



## بررسی تجربی سایش ابزار و کیفیت سطح در سوراخ کاری چدن خاکستری به کمک امواج فراصوت

امین اله محمدی\*، محمد رضا دهقانی، عباس قائی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
\* ایمیل نویسنده مسئول: amin1@iut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>سوراخ کاری سنتی مواد سخت و شکننده از جمله چدن های خاکستری به دلیل وجود ذرات ساینده کاربیدی و سیلیکونی در ساختار آن، موجب سایش زیاد ابزار و کاهش عمر مته شده و در نتیجه دقت و کیفیت سوراخ نیز افت پیدا می کند. هدف از این تحقیق، بهبود کیفیت سطح و افزایش عمر ابزار مته در سوراخ کاری چدن خاکستری است. استفاده از روش های پیشرفته و نوین در فرایندهای ماشین کاری سنتی می تواند باعث بهبود شرایط ماشین کاری شود. در این مقاله اثر استفاده از ارتعاشات فراصوت بر سوراخ کاری چدن خاکستری مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا طراحی و تحلیل ابزار ارتعاشی به کمک نرم افزار آباکوس انجام شده و پس از ساخت، مجموعه ارتعاشی فراصوت بر روی ماشین فرز کنترل عددی نصب گردیده است. نتایج تجربی نشان می دهند که استفاده از امواج فراصوت موجب کاهش سایش ابزار تا ۳۰ درصد و بهبود نسبی عمر آن شده و همچنین باعث افزایش کیفیت سطح سوراخ تا ۲۰ درصد و بهبود گردی سوراخ در عملیات سوراخ کاری چدن خاکستری شده است.</p>	<p><b>مقاله پژوهشی</b> دریافت: ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۴ پذیرش: ۲ شهریور ۱۴۰۴</p> <p><b>کلیدواژگان:</b> سوراخ کاری ارتعاشی سایش ابزار زبری سطح گردی چدن خاکستری</p>

## Experimental investigation of tool wear and surface quality in ultrasonic-assisted drilling of grey cast iron

Aminollah Mohammadi\*, Mohammad Reza Dehghani, Abbas Ghaei

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
\* Corresponding Author's Email: amin1@iut.ac.ir

Article Information	Abstract
<p><b>Original Research Paper</b> Received: 11 May 2025 Accepted: 24 August 2025</p> <p><b>Keywords:</b> Ultrasonic Drilling Tool Wear Surface Roughness Roundness Grey Cast Iron</p>	<p>Traditional drilling of hard and brittle materials, including grey cast iron, causes excessive tool wear and reduced drill life due to the presence of abrasive carbide and silicon particles in its structure, resulting in reduced hole accuracy and quality. This research aims to improve surface quality and increase drill life in drilling grey cast iron. Using advanced and modern methods in traditional machining processes can improve machining conditions. In this article, the effect of using ultrasonic vibrations on grey cast iron drilling has been studied. First, the design and analysis of the vibrating tool were carried out using Abaqus software, and after manufacturing the ultrasonic vibrating set, it was installed on the computer numerical control milling machine. Experimental results show that the use of ultrasonic waves has reduced tool wear by 30% and improved its life, while also increasing the quality of the hole surface by 20% and improving the roundness of the hole in grey cast iron drilling operations.</p>

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mohammadi A, Dehghani MR, Ghaei A. Experimental investigation of tool wear and surface quality in ultrasonic-assisted drilling of grey cast iron. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Nov 22;12(9):25-33. doi: 10.22034/ijme.2025.522954.2083 [In Persian]

## ۱- مقدمه

در فرایند سوراخ‌کاری، بهبود هرچه بیشتر پارامترهای خروجی به منظور کاهش هزینه‌ها و ایجاد سوراخ‌هایی با کیفیت و دقت بهتر و افزایش راندمان فرایند همواره مورد توجه محققان و صنعتگران بوده است. در این بین به‌کارگیری روش‌های نوین و جدید با صرف هزینه کم و ماندگاری بالا که بتواند عمر مته را افزایش دهد و دقت و زبری سطح سوراخ را بهبود ببخشد تا در هنگام مونتاژ تجهیزات دقیق کمترین مشکل پیش بیاید، از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از این روش‌ها که در سوراخ‌کاری انواع مواد ترد و نرم و قطعات رسانا و غیر رسانا کاربرد دارد، استفاده از ارتعاشات فراصوت است که باعث کاهش یا حذف پلیسه و بهبود شرایط سوراخ‌کاری می‌شود [۱]. سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی<sup>۱</sup> یک روش ترکیبی از ماشین‌کاری سنتی و ارتعاشات فراصوتی است که در آن علاوه بر حرکت چرخشی متداول، مته با فرکانس حدود ۱۶ تا ۴۰ کیلوهرتز و دامنه ۲ تا ۳۰ میکرومتر در جهت طولی در راستای محور دوران ارتعاش می‌کند [۲]. اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار، سبب صلبیت آن، کاهش لغزش مته و افزایش عمر ابزار خواهد شد [۳].

