مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 423-430

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# مطالعه تغییرات میکروسختی در فرایندهای ایجاد سوراخ روی فولاد 4340

امیر راستی[1]، سینا صباغی فرشی[2]، محمدحسین صادقی[3*]، هادی ایمانی[2]

1-دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 143-14115 sadeghim@modares.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 آبان 1395
پذیرش: 18 دی 1395
ا ارائه در سایت: 29 دی 1395

*کلید واژگان:*
میکروسختی
سوراخ‌کاری معمولی
فرزکاری مارپیچ
فرزکاری پروفایل
فولاد AISI4340

**چکیده**

در این پژوهش، تغییرات میکروسختی لایه زیرسطحی در راهبردهای مختلف ایجاد سوراخ روی قطعه‌ای از جنس فولاد AISI4340 به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور، چهار روش فرزکاری مارپیچ، فرزکاری پروفایل و سوراخ‌کاری معمولی با و بدون پیش‌مته به‌کار گرفته شدند. طراحی آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل صورت گرفت و دو پارامتر اصلی برش شامل؛ سرعت برشی ($V_c$) و نرخ پیشروی ($f_z$) در سه سطح تغییر داده شدند. 9 آزمایش برای هر راهبرد انجام گردید و تغییرات میکروسختی لایه زیرسطحی در راستای محوری و شعاعی سوراخ در هر آزمایش بررسی شد (216 نقطه سنجش). نتایج نشان داد که فارغ از شرایط برشی، سختی در تمامی آزمایش‌ها بالاتر از سختی اولیه ماده است. بیشترین مقدار آن نیز در سطوح بالای پارامترهای برش روش سوراخ‌کاری معمولی مشاهده گردید (729 ویکرز). همچنین در تمامی راهبردها، به‌واسطه افزایش دمای قطعه و کارسختی با طولانی‌تر شدن فرایند، بیشترین مقدار سختی در دهانه خروجی سوراخ به‌وجود آمد. کمترین تغییرات میکروسختی میانگین نیز در فرآیند سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته مشاهده شد که بیانگر برتری فرایندهای سوراخ‌کاری منقطع، چند مرحله‌ای یا همراه با پیش‌مته در تولید سوراخ‌هایی با خواص یکنواخت‌تر است.

# Study of microhardness variations in hole making processes on 4340 steel

**Amir Rasti, Sina Sabbaghi Frashi, Mohammad Hossein Sadeghi*, Hadi Imani**

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 07 November 2016
Accepted 07 January 2017
Available Online 18 January 2017

*Keywords:*
Microhardness
Conventional Drilling
Helical Milling
Profile Milling
AISI4340 Steel

**ABSTRACT**

In this research, microhardness variations of subsurface in hole making on an AISI4340 steel workpiece was studied experimentally. For this purpose, four hole making methods were used including helical milling, profile milling, drilling with and without predrilling. The design of experiments utilized full factorial method in which two main cutting parameters including cutting speed (*Vc*) and feed rate (*fz*) were changed in three levels. Nine experiments were performed for each process and Hardness variations of substrate layer along the hole radial and axial distances were investigated (216 hardness measurements points). Results showed that the measured hardness in all of the experiments was higher than bulk material hardness, regardless of cutting conditions, and the maximum hardness value was found in the upper levels of cutting parameters of traditional drilling method (729 Vickers). In addition, due to workpiece temperature and work hardening increasing with prolongation of the process time, the maximum hardness value was obtained on the exit surface of hole in all processes. Also, least microhardness variations were found when using traditional drilling with predrill which represents superiority of non-continuous, multistage hole making processes and conventional drilling using predrill in creation of holes with more uniform properties.

## 1- مقدمه

فولادهای استحکام بالا به واسطه خواص مکانیکی خوب، مقاومت به ضربه و سایش بالا و همچنین مقاومت در برابر خوردگی، در گستره وسیعی از صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. فولاد آلیاژی AISI4340 با درصد کربن متوسط بین 0.25 تا 0.5 از جمله این فولادها محسوب می‌شود. ویژگی اصلی این نوع فولاد، استحکام بالا همراه با چقرمگی مناسب می‌باشد و در ساخت قطعات مورد استفاده در صنایع سنگین مانند چرخ‌دنده‌ها، قطعات مختلف هواپیما، مته‌های حفاری و وسایل نقلیه به‌کار می‌رود [2]. اما از سوی دیگر، خواص منحصربه‌فرد و توانایی نگه‌داشتن این خواص در شرایط محیطی و مکانیکی سخت، قابلیت ماشین‌کاری این آلیاژ را تحت تأثیر قرار داده است، به‌طوری‌که در زمره آلیاژهای سخت ماشین‌کاری شونده قرار می‌گیرد [3].

یکی از فرایندهای پرکاربرد در تولید قطعاتی از این جنس (مانند مته‌های حفاری)، فرایند سوراخ‌کاری است. روش‌های مختلفی برای ایجاد سوراخ وجود دارند که هرکدام دارای ویژگی‌های خاصی هستند. این روش‌ها هرکدام در ورود و خروج ابزار، نوع براده‌برداری و نحوه درگیری ابزار و قطعه کار با یکدیگر متفاوت هستند. این تفاوت‌ها بر بسیاری از پارامترهای کیفیتی

**Please cite this article using:**

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

A. Rasti, S. Sabbaghi Frashi, M. H. Sadeghi, H. Imani, Study of microhardness variations in hole making processes on 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 423-430, 2017 (in Persian)

سطح، نیروهای وارد به ابزار و قطعه‌کار و بسیاری از پارامترهای متأثر از ماشین‌کاری تاثیر می‌گذارند. در فرایند سوراخ‌کاری معمولی، با توجه به هندسه گوه‌ای شکل مته مارپیچ و صفر بودن سرعت برشی در نوک ابزار، فشار بالایی حین انجام عملیات برای شکافتن ماده و درگیری لبه برشی با قطعه‌کار به وجود می‌آید [4].

در واقع مکانیزم باربرداری با مته، باعث تغییرشکل پلاستیک شدید در موضع برش می‌شود که این امر، نیرو و اصطکاک را شدیداً بالا می‌برد. راهبردهای دیگری که اخیرا برای ایجاد سوراخ مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از فرایندهای فرزکاری مارپیچ و پروفایل است. برای ایجاد سوراخ با استفاده از این روش‌ها، از ابزار فرزی با قطر کوچک‌تر از قطر سوراخ استفاده می‌شود. در این روش‌ها، ابزار دارای سه نوع حرکت هم‌زمان شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول محور مسیر مارپیچ و حرکت محوری است [5].

تفاوت روش فرزکاری پروفایل نسبت به مارپیچ در حرکت انتقالی ابزار موازی راستای محور سوراخ می‌باشد. در واقع، در این روش ابتدا ابزار در یک صفحه ثابت به حول محور سوراخ چرخیده و سپس با یک حرکت انتقالی در راستای محور سوراخ به صفحه بعدی حرکت می‌کند. در این حالت فاصله بین این دو صفحه نشان‌دهنده عمق برش محوری است.

