرات ناخواسته ناشی از ماشین‌ابزار و عوامل خارجی دیگر، قابل انتظار بود. اثر استفاده از روش‌های روان کاری مختلف بر روی تلرانس‌های استوانه‌ای نیز در شکل 20 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بر حسب انتظار، باز هم حالت سوراخ کاری خشک با هوای فشرده، دارای بدترین عملکرد بود. همچنین تغییر نوع روغن در سیستم روان کاری MQL، تأثیر مشخصی بر روی این تلرانس‌های از خود نشان نداد. در واقع نتایج نشان می‌دهند که با بالا رفتن عمق سوراخ تولیدی، تنها روش MQL می‌تواند سیال برشی را به ناحیه برش رسانده و عمل روان کاری را انجام دهد. این میزان نفوذ سیال برشی در عمق‌های پایین‌تر سوراخ، مستقل از نوع سیال مصرفی می‌باشد.

سهام تأثیر پارامترهای اصلی بر روی تلرانس‌های استوانه‌ای در شکل 21 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اثر استفاده از نوع سیستم روان کاری بر روی این تلرانس‌های باز هم کاهش یافته و از سوی دیگر، سهم تأثیرگذاری عمق برش محوری دو برابر شده است. در واقع تلرانس‌های استوانه‌ای، ترکیبی از دو مؤلفه تلرانس‌های گردی و مستقیم بودن می‌باشد. در نتیجه با مقایسه مقادیر این تلرانس‌های با مقادیر تلرانس‌های گردی و اندازه سوراخ، می‌توان دریافت که علت این تغییرات سهم تأثیر عمق برش

جدول 6 تحلیل واریانس تلرانس استوانه‌ای بودن سوراخ تولیدشده

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار $F$	مقدار $P$
$H$	$8/62 e-5$	1	5/678774	0/0363
$V_c$	$2/15 e-4$	1	14/16057	0/0031
$f_z$	$1/09 e-4$	1	7/19069	0/0213
$a_e$	$1/14 e-4$	1	7/512022	0/0192
روان کاری	$8/94 e-5$	2	2/943462	0/0947
باقیمانده	$1/67 e-4$	11		
کل	$7/81 e-4$	17		



شکل 16 اثر سرعت برشی در تلرانس‌های استوانه‌ای سوراخ

- Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 2, pp. 483-507, 2003.
- [5] B. Denkena, D. Boehnke, J. Dege, Helical milling of CFRP-titanium layer compounds, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 64-69, 2008.
- [6] H. Li, G. He, X. Qin, G. Wang, C. Lu, L. Gui, Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-13, 2014.
- [7] Y. Shan, N. He, L. Li, W. Zhao, X. Qin, Orbital milling hole of aerospace Al-alloy with big pitch, *Transactions of Tianjin University*, Vol. 17, pp. 329-335, 2011.
- [8] S. Lawal, I. Choudhury, Y. Nukman, Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—a review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 52, No. 1, pp. 1-12, 2012.
- [9] M. Sadeghi, M. Haddad, T. Tawakoli, M. Emami, Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 5-6, pp. 487-500, 2009.
- [10] R. Iyer, P. Koshy, E. Ng, Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 205-210, 2007.
- [11] H. Sasahara, M. Kawasaki, M. Tsutsumi, Helical feed milling with MQL for boring of aluminum alloy, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 2, pp. 1030-1040, 2008.
- [12] D. Olvera, L. N. L. de Lacalle, G. Urbikain, A. Lamikiz, P. Rodal, I. Zamakona, Hole making using ball helical milling on titanium alloys, *Machining Science and Technology*, Vol. 16, No. 2, pp. 173-188, 2012.
- [13] J. L. S. Ribeiro, S. B. Diniz, J. C. C. Rubio, A. M. Abrão, Dimensional and Geometric Deviations Induced by Milling of Annealed and Hardened AISI H13 Tool Steel, *American Journal of Materials Science*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-21, 2012.
- [14] J. Ghani, I. Choudhury, H. Hassan, Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No. 1, pp. 84-92, 2004.
- [15] T. Kivak, G. Samtaş, A. Çiçek, Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills, *Measurement*, Vol. 45, No. 6, pp. 1547-1557, 2012.
- [16] J. Vivanco, C. Luis, J. Ortiz, H. González, Analysis of factors affecting the high-speed side milling of hardened die steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162, pp. 696-701, 2005.

سوراخ‌کاری بر روی فولاد AISI 4340 و در حضور سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی و سوراخ‌کاری خشک مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر پارامترهای برشی شامل سرعت برشی، پیشروی و عمق برش محوری و سختی قطعه‌کار بر روی کیفیت سوراخ تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آورده شده است.

- 1- افزایش سرعت برشی به عنوان اصلی‌ترین پارامتر موثر بر کیفیت سوراخ موجب بهبود اندازه اسمی سوراخ تولیدی شده و تنها پارامتر دارای اثر مثبت بر روی تمامی معیارهای کیفیت سوراخ تولیدی می‌باشد.
- 2- افزایش عمق برش محوری بر خلاف اثر آن بر روی تلرانس‌های ابعادی، باعث کاهش تلرانس‌های هندسی سوراخ تولیدی شده و میزان تأثیرگذاری آن بر روی تلرانس‌های استوانه‌ای دو برابر تلرانس‌های گردی است.
- 3- نتایج حکایت از عملکرد بهتر سیال برشی پایه گیاهی در مقایسه با نوع معدنی بر روی کیفیت سوراخ داشته و می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای سیال‌های برشی تجدیدناپذیر باشد.

#### 7- مراجع

- [1] H. Tonshoff, W. Spintig, W. König, A. Neises, Machining of holes developments in drilling technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 43, No. 2, pp. 551-561, 1994.
- [2] V. Marinov, Manufacturing technology, *Cutting Temperature*, pp. 74, 2006.
- [3] G. T. Smith, *Cutting tool technology: industrial handbook*: Springer, 2008.
- [4] G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena, Advancing cutting technology, *CIRP*