با توجه به مطالعات صورت گرفته مزیت‌های بسیاری در سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی نسبت به سوراخ‌کاری سنتی وجود دارد. از جمله مزیت‌ها می‌توان به کاهش نیرو و گشتاور که علاوه بر ذخیره انرژی، احتمال تغییر شکل قطعات نازک در حین سوراخ‌کاری را کاهش می‌دهد، افزایش دقت ابعادی و هندسی سوراخ به ویژه در سطوح شیب‌دار، کاهش یا حذف پلیسه، بهبود قابل‌ملاحظه در خروج براده از سوراخ به دلیل ریزتر شدن براده‌ها که به ایجاد سوراخ‌های عمیق‌تر کمک می‌کند و افزایش عمر مته و افزایش نرخ براده برداری اشاره کرد. این روش برای ماشین‌کاری مواد خاص نیز مفید است. برای نمونه، سوراخ‌کاری مواد چندلایه با این روش سبب عدم لایه‌لایه شدن و جداسازی الیاف از هم حین ماشین‌کاری می‌شود. علاوه بر آن در سوراخ‌کاری مواد ترد و سخت با این روش، احتمال ترک‌خوردگی قطعه کار کمتر می‌شود [۱].

اولین کارهای تجربی در زمینه سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی به اوایل سال ۱۹۵۰ برمی‌گردد [۴]. مزایای این روش باعث شده است تا امروزه تحقیقات متعددی در این زمینه صورت پذیرد. خادمی و همکاران [۵] از این روش برای سوراخ‌کاری استخوان که کاربرد فراوان در جراحی ارتوپدی دارد استفاده نمودند و اثر نرخ پیشروی و سرعت دورانی را بر روی نیروی سوراخ‌کاری و دما بررسی کردند که کمترین آسیب به استخوان حین عمل جراحی در سرعت دوران ابزار ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه حاصل می‌شود. پوجانا و همکاران [۶] اثر پارامترهای نیروی پیشروی، تغییر فرم براده و دما در سوراخ‌کاری با به‌کارگیری امواج فراصوت را بررسی کردند. کدیور و همکاران [۷] اثر سرعت برشی و نرخ پیشروی و درصد ذرات کاربید سیلیکون را در سوراخ‌کاری سنتی و سوراخ‌کاری التراسونیک ماده مرکب بر روی نیرو و کیفیت سطح سوراخ به روش تاگوچی موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت برشی و درصد ذرات ساینده بیشترین تأثیر را بر روی کیفیت سطح دارا می‌باشند. پاک طینت و همکاران [۸] به بررسی نیروی محوری در فرایند سوراخ‌کاری ارتعاشی آلومینیوم T6-۲۰۲۴ پرداختند و به کاهش نیرو در بیشترین حالت تا ۳۶ درصد و در کمترین حالت تا ۲۳ درصد در صورت به‌کارگیری ارتعاشات فراصوت دست یافتند. شکوری و همکاران [۹] از ارتعاشات فراصوت برای سوراخ‌کاری استخوان ران گاو جهت بررسی نیروی محوری استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت بهینه چرخش ابزار برای رسیدن به حداقل نیروی سوراخ‌کاری خواهد بود. ظهور و همکاران [۱۰] تأثیر پارامترهای سرعت دورانی، دامنه ارتعاشات مته و جنس قطعه کار را بر زبری سطح در فرایند سوراخ‌کاری فولاد به کمک ارتعاشات فراصوتی بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن دارد که در فولادهای سخت‌تر، با افزایش دامنه ارتعاشات مته و افزایش سرعت دورانی، سطح صاف‌تری به دست می‌آید اما در فولادهای نرم اثر عکس دارد. جدیدی و همکاران [۱۱] دریافتند که به‌کارگیری امواج التراسونیک در سوراخ‌کاری قطعات کامپوزیتی تقویت‌شده با فیبر کربن، موجب بهبود صافی سطح سوراخ و کاهش عیوب سطحی آن می‌شود. پروانه و همکاران [۱۲] تأثیر پارامترهای مختلف از جمله سختی قطعه کار، سرعت پیشروی و ارتعاش التراسونیک را در کیفیت سطح سوراخ در عملیات سوراخ‌کاری فولاد 1.7225 بررسی کردند. در این تحقیق عامل سایش ابزار، زبری سطح و گردی سوراخ<sup>۲</sup> به عنوان متغیرهای خروجی و عوامل سرعت دورانی و نرخ پیشروی به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند.