با این‌حال، تمامی فرایندهای سوراخ‌کاری مانند سایر فرایندهای برش همواره با تغییرشکل پلاستیک در سطح قطعه‌کار همراه هستند. این تغییرشکل پلاستیک موجب افزایش سختی در مقیاس میکروی لایه‌های سطحی و زیرسطحی قطعه ماشین‌کاری شده می‌شود که مقدار آن با پیشروی در عمق قطعه کاهش می‌یابد [6]. زمانی که درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین‌کاری از دمای آستنیتی‌شدن[1] فراتر می‌رود (به‌علت اصطکاک لبه انباشته و کرنش پلاستیک)، فاز آستنیت تغییر کرده و ضمن کوئنچ شدن[2]، لایه تغییریافته شکننده‌ای با نام لایه سفید به وجود می‌آید. این لایه مارتنزیتی تنش پسماند بالایی داشته و بسیار ترد است که در نتیجه می‌تواند روی رفتار سایشی و استحکام خستگی ماده تاثیر منفی بگذارد. بنابراین اندازه‌گیری سختی و تردی این لایه در بررسی سلامت سطح قطعه اهمیت بسیاری دارد [7].

خواص این لایه را می‌توان توسط اندازه‌گیری میکروسختی سطح و عمق لایه مورد بررسی قرار داد. گفتنی است که بیشترین مقادیر میکروسختی در لایه سطحی قطعه ماشین‌کاری شده به‌وجود می‌آید [8]. بررسی میکروسختی به‌عنوان یکی از فاکتورهای اصلی سلامت سطح، از مهم‌ترین جنبه‌هایی است که در ارزیابی کیفیت سطوح ماشین‌کاری شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه به بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه روش‌های مختلف ایجاد سوراخ و همچنین مطالعات صورت گرفته در زمینه میکروسختی پرداخته می‌شود.

لی و لیو [9] توپوگرافی و زبری سطح سوراخ‌های ایجاد شده از طریق فرآیند فرزکاری مارپیچ را مورد مطالعه قرار داده و اعلام کردند که وابستگی غیرخطی میان کیفیت سطح و نرخ پیشروی وجود دارد، به‌طوری که هرگاه پیشروی کمتری انتخاب شود، کیفیت سطح بهتری حاصل خواهد شد.

اوربیکن و همکاران [10] در پژوهشی روی روش‌های مختلف ایجاد سوراخ نتیجه گرفتند که مقادیر زبری سطح به‌دست آمده در فرزکاری مارپیچ کمتر از سوراخ‌کاری معمولی است. آن‌ها همچنین با اندازه‌گیری انحراف قطر سوراخ در 2 مقطع دریافتند که سوراخ‌های ایجاد شده به روش فرزکاری مارپیچ انحراف کمتری نسبت به روش سوراخ‌کاری معمولی دارند.

سعادت‌بخش و همکاران [11] در یک بررسی تجربی به مقایسه فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی روی فولاد AISI4340 پرداختند. آن‌ها دریافتند که براده حاصل از فرزکاری مارپیچ منفصل بوده و به‌دلیل خارج از مرکز بودن ابزار فضای بیشتری برای خروج دارد، در نتیجه تماس کمتری با دیواره سوراخ خواهد داشت اما براده در سوراخ‌کاری معمولی به‌صورت پیوسته است و تنها راه خروج آن شیار مارپیچ مته است که در هنگام خروج با دیواره سوراخ برخورد کرده و باعث خراش دیواره سوراخ می‌شود.

کو و کیم [12]، سلامت سطح فولاد سخت AISI52100 را طی فرایند تراش‌کاری منقطع مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که ضخامت لایه سخت‌شده تحت تاثیر عمق برش محوری و سایش ابزار می‌باشد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که حرارت تولید شده در ناحیه برش، نقش اصلی را روی اندازه تنش‌های پسماند و ضخامت لایه سفید ایفا می‌کند.

لی و همکاران [13] در مطالعه سلامت سطح در فرزکاری فولاد سخت اعلام کردند که کارسختی ناشی از بارگذاری مکانیکی سبب افزایش میکروسختی سطح ماشین‌کاری شده نسبت به لایه‌های زیرین می‌شود.

وو و همکاران [14] سلامت سطح را در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که نرخ پیشروی و سرعت برشی بیشترین تاثیر را بر میکروسختی سطح دارند.

الورا و همکاران [15] میکروسختی را در سوراخ‌های ایجاد شده با استفاده از سه راهبرد سوراخ‌کاری معمولی، فرزکاری مارپیچ و فرزکاری مارپیچ کانتوری[3] روی آلیاژ تیتانیوم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با اندازه‌گیری میکروسختی در دو جهت لبه طولی سوراخ و بدنه و در سه نقطه ابتدا، میانه و انتهای سوراخ مشاهده نمودند که توزیع میکروسختی در فرزکاری مارپیچ و کانتوری بر میکروسختی بسیار شبیه یکدیگر بوده و در مقایسه با سوراخ‌کاری معمولی، تأثیر بیشتری بر تغییرات میکروسختی داشتند.

کینگ ژاوو و همکاران [16] با مطالعه کیفیت سطح سوراخ‌های تولیدی به روش سوراخ‌کاری معمولی و فرزکاری مارپیچ روی آلیاژ تیتانیوم دریافتند که دمای برش در فرزکاری مارپیچ کمتر از مقداری است که باعث تغییرات فازی سطح گردد. از این‌رو، دلیل اصلی تغییرات میکروسختی سطح سوراخ در فرزکاری مارپیچ را تغییرشکل پلاستیک و کار سختی اعلام کردند. این در حالی است که مکانیزم اصلی این تغییرات در سوراخ‌کاری معمولی، دمای بالای منطقه برش و تغییر فاز ناشی از آن بود.

شارمان و همکاران [17] نیز مطالعه مقایسه‌ای روی سلامت سطح سوراخ‌های ایجاد شده از طریق روش‌های سوراخ‌کاری معمولی، برقوکاری و داخل‌تراشی روی آلیاژ اینکونل 718 صورت دادند و دریافتند که مقادیر میکروسختی در فرآیندهای برقوکاری و داخل‌تراشی بسیار نزدیک به هم بوده و در مقایسه با سوراخ‌کاری معمولی، تغییرات میکروسختی این دو فرآیند در راستای عمق قطعه ناچیز است.

مطالعه و بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که گزارشی در زمینه بررسی تجربی توزیع میکروسختی در فرایند سوراخ‌کاری فولادهای استحکام بالا منتشر نشده است. همچنین اثر فرایند فرزکاری پروفایل نیز روی کیفیت سطح مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش به مطالعه تغییرات

[1] Austenite
[2] Quench
[3] Contour Milling

میکروسختی لایه زیرسطحی به‌عنوان یکی از پارامترهای اصلی سلامت سطح در فرایندهای مختلف ایجاد سوراخ روی فولاد AISI4340 و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته می‌شود.

## 2- مواد و تجهیزات مورد استفاده

جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق، فولاد AISI4340 با سختی متوسط 560 ویکرز بود. ترکیب شیمیایی فولاد به‌دست آمده از آزمایش کوانتومتری در جدول 1 ارائه شده است. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی قطعه‌ای با ابعاد 10×100×200 میلی‌متر انجام شد. برای افزایش سختی، ابتدا دمای قطعه‌کار توسط کوره خلأ به آرامی تا دمای 870 درجه سانتی‌گراد بالا برده شد و تا آستنیته شدن کامل در این دما نگهداری گردید. سپس با استفاده از حمام روغن، دمای قطعه‌کار تا حدود 100 درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. در ادامه برای انجام عملیات بازپخت، قطعه در دمای 260 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت حرارت داده شد و در نهایت در هوا خنک گردید.

در این پژوهش، چهار روش ایجاد سوراخ شامل فرزکاری مارپیچ، فرزکاری پروفایل و سوراخ‌کاری معمولی با و بدون پیش‌مته به‌کار گرفته شدند. تمامی آزمایش‌ها توسط ماشین فرز کنترل عددی سه محوره مدل VMC850 با کنترلر فانوک[1] و حداکثر دوران اسپیندل 8000 دور بر دقیقه و در شرایط روان‌کاری خشک انجام شد. همچنین از ابزار فرز انگشتی سرتخت کاربایدی به قطر 6 میلی‌متر برای فرزکاری مارپیچ و پروفایل و از مته‌های کاربایدی با قطر 6 و 10 میلی‌متر با روکش TiN برای سوراخ‌کاری معمولی استفاده گردید (شکل 1).

برای اندازه‌گیری میکروسختی نمونه‌ها نیز از دستگاه سختی‌سنج بوهلر[2] مدل میکرومت1[3] با دقت 1 ویکرز بهره‌گرفته شد. اندازه‌گیری تحت نیروی 0.5 کیلوگرمی و در مدت زمان 4 ثانیه انجام گردید. "شکل 2" دستگاه سختی‌سنج را به همراه ایندنتور مورد استفاده نمایش می‌دهد.

**جدول 1** ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژی 4340

**Table 1** Chemical composition of 4340 alloy steel

| عنصر | درصد وزنی (٪) |
|---|---|
| کربن | 0.38 |
| نیکل | 1.70 |
| کروم | 0.90 |
| منگنز | 0.69 |
| مولیبدن | 0.30 |
| سیلیسیوم | 0.28 |
| آهن | پایه |

**Fig. 1** Tungsten carbide flat end mill and drill bits with diameter of 6 and 10 mm used in tests

**شکل 1** فرز انگشتی و مته‌های کاربایدی قطر 6 و 10 میلی‌متر مورد استفاده در آزمایش‌ها

[1] Fanuc
[2] Buehler
[3] Micromet1

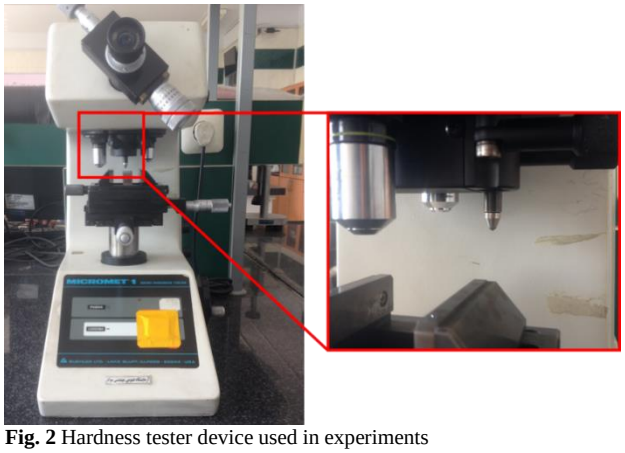

**Fig. 2** Hardness tester device used in experiments

**شکل 2** دستگاه سختی‌سنج مورد استفاده در آزمایش‌ها

## 3- روش انجام آزمایش

همان‌طور که اشاره گردید، در این پژوهش چهار روش ایجاد سوراخ شامل فرزکاری مارپیچ، فرزکاری پروفایل و سوراخ‌کاری معمولی با و بدون پیش‌مته به‌کارگرفته شدند. "شکل 3" سینماتیک روش‌های ذکر شده را به تصویر کشیده است. در هرکدام از این روش‌ها، مسیر حرکت و نوع ابزار با یکدیگر متفاوت است که بر کیفیت و دقت سوراخ نهایی موثر است.

در فرزکاری مارپیچ و پروفایل، سه نوع حرکت همزمان شامل؛ چرخش وضعی، چرخش حول دایره مارپیچ و جابجایی محوری ابزار وجود دارد. در استراتژی فرزکاری پروفایل، ابزار ابتدا در صفحه‌ای ثابت حول محور سوراخ چرخیده و سپس، با حرکت انتقالی محوری در راستای محور سوراخ به صفحه بعدی حرکت می‌کند. اما در فرزکاری مارپیچ، حرکت ابزار به‌صورت پیوسته و روی یک مارپیچ سه‌بعدی مشخص و ثابت است. بر همین اساس نرخ پیشروی در صفحه عمود به محور ابزار در این دو فرایند به‌صورت روابط (1) و (2) درخواهد آمد.

فرزکاری مارپیچ: $f_{zt} = f_z \cos\alpha$ (1)

فرزکاری پروفایل: $f_{zt} = f_z$ (2)

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{a_p}{2\pi r} \quad (3)$$

که در این رابطه $\alpha$ زاویه مارپیچ، $a_p$ عمق برش محوری و $r$ شعاع ابزار فرزکاری می‌باشند. سوراخ‌کاری معمولی نیز برای دو حالت معمولی (بدون پیش مته) و همراه با پیش مته صورت گرفت. در حالت دوم، ابتدا توسط مته

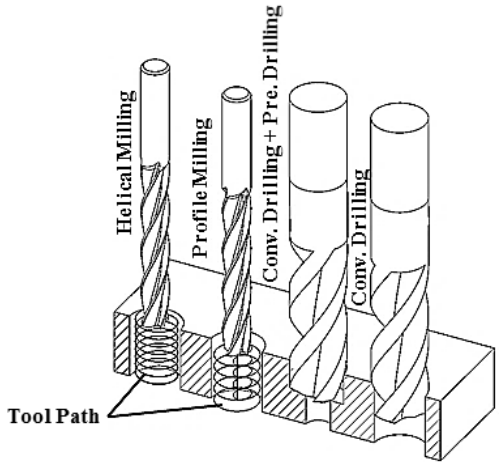


**Fig. 3** Kinematics of hole making strategies

**شکل 3** سینماتیک راهبردهای سوراخ‌کاری به کار رفته

قطر 6 میلی‌متر، سوراخی اولیه ایجاد گردید و سپس با مته قطر 10 میلی‌متر سوراخ نهایی زده شد.

به‌منظور مطالعه توزیع میکروسختی سوراخ در راهبردهای مختلف سوراخ‌کاری و همچنین بررسی تاثیر پارامترهای این فرایند روی آن، دو پارامتر اصلی برش شامل؛ سرعت برشی ($V_c$) و نرخ پیشروی ($f_z$) در سه سطح تغییر داده شدند. آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل[1] طرح‌ریزی شده و در مجموع، 9 آزمایش برای هر راهبرد سوراخ‌کاری انجام گرفت. آزمایش‌ها به‌منظور جلوگیری از بروز خطا، به‌صورت تصادفی انجام شدند (مجموع 36 آزمایش سوراخ‌کاری). جدول 2 پارامترهای مورد بررسی به همراه مقادیر آن‌ها را در راهبردهای مختلف ایجاد سوراخ نشان می‌دهد. هدف در تمامی آزمایش‌ها ایجاد سوراخی راه به در و با قطر نامی 10 میلی‌متر بود.