در این پژوهش، قطعه کار چدن خاکستری GG20 که دربردارنده ورق‌های گرافیت و حاوی ذرات ساینده کاربیدی و سیلیکونی و جنس سخت و ترد است، سوراخ‌کاری آن را با چالش‌هایی از جمله سایش زیاد ابزار و ترک‌خوردگی قطعه حین فرایند همراه می‌کند. پس

<sup>1</sup> Ultrasonic Assisted Drilling

<sup>2</sup> Roundness

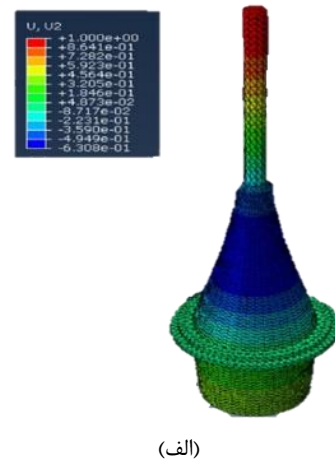
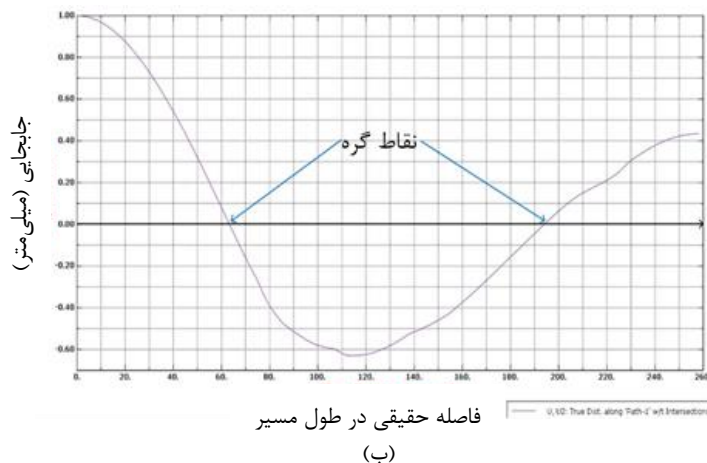
از طراحی آزمایش‌ها، آزمون‌های تجربی مطابق این طراحی، انجام شده و متغیرهای خروجی اندازه‌گیری و سپس تأثیر متغیرهای ورودی بر خروجی‌ها بررسی می‌گردد و در نهایت سوراخ‌کاری سنتی و ارتعاشی از لحاظ سایش ابزار و کیفیت سوراخ‌های ماشین‌کاری شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بررسی‌ها حاکی از آن است که به‌کارگیری امواج فراصوت علی‌رغم هزینه‌های تجهیزات آن، سبب بهبود شرایط سوراخ‌کاری چدن خاکستری، عدم استفاده از روان کار حین عملیات و بالا رفتن عمر ابزار شده است.

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از مود طولی، یک ابزار ارتعاشی سوراخ‌کاری چرخان شامل ترانسدیوسر، متمرکز کننده و ابزار مته طراحی شده است. برای تولید ارتعاش فراصوت، معمولاً از یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک استفاده می‌شود. تمرکز دهنده نقش انتقال انرژی و تمرکز آن را دارد. در یک مجموعه ارتعاشی، انرژی فراصوت از ترانسدیوسر به متمرکز کننده منتقل می‌شود و سپس از متمرکز کننده به ابزار برش انتقال می‌یابد. به‌طور کلی، ابعاد سطح مقطع ورودی متمرکز کننده بر اساس قطر ترانسدیوسر و سطح مقطع خروجی آن بر اساس سطح مقطع ابزار تعیین می‌شود و طول متمرکز کننده نیز باید مضرب صحیح از نصف طول موج فراصوت باشد.