با توجه به سطح منحنی سوراخ، امکان اندازه‌گیری صحیح میکروسختی روی سطح آن وجود نداشت. لذا در این پژوهش تغییرات میکروسختی لایه زیرسطحی در راستای عمقی (فاصله شعاعی از سطح) و محوری سوراخ بررسی شد. به‌همین منظور، قطعه‌کار سوراخ‌کاری شده به‌صورت عرضی توسط دستگاه وایرکات، برش خورده و پس از پولیش‌زنی سطح، سختی سنجی در چهار نقطه به فواصل 25، 50، 75 و 100 میکرومتری از لایه سطحی و دو نقطه در راستای محور سوراخ صورت گرفت [18] (شکل 4).

## 4- نتایج و بحث

همان‌گونه که ذکر شد در مجموع 36 آزمایش صورت گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقدار میکروسختی در 6 نقطه اندازه‌گیری گردید (در مجموع 216 نقطه سنجش میکروسختی). مقادیر به‌دست آمده سختی این نقاط در شرایط برشی مختلف و برای تمامی راهبردهای ایجاد سوراخ در جدول 3 ارائه شده است. بررسی اولیه این مقادیر نشان داد که فارغ از شرایط برشی، مقدار سختی نزدیک به سطح سوراخ بالاتر از سختی اولیه ماده بود. بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده نیز برابر با 729 ویکرز و در سوراخ‌کاری معمولی مشاهده گردید. در ادامه، پس از بررسی اثر پارامترهای برش روی میکروسختی لایه زیرسطحی، به بررسی و مقایسه توزیع این پارامتر در راستای شعاعی و محوری سوراخ، در راهبردهای مختلف سوراخ‌کاری پرداخته می‌شود.

### 4-1- اثر پارامترهای برش روی میکروسختی

به‌منظور مطالعه توزیع میکروسختی در فرایندهای تولید سوراخ، تغییرات مقدار میانگین این پارامتر در نزدیک‌ترین نقاط به سطح سوراخ (نقاط 1، 5 و 6) و در سطوح مختلف پارامترهای برشی مورد بررسی قرار گرفت.

تغییرات سختی در قطعه سوراخ‌کاری شده، توسط دو مکانیزم اصلی قابل توجیه است. در مکانیزم اول، گرادیان دمایی شدید ناحیه برش باعث تغییر فاز ماده شده و با سرد شدن سریع، افزایش سختی را نتیجه می‌دهد. مکانیزم دوم، تغییر شکل و اندازه دانه به علت تغییرشکل پلاستیک شدید در اثر کار مکانیکی و بروز پدیده کارسختی[2] است [19]. در مجموع، میزان اثرگذاری این مکانیزم‌ها و برهم‌کنش آن‌ها بر یکدیگر، سختی سطح نهایی را تعیین می‌کنند.

"شکل 5 (الف)" تغییرات میانگین میکروسختی را در سرعت‌های برشی مختلف و در راهبردهای فرزکاری مارپیچ و پروفایل نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش سرعت برشی تا 110 متربردقیقه، میکروسختی لایه زیرسطحی به میزان 37.8 ویکرز نسبت به سرعت برشی 30 متربردقیقه در فرزکاری مارپیچ افزایش می‌یابد. همین تغییرات در فرزکاری پروفایل برابر با 23.3 ویکرز بود. این پدیده را می‌توان ناشی از افزایش درجه حرارت در موضع برش و نفوذ بیشتر آن به لایه زیرسطحی دانست. بالا رفتن درجه حرارت موضع برش با تغییر فاز ماده همراه است که به دنبال آن و با افزایش سرعت سرد شدن، سطح سخت‌تر می‌شود [20].

افزایش نرخ پیشروی تا بالاترین سطح در فرزکاری مارپیچ نیز میکروسختی لایه زیرسطحی شده را به میزان 30.9 ویکرز نسبت به نرخ پیشروی 0.03 میلی‌متر بر دندانه افزایش داد. در حقیقت، ماده نرخ کرنش بالاتری را در مقادیر بالاتر نرخ پیشروی تجربه می‌کند و سختی سطح در اثر بالا رفتن نیروهای ماشین‌کاری و کارسختی ناشی از آن افزایش می‌یابد. همین تغییرات در فرزکاری پروفایل برابر با 8.5 ویکرز بود (شکل 5 (ب)) که نشان‌دهنده تاثیر ناچیز نرخ پیشروی در این راهبرد است.

همچنین نمودار تغییرات میکروسختی لایه زیر سطحی در فرایند سوراخ‌کاری معمولی با سرعت برشی در "شکل 5 (ج)" نشان داده شده است. با افزایش سرعت برشی در بازه مورد مطالعه، میکروسختی در فرایندهای سوراخ‌کاری با و بدون پیش مته، به ترتیب 11.3 و 38.3 ویکرز تغییر می‌کند. این نتایج بیانگر تغییرات ناچیز میکروسختی سطح با افزایش سرعت برشی در فرایند سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته است.

در واقع حین سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته، به این علت که نوک مته (با سرعت برشی صفر) با سطح قطعه‌کار درگیری ندارد، نیروهای شخم‌زنی در این ناحیه حذف می‌گردند. بنابراین اثر کاهنده سرعت برشی بر این نیروها نیز پایین‌تر خواهد بود و تاثیر کمتری نیز بر ماهیت فرایند سوراخ‌کاری می‌گذارد. "شکل 5 (د)" نیز تغییرات میکروسختی لایه زیرسطحی را با افزایش نرخ پیشروی در فرایندهای سوراخ‌کاری معمولی نشان می‌دهد. براساس این

**جدول 2** پارامترهای اصلی فرایندهای ایجاد سوراخ به همراه سطوح تغییرات

**Table 2** Hole making processes parameters and their variation levels

| استراتژی‌های سوراخ‌کاری | پارامتر برش | سطح 1 | سطح 2 | سطح 3 |
|---|---|---|---|---|
| فرزکاری مارپیچ و پروفایل | $V_c$ (m/min) | 30 | 70 | 110 |
| | $f_z$ (mm/tooth) | 0.03 | 0.05 | 0.07 |
| | $ap$ (mm) | - | 0.2 | - |
| سوراخ‌کاری بدون پیش‌مته و با پیش‌مته | $V_c$ (m/min) | 10 | 20 | 30 |
| | $f_z$ (mm/tooth) | 0.01 | 0.03 | 0.05 |