متمرکز کننده مورد نظر در این پژوهش، شامل دو بخش است که بخش ابتدایی آن به شکل استوانه‌ای است تا این امکان را داشته باشد که بتوان به راحتی به ترانسدیوسر مورد نظر، باز و بسته شود؛ سپس سطح مقطع با یک پروفیل مخروطی به آرامی کوچک‌شده تا به متمرکز شدن انرژی فراصوت کمک کند. ابزار سوراخ‌کاری به قطر ۱۲ میلی‌متر نیز درون سوراخ ابتدای متمرکز کننده پیچ و کامل سفت می‌شود تا حین فرایند از آن جدا نشود.

به دلیل اینکه طول مجموعه سوراخ‌کاری ارتعاشی شامل دو جنس مختلف و هندسه پیچیده است، به کمک روش‌های تحلیلی نمی‌توان ابعاد دقیق اجزای آن شامل متمرکز کننده و مته را به دست آورد. در نتیجه برای تحلیل ارتعاشی ابزار از روش عددی المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، جهت تعیین ابعاد متمرکز کننده و مته در فرکانس تشدید ترانسدیوسر یعنی ۲۰ کیلوهرتز، استفاده شد. علاوه بر آن برای گیره بندی ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی توسط فلنج، مکان دقیق گره که در آنجا میزان ارتعاش امواج به صفر می‌رسد، توسط نرم‌افزار آباکوس تعیین شد و فلنج مناسب در آن محل تعبیه شد. در شکل ۱-الف تحلیل مودال ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی و شکل ۱-ب موقعیت گره‌های ارتعاشی در طول ابزار در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است.



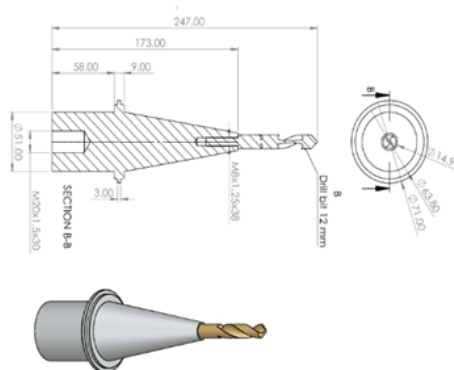
شکل ۱ الف) تحلیل مودال ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی در آباکوس، ب) موقعیت گره‌های ارتعاشی در طول ابزار در نرم‌افزار آباکوس

جنس متمرکز کننده باید دو خصوصیت مکانیکی و آکوستیکی خوب را با هم دارا باشد. خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت به خستگی بالا، تنش تسلیم بالا، چقرمگی شکست و مقاومت به سایش مناسب و خصوصیات آکوستیکی شامل اتلاف انرژی کم، میرایی ارتعاشات پایین و سرعت صوت بالا می‌شود [۱۳]. آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ از خواص صوتی و مکانیکی مطلوبی برخوردارند [۱۴]. بنابراین جنس متمرکز کننده، آلومینیوم 7075-T6 انتخاب گردید. مته استفاده شده نیز از جنس فولاد تندبر با روکش تیتانیوم نیتريد است. شکل ۲-الف طراحی نهایی ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی حاصل از شبیه‌سازی عددی و شکل ۲-ب ابزار ساخته شده را نشان می‌دهد.

پس از ساخت و نصب ابزار ارتعاشی، به منظور رسیدن به فرکانس تشدید و مود طولی ارتعاشی مطلوب ابزار از دستگاه آنالیز امپدانس<sup>۱</sup> استفاده شد. شکل ۳ فرکانس تشدید نهایی ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی را نشان می‌دهد که مقدار ۲۰۱۵۷ هرتز اندازه‌گیری شد که با فرکانس تشدید به دست آمده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، تطابق نسبتاً خوبی دارد.



(ب)



(الف)

شکل ۲ الف) طراحی نهایی ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی حاصل از شبیه‌سازی عددی، ب) ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی ساخته شده



شکل ۳ اندازه‌گیری فرکانس تشدید ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی

در نهایت مجموعه مورد نظر ارتعاشی شامل ابزار ارتعاشی و ترانسدیوسر، بر روی دستگاه فرس کنترل عددی بسته شد که نحوه برق‌رسانی از منبع تغذیه به ترانسدیوسر، از طریق سیستم ذغال روی رینگ لغزشی<sup>۲</sup> است و دوران توسط کلگی دستگاه فرس و از طریق تسمه به سیستم ارتعاشی منتقل گردید. مجموعه ابزار ارتعاشی تعبیه شده روی دستگاه فرس CNC در شکل ۴ به همراه اجزای آن نشان داده شده است. سرعت برشی و پیشروی بهینه برای سوراخ‌کاری چدن خاکستری با ابزار مته فولاد تندبر با روکش تیتانیوم نیتريد به ترتیب در محدوده ۲۵ تا ۳۵ متر بر دقیقه و ۰/۱۸ تا ۰/۲۷ میلی‌متر بر دور می‌باشد [۱۵]. با انجام آزمون‌های اولیه به منظور مشاهده سایش ابزار، پارامترهای ماشینکاری مطابق جدول ۱ انتخاب شده است. آزمون‌های سوراخ‌کاری با حالت خشک و بدون استفاده از روان کار انجام شد. پس از تنظیمات سرعت برشی و نرخ پیشروی مطلوب، آزمون‌های سوراخ‌کاری به عمق ۱۸ میلی‌متر در دو شرایط متفاوت با و بدون ارتعاشات فراصوت انجام شدند.

در شکل ۵ یک نمونه از چدن خاکستری سوراخ شده، در ردیف بالا، سوراخ‌های ایجاد شده با استفاده از روش سوراخ‌کاری معمولی<sup>۳</sup> و ردیف بعدی سوراخ‌های ایجاد شده با استفاده از روش سوراخ‌کاری ارتعاشی<sup>۴</sup> قابل مشاهده است. هر آزمایش سه بار تکرار شده و پس از انجام سوراخ‌کاری، پارامترهای سایش ابزار، زبری سطح و گردی سوراخ‌ها به ترتیب به کمک میکروسکوپ دیجیتال، دستگاه زبری سنج و دستگاه اندازه‌گیری تصویری<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار گرفت.

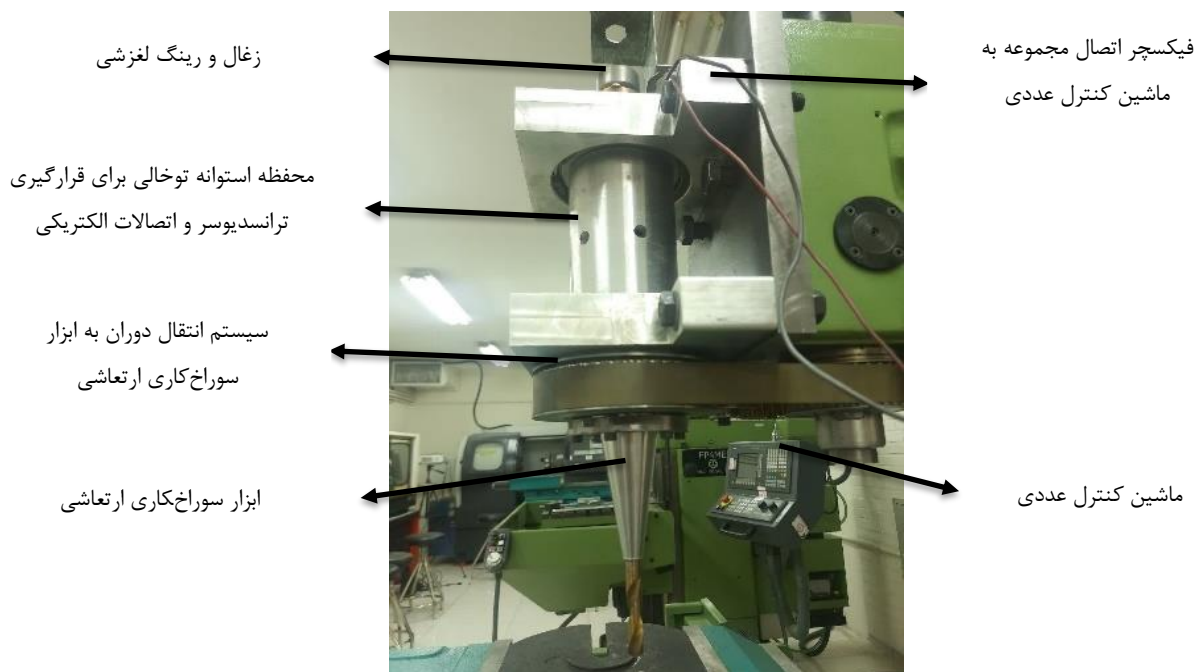
<sup>1</sup> Impedance Analyzer

<sup>2</sup> Slip Ring

<sup>3</sup> Ordinary Drilling (OD)