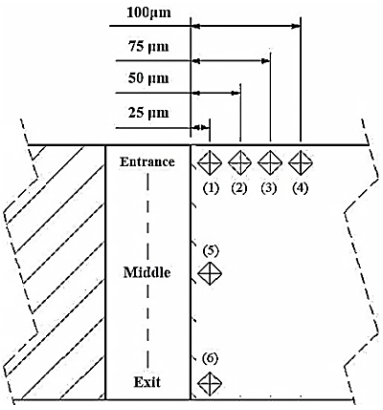


**Fig. 4** Point locations of microhardness measurements

**شکل 4** موقعیت نقاط اندازه‌گیری میکروسختی

[1] Full Factorial
[2] Work Hardening

**جدول 3** مقادیر میکروسختی 6 نقطه اندازه‌گیری در هر آزمایش و برای راهبردهای مختلف ایجاد سوراخ

**Table 3** Microhardness values of 6 measurement points at each experiment and for different hole making strategies

| | شماره آزمایش | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| فرزکاری مارپیچ | *Vc* | 30 | 70 | 110 | 30 | 70 | 110 | 30 | 70 | 110 |
| | *fz* | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| | 1 | 593 | 601 | 620 | 596 | 605 | 622 | 631 | 641 | 671 |
| | 2 | 591 | 598 | 610 | 602 | 607 | 607 | 595 | 610 | 619 |
| | 3 | 586 | 572 | 579 | 574 | 573 | 593 | 583 | 590 | 585 |
| | 4 | 561 | 563 | 562 | 560 | 567 | 561 | 560 | 558 | 561 |
| | 5 | 618 | 624 | 634 | 627 | 626 | 647 | 626 | 647 | 687 |
| | 6 | 620 | 653 | 674 | 635 | 661 | 671 | 643 | 666 | 703 |
| فرزکاری پروفایل | 1 | 593 | 609 | 631 | 594 | 616 | 636 | 607 | 653 | 642 |
| | 2 | 581 | 592 | 589 | 575 | 598 | 607 | 607 | 619 | 613 |
| | 3 | 571 | 577 | 578 | 567 | 583 | 588 | 572 | 595 | 598 |
| | 4 | 563 | 561 | 564 | 559 | 561 | 565 | 564 | 560 | 561 |
| | 5 | 615 | 624 | 638 | 631 | 626 | 637 | 624 | 624 | 644 |
| | 6 | 630 | 634 | 659 | 633 | 634 | 638 | 640 | 624 | 652 |
| سوراخ‌کاری سنتی | *Vc* | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| | *fz* | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| | 1 | 610 | 651 | 632 | 617 | 679 | 667 | 621 | 662 | 689 |
| | 2 | 597 | 603 | 621 | 609 | 621 | 633 | 607 | 609 | 631 |
| | 3 | 587 | 592 | 602 | 583 | 596 | 601 | 594 | 596 | 603 |
| | 4 | 558 | 563 | 562 | 561 | 561 | 559 | 565 | 570 | 571 |
| | 5 | 629 | 648 | 646 | 653 | 677 | 677 | 631 | 669 | 691 |
| | 6 | 632 | 641 | 651 | 659 | 671 | 665 | 650 | 674 | 729 |
| سوراخ‌کاری سنتی بدون پیش‌مته | 1 | 583 | 590 | 602 | 612 | 633 | 627 | 629 | 636 | 634 |
| | 2 | 577 | 593 | 601 | 586 | 601 | 593 | 591 | 600 | 597 |
| | 3 | 564 | 581 | 596 | 588 | 574 | 586 | 579 | 601 | 600 |
| | 4 | 559 | 561 | 562 | 558 | 563 | 561 | 561 | 557 | 566 |
| | 5 | 596 | 601 | 598 | 614 | 624 | 629 | 627 | 641 | 639 |
| | 6 | 591 | 606 | 607 | 623 | 627 | 630 | 631 | 657 | 642 |

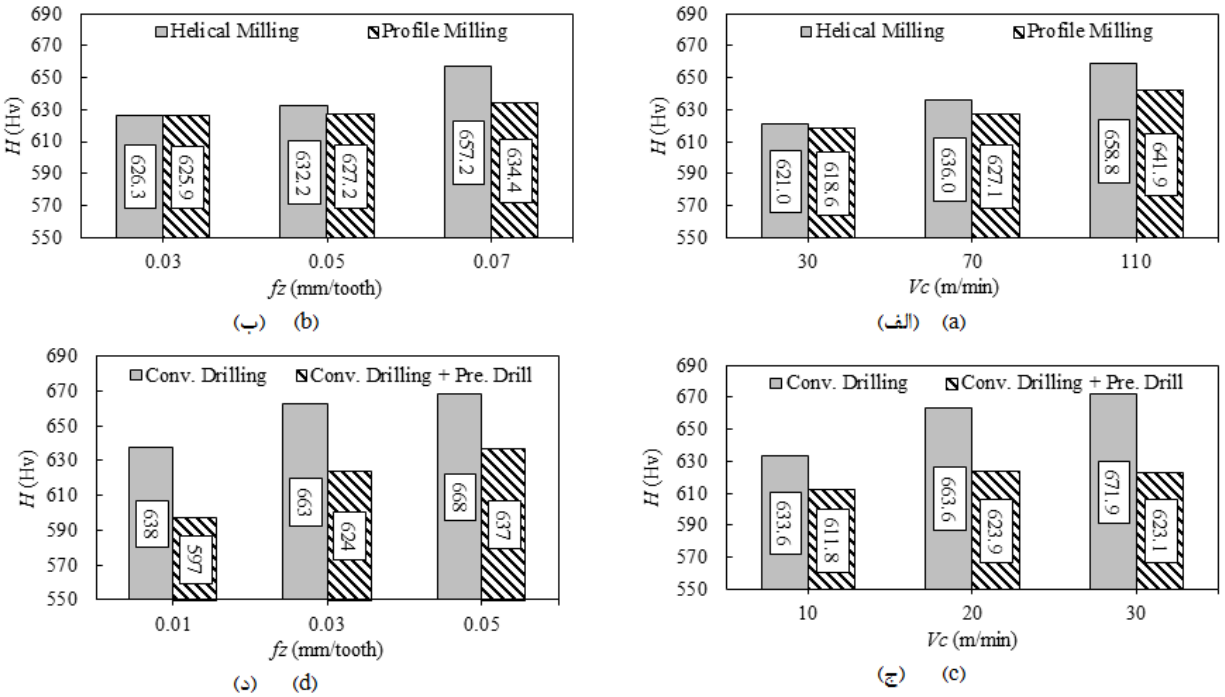


**Fig. 5** Variations of average microhardness versus a) cutting speed in helical and profile milling b) feed rate in helical and profile milling c) cutting speed in convectional drilling with and without predrilling d) feed rate in convectional drilling with and without predrilling

**شکل 5** تغییرات میانگین میکروسختی با الف) سرعت برشی در استراتژی‌های فرزکاری مارپیچ و پروفایل ب) نرخ پیشروی در استراتژی‌های فرزکاری مارپیچ و پروفایل ج) سرعت برشی در سوراخ‌کاری معمولی همراه با و بدون پیش مته د) نرخ پیشروی در سوراخ‌کاری معمولی همراه با و بدون پیش مته

نمودار، با افزایش نرخ پیشروی، میکروسختی در فرایندهای سوراخ‌کاری با و بدون پیش مته، به ترتیب 30.2 و 40.2 ویکرز ازدیاد پیدا می‌کند که به واسطه افزایش نرخ براده‌برداری با بیشتر شدن این پارامتر است.