<sup>4</sup> Ultrasonic Drilling (UD)

<sup>5</sup> Video Measuring Machine



شکل ۴ مجموعه ابزار ارتعاشی مونتاژ شده روی دستگاه فرز

جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در فرایند

مقدار پارامترها	واحد پارامترها	پارامترها
۵۰۰-۶۰۰-۷۰۰	rpm	سرعت دورانی (n)
۱۰-۳۰-۵۰	$\frac{mm}{min}$	نرخ پیشروی ( $a_f$ )
۱۵۰	W	توان التراسونیک (P)
۲۰۱۰۰	Hz	فرکانس (f)



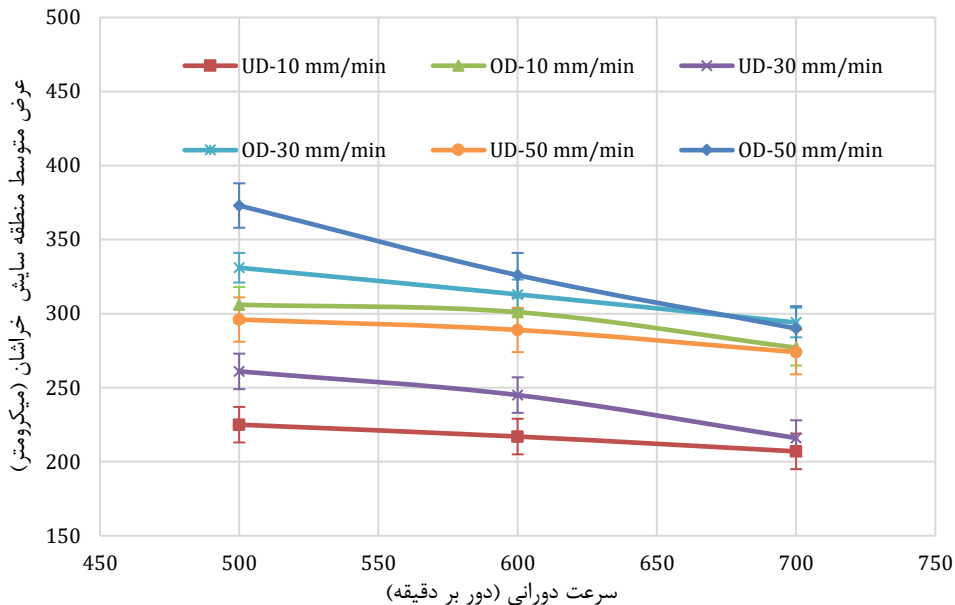
شکل ۵ سوراخ‌های ایجاد شده روی چدن خاکستری GG20

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- سایش ابزار

با توجه به مشاهدات صورت گرفته پس از انجام هر آزمون سوراخ‌کاری، مکانیسم‌های سایش ابزار در سوراخ‌کاری چدن خاکستری GG20 عمدتاً از دو نوع سایش خراشان و تدریجی روی سطح آزاد ابزار ناشی از وجود ذرات سخت کاربیدی و سیلیکونی درون قطعه کار و همچنین چسبندگی براده به ابزار به دلیل پایین بودن پیشروی‌های انتخاب‌شده به خصوص در نوک مته است. در واقع این براده‌ها در

طول فرایند مدام شکسته شده و باز ترمیم می‌شوند و چون چسبندگی شدیدی به ابزار دارند، موقع کنده شدن قسمتی از ابزار را نیز همراه خود کنده و به صورت تدریجی باعث سایش ابزار می‌گردند که این پدیده سایش نفوذی نیز نامیده می‌شود. بررسی میزان سایش ابزار با استفاده از تصویربرداری توسط میکروسکوپ دیجیتال از سطح آزاد مته و اندازه‌گیری عرض متوسط منطقه سایش خراشان ابزار در سرعت‌های دورانی و پیشروی‌های مختلف انجام شد و نتایج حاصل از دو سوراخ‌کاری ارتعاشی و معمولی در این حالت با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۶ نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهند.