### 4-2- توزیع میکروسختی در راستای شعاعی

به‌منظور مطالعه بهتر میکروسختی و با توجه به تاثیر نسبتا بالاتر سرعت برشی، تغییرات مقدار میانگین این پارامتر در فواصل شعاعی مشخص از لبه

سوراخ (نقاط 1، 2، 3 و 4) و در سطوح مختلف سرعت برشی مورد بررسی قرار گرفت. "شکل 6" تغییرات میانگین میکروسختی نقاط مورد بررسی را برای راهبردهای مختلف ایجاد سوراخ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که با دورشدن از سطح سوراخ، میکروسختی لایه زیرسطحی در تمامی راهبردهای سوراخ‌کاری کاهش می‌یابد و مقدار آن در فاصله 100 میکرومتری به سختی فلز پایه می‌رسد (560 ویکرز). این امر با توجه به کاهش اثر حرارت و کارسختی موضع برش در فواصل دورتر از سطح قابل توجیه است.

"شکل 6 (الف)" نشان می‌دهد که در فرآیند فرزکاری مارپیچ، کاهش میکروسختی لایه زیرسطحی دارای شیب تقریبا یکنواختی بوده و نرخ کاهش سختی در سرعت برشی 110 متر بر دقیقه شدیدتر است (کاهش 12٪). با توجه به "شکل 6 (ب)" نیز مشخص می‌شود که با گذر از سرعت برشی 70 متربردقیقه در فرزکاری پروفایل، افزایش سرعت برشی تاثیر ناچیزی بر توزیع میکروسختی لایه زیرسطحی دارد.

همچنین براساس "شکل 6 (ج)"، بیشینه تغییرات میکروسختی در عمق قطعه (راستای شعاعی) برای سوراخ‌کاری معمولی در حدود 15٪ است. این در حالی است که استفاده از پیش‌مته در فرآیند سوراخ‌کاری معمولی باعث کاهش شدید بازه تغییرات میکروسختی در عمق قطعه تا 9.3٪ می‌شود (شکل 6 (د)). علاوه براین، روند تغییرات میکروسختی در تمامی سرعت‌های برشی مشابه یکدیگر می‌باشند. این پدیده نشان‌دهنده پایداری بالای فرآیند سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته است.

به‌منظور مقایسه بهتر، مقادیر میکروسختی نقاط 1 تا 4 برای تمامی آزمایش‌ها میانگین‌گیری گردید و به‌عنوان مقدار میکروسختی فرآیند در آن نقطه لحاظ گردید (شکل 7). در واقع هر میله از این نمودار بیانگر میانگین میکروسختی در 9 آزمایش است. مشاهده می‌شود که این مقادیر میانگین در تمامی فرآیندها به جز سوراخ‌کاری معمولی بدون پیش‌مته تقریبا یکسان است. با این حال در فاصله 100 میکرومتری از لبه سوراخ، سختی قطعه در تمامی فرآیندها به سختی فلز پایه می‌رسد.

پر واضح است که دلیل اصلی بالاتر بودن مقادیر میکروسختی در فرایند سوراخ‌کاری معمولی، بیشتر بودن نرخ براده‌برداری بر واحد زمان در سوراخ‌کاری با پیش‌مته می‌باشد. در واقع، پیش‌مته‌زنی سبب کاهش حجم براده برداشته شده از قطعه‌کار می‌شود. علاوه‌بر این در سوراخ‌کاری معمولی برخلاف روش‌های فرزکاری، تماس بین ابزار و قطعه‌کار به‌صورت پیوسته بوده و مکانیزم براده‌برداری به‌صورت شخم‌زنی است.

همچنین در سوراخ‌کاری معمولی براده پیوسته تولید شده دارای سختی بالاتری است که هنگام خروج با دیواره سوراخ برخورد کرده و می‌تواند به مقدار ناچیزی باعث افزایش کارسختی سطحی شود [11]. به همین دلیل، مقادیر نیروهای ماشین‌کاری و متعاقب آن کارسختی سطحی در روش سوراخ‌کاری معمولی بالاتر می‌باشد. در حالت کلی، با توجه به نیاز فرایندهای فرزکاری به استخراج کد سی‌ان‌سی و سادگی فرایند سوراخ‌کاری معمولی، این نتایج می‌تواند نشان‌دهنده توانایی فرایند سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته در تولید سوراخی با کمترین میزان تاثیرپذیری از فرآیند تولید و در سریع‌ترین زمان ممکن باشد.

### 4-3- توزیع میکروسختی در راستای محوری

"شکل 8" تغییرات مقدار میانگین میکروسختی در راستای محور سوراخ (نقاط 1، 5 و 6) و در سطوح مختلف سرعت برشی را برای راهبردهای مختلف ایجاد سوراخ نشان می‌دهد. براساس این شکل، در تمامی راهبردهای

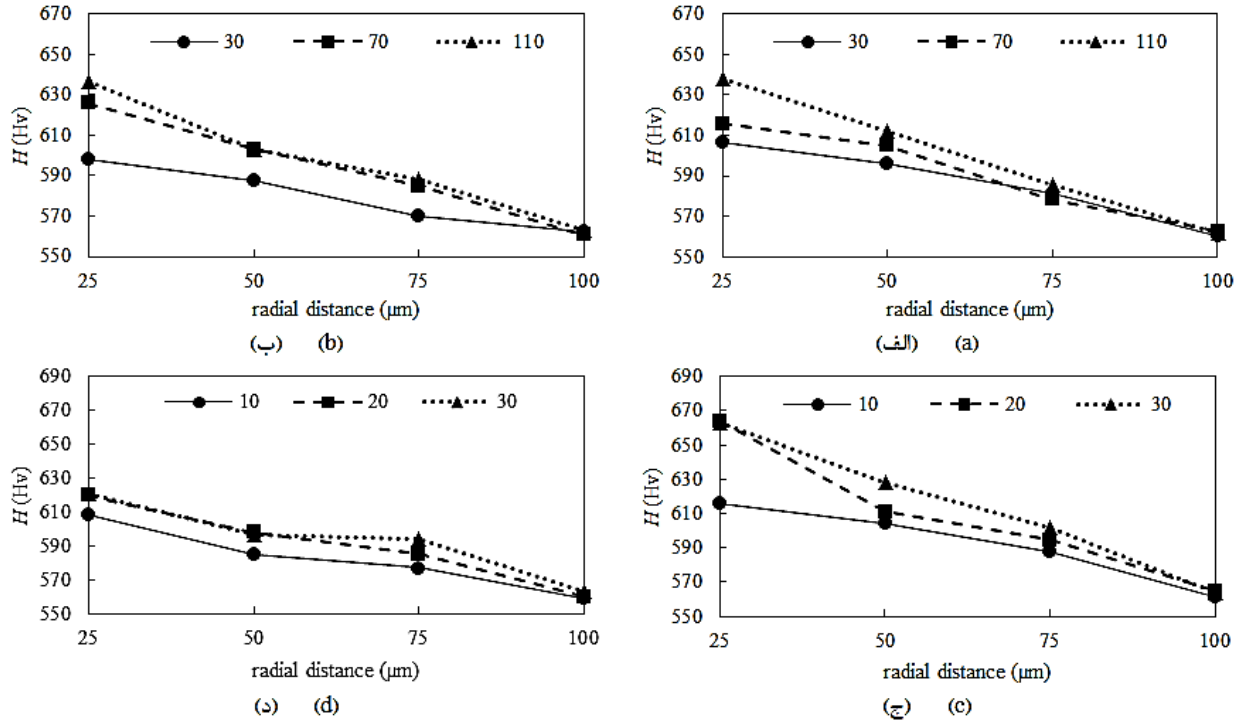


**Fig. 6** Variations of average microhardness versus distance from hole surface at different cutting speeds in a) helical milling b) profile milling c) convectional drilling without predrilling d) convectional drilling with predrilling

**شکل 6** تغییرات میانگین میکروسختی با فاصله از سطح سوراخ در سرعت‌های برشی مختلف و در فرایندهای الف) فرزکاری مارپیچ ب) فرزکاری پروفایل ج) سوراخ‌کاری معمولی د) سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته

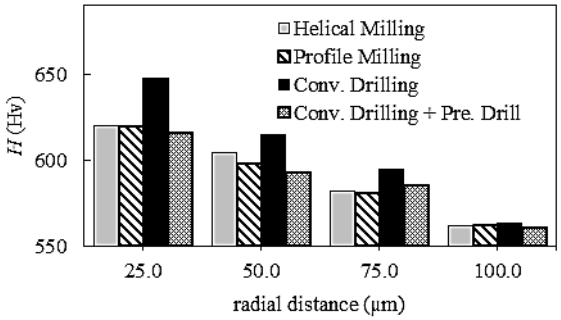


**Fig. 7** Comparison of average microhardness variations of four hole making processes in different radial distances from hole surface

**شکل 7** مقایسه تغییرات میانگین میکروسختی چهار فرآیند ایجاد سوراخ در فواصل شعاعی مختلف از سطح سوراخ

مورد مطالعه، بیشترین مقدار سختی در دهانه خروجی سطح سوراخ (نقطه 6) به وجود می‌آید. در واقع با طولانی‌ترشدن فرایند و افزایش عمق سوراخ، سطح قطعه برای مدت زمان بیشتری تحت تاثیر حرارت و کارسختی ناشی از ماشین‌کاری قرار می‌گیرد و دمای آن افزایش می‌یابد. این امر موجب نفوذ بیشتر حرارت و سخت‌شدگی بیشتر لایه زیرسطحی در انتهای سوراخ می‌شود.

"شکل 8 (الف) و (ب)" نشان می‌دهند که تغییرات میکروسختی در راستای محوری در فرآیند فرزکاری پروفایل کمتر از فرزکاری میانگین مارپیچ است. این اختلاف ناچیز از تفاوت مکانیزم براده‌برداری دو فرایند ناشی می‌شود. در واقع، ابزار فرزکاری پروفایل در طول مسیر حرکت خود، به صورت همزمان در دو راستای محوری و در صفحه عمود بر محور سوراخ براده‌برداری می‌کند (براده‌برداری دوبعدی). اما در روش فرزکاری مارپیچ، برداشت براده روی مارپیچی سه‌بعدی و همزمان در سه جهت اصلی صورت می‌گیرد (براده‌برداری سه‌بعدی). لذا نیروی تولید شده در فرزکاری پروفایل پایین‌تر بوده و متعاقب آن، افزایش دما و کارسختی سطحی نیز در این فرایند کمتر خواهد بود.

با توجه به "شکل 8 (ج)" نیز مشاهده می‌شود که در فرآیند سوراخ‌کاری بدون پیش‌مته، میکروسختی در بالاترین سرعت برشی به بیشترین مقدار ممکن رسیده و تغییرات این پارامتر در نقاط ورودی و خروجی سوراخ از 31 (در سرعت برشی 10 متر بر دقیقه) به 19 ویکرز (در سرعت برشی 30 متر بر دقیقه) کاهش می‌یابد. این درحالی است که تغییرات سختی در راستای عمق سوراخ در راهبرد سوراخ‌کاری با پیش‌مته بسیار ناچیز است (در حدود 6 ویکرز) که نشان از پایداری بالای این فرآیند دارد (شکل 8 د)).

به‌منظور مقایسه بهتر اثر راهبردهای مختلف ایجاد سوراخ بر میکروسختی لایه زیرسطحی در راستای محوری، مقادیر خروجی در نقاط 1، 5 و 6 برای تمامی آزمایش‌ها میانگین‌گیری شده (9 آزمایش برای هر روش) و به عنوان مقدار میکروسختی فرآیند در آن نقطه لحاظ گردید (شکل 9).

مقادیر میانگین میکروسختی در این نمودار نیز نشان از عدم تغییر این پارامتر در سوراخ‌کاری با پیش‌مته داشتند. علاوه بر این، افزایش سختی در مقطع انتهایی سوراخ در تمامی راهبردها مشخص است. این موضوع تداعی کننده آن است که استفاده از فرایندهای سوراخ‌کاری منقطع یا سوراخ‌کاری چند مرحله‌ای یا همراه با پیش‌مته می‌تواند به‌خوبی باعث پایداری فرایند و یکنواختی سلامت سطح قطعه تولیدی گردد.

## 5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش از چهار روش برای ایجاد سوراخ روی قطعه‌ای از جنس فولاد AISI4340 استفاده شد و تاثیر پارامترهای برشی شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی روی میکروسختی قطعه‌کار تعیین گردید. در ادامه، تغییرات

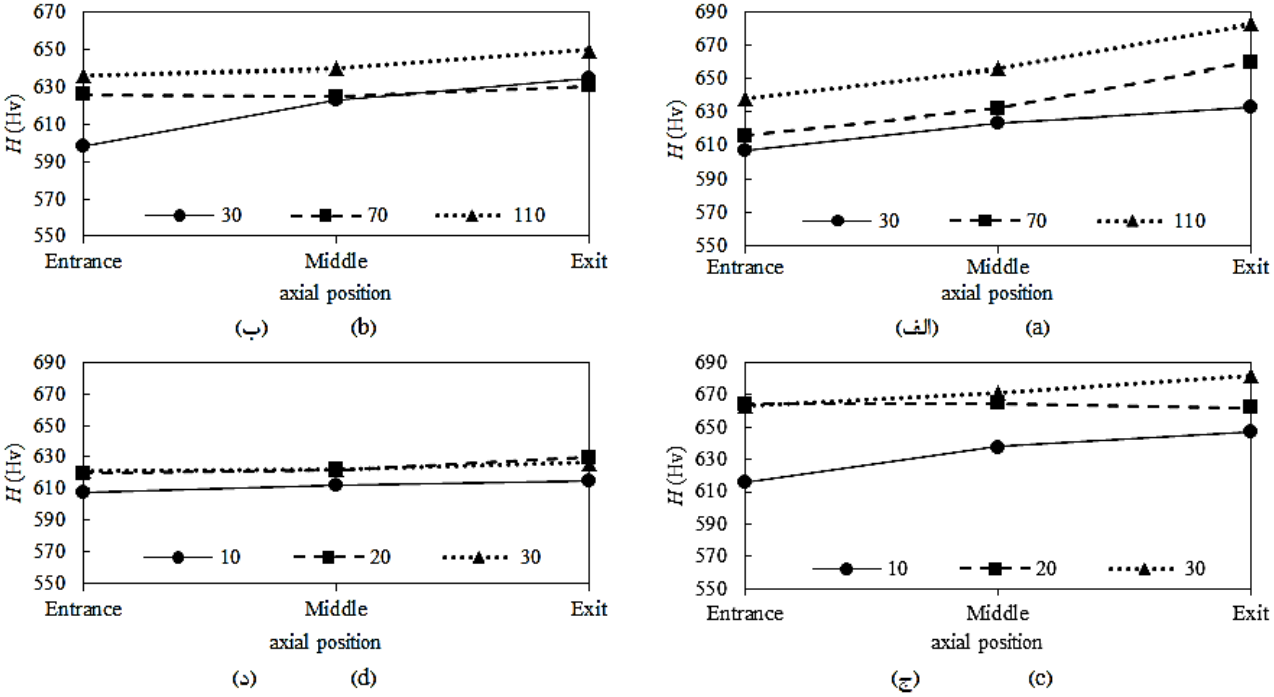


**Fig. 8** Variations of average microhardness along the hole axis (points 1, 5, and 6) at several cutting speeds and in a) helical milling b) profile milling c) convectional drilling without predrilling d) convectional drilling with predrilling

**شکل 8** تغییرات میانگین میکروسختی در راستای محور سوراخ (نقاط 1، 5 و 6) در سرعت‌های برشی مختلف و در فرایندهای الف) فرزکاری مارپیچ ب) فرزکاری پروفایل ج) سوراخ‌کاری معمولی د) سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته

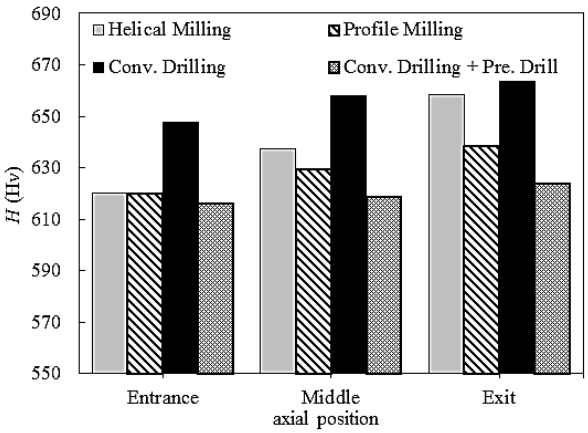


**Fig. 9** Comparison of average microhardness variations of four hole making processes along the hole axis

**شکل 9** مقایسه تغییرات میانگین میکروسختی چهار فرآیند ایجاد سوراخ در راستای محوری

میکروسختی لایه زیرسطحی در راستای شعاعی و محوری سوراخ مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج در ادامه آمده است.

1- فارغ از شرایط برشی، مقدار میکروسختی لایه زیرسطحی در تمامی آزمایش‌ها بالاتر از سختی اولیه ماده بوده و مقدار آن حتی تا 30٪ از سختی فلز پایه بالاتر می‌رفت.

2- بیشترین مقدار سختی اندازه‌گیری شده برابر با 729 ویکرز بود. این سختی در روش سوراخ‌کاری معمولی و در بالاترین سطح پارامترهای برش (سرعت برشی 30 متربردقیقه و نرخ پیشروی 0.3 میلی‌متر بر دندانه) مشاهده گردید.

3- سختی لایه زیرسطحی با دورشدن از سطح سوراخ، در تمامی راهبردها کاهش یافته و مقدار آن در فاصله 100 میکرومتری از سطح، به سختی فلز پایه (560 ویکرز) رسید. بیشترین تغییرات میکروسختی نیز مربوط به فرایند سوراخ‌کاری معمولی بود.

4- در تمامی راهبردها، دهانه خروجی سوراخ به‌عنوان سخت‌ترین ناحیه در مقایسه با سایر نقاط محوری سنجش تعیین شد. این موضوع به‌واسطه افزایش دمای قطعه و کارسختی ناشی از فرایند برش در اثر طولانی‌تر شدن زمان ماشین‌کاری مشاهده گردید.

5- کمترین مقدار تغییرات میکروسختی میانگین در فرآیند سوراخ‌کاری معمولی با پیش‌مته مشاهده شد که بیانگر برتری فرایندهای سوراخ‌کاری منقطع، چند مرحله‌ای یا همراه با پیش‌مته در تولید سوراخی با خواص یکنواخت‌تر است.

## 6- مراجع


[1] H. Fukui, J. Okida, N. Omori, H. Moriguchi, K. Tsuda, Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 187, No. 1, pp. 70-76, 2004 .

[2] W. S. Lee, T.-T. Su, Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, No. 1, pp. 198-206, 1999.

[3] E. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys, *Journal of materials processing technology*, Vol. 134, No. 2, pp. 233-253, 2003.

[4] H. Tönshoff, 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.

[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] J. P. Davim, *Machining of hard materials*, pp. 1-50, London: Springer Science & Business Media, 2011.

[7] S. Akcan, W. S. Shah, S. Moylan, S. Chandrasekar, P. Chhabra, H. Yang, Formation of white layers in steels by machining and their characteristics, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33, No. 4, pp. 1245-1254, 2002.

[8] V. P. Astakhov, *Machining of hard materials–definitions and industrial applications, in: Machining of Hard Materials*, pp. 1-32, London: Springer Science & Business Media, 2011.

[9] Z. Li, Q. Liu, Surface topography and roughness in hole-making by helical milling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 9-12, pp. 1415-1425, 2013.

[10] G. Urbicain, D. Olvera, L. L. de Lacalle, I. Zamakona, P. Rodal, New Strategies For Hole Making In Ti-6Al-4V, *Proceeding of Third Manufacturing Engineering Society International Conference*, Bilbao, Spain, December 11-15, 2009.

[11] M. H. Sadeghi, M. H. Saadatbakhsh, H. Hassanpour, A. R. Omiddodman, Compare and study of hole quality characteristics in helical milling and conventional drilling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 332-338, 2015. (in Persian فارسی)

[12] T. Ko, H. Kim, Surface integrity and machinability in intermittent hard turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 168-175, 2001.

[13] W. Li, Y. Guo, C. Guo, Superior surface integrity by sustainable dry hard milling and impact on fatigue, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 1, pp. 567-570, 2013.

[14] D. X. Wu, C. F. Yao, L. Tan, J. X. Ren, D. H. Zhang, Experimental Study on Surface Integrity in High-Speed End Milling of Titanium Alloy TB6, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 328, No. 1, pp. 867-871, 2013.

[15] 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.

[16] Q. Zhao, X. Qin, C. Ji, Y. Li, D. Sun, Y. Jin, Tool life and hole surface integrity studies for hole-making of Ti6Al4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, No. 5-8, pp. 1017-1026, 2015.

[17] A. Sharman, A. Amarasinghe, K. Ridgway, Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718, *Journal of materials processing technology*, Vol. 200, No. 1, pp. 424-432, 2008.

[18] G. T. Smith, *Industrial metrology: surfaces and roundness*, pp. 1-63, London: Springer Science & Business Media, 2002.

[19] C. Duan, W. Kong, Q. Hao, F. Zhou, Modeling of white layer thickness in high speed machining of hardened steel based on phase transformation mechanism, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 1-4, pp. 59-70, 2013.

[20] Y. K. Chou, C. J. Evans, White layers and thermal modeling of hard turned surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 12, pp. 1863-1881, 1999.