شکل ۶ تغییرات سایش ابزار در سرعت‌های دورانی و نرخ‌های پیشروی مختلف در دو حالت سوراخ‌کاری ارتعاشی و معمولی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سایش ابزار در سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فراصوت نسبت به سوراخ‌کاری معمولی کمتر است. علت آن می‌تواند در اثر کاهش چسبندگی براده و خروج بهتر آن‌ها از سوراخ و نیز کاهش اصطکاک و افزایش زاویه براده ناشی از حرکت‌های رفت و برگشتی ابزار و عدم تماس پیوسته ابزار و قطعه کار باشد.

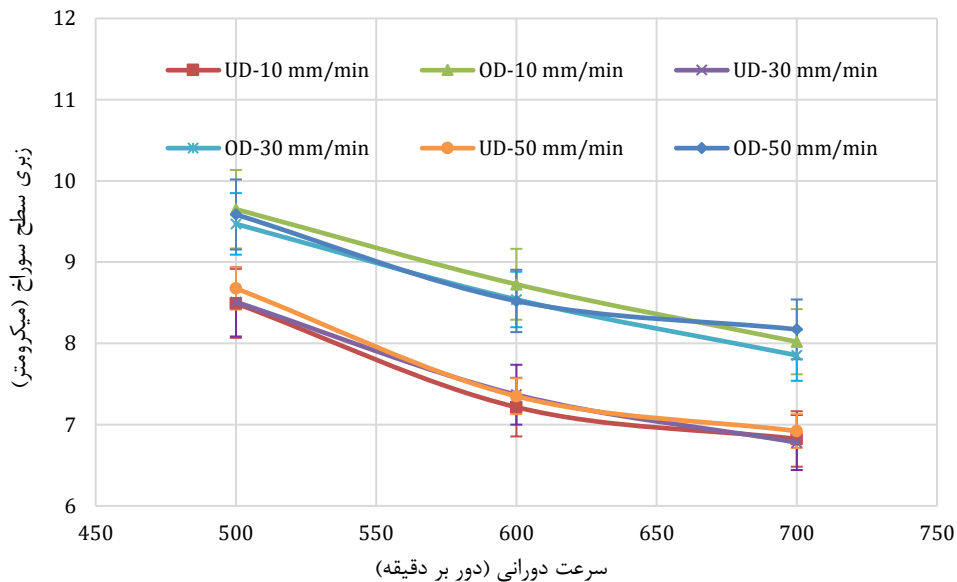
با توجه به نمودار، با افزایش سرعت برشی و کاهش نرخ پیشروی در هر دو فرایند سوراخ‌کاری معمولی و ارتعاشی، می‌توان سایش ابزار را کاهش و عمر آن را افزایش داد. دلیل این امر آن است که با افزایش سرعت دورانی، دمای منطقه برش بالاتر رفته که موجب کاهش مقاومت ماده شده و بنابراین ماده با مقاومت برشی کمتری ماشین‌کاری می‌شود و نیرو و ساییدگی ابزار کمتر می‌شود. علاوه بر این کاهش نرخ پیشروی، سبب کاهش اصطکاک و شکل‌گیری راحت‌تر براده شده و نیروی وارد بر ابزار کمتر می‌شود. البته با توجه به جنس قطعه کار می‌توان میزان سرعت برشی و نرخ پیشروی بهینه برای انجام فرایند را به دست آورد که در آن مقدار، راندمان فرایند به بیشترین حد خود خواهد رسید.

### ۳-۲- زبری سطح سوراخ

جهت اندازه‌گیری زبری سطح سوراخ‌ها، جهت زبری سنجی هر سوراخ بر طبق معیار Ra اندازه‌گیری شد، لازم به ذکر است برای افزایش دقت و کاهش خطا زبری هر سوراخ با ۳ بار تکرار در یک محدوده، اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از زبری سطوح سوراخ‌کاری در دو حالت ارتعاشی و معمولی در سرعت‌های دورانی و پیشروی‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.

با توجه به نمودار شکل ۷ و اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات تجربی می‌توان گفت که در اثر استفاده از ارتعاشات فراصوت در سوراخ‌کاری چدن خاکستری GG20، زبری سطح سوراخ‌ها به‌طور میانگین بین ۰/۸ تا ۱ میکرومتر کاهش می‌یابد؛ این امر به دلیل سایش و خوردگی کمتر ابزار که ناشی از ذرات براده کوچک‌تر و چسبندگی کمتر آن در حین سوراخ‌کاری ارتعاشی است، صورت می‌پذیرد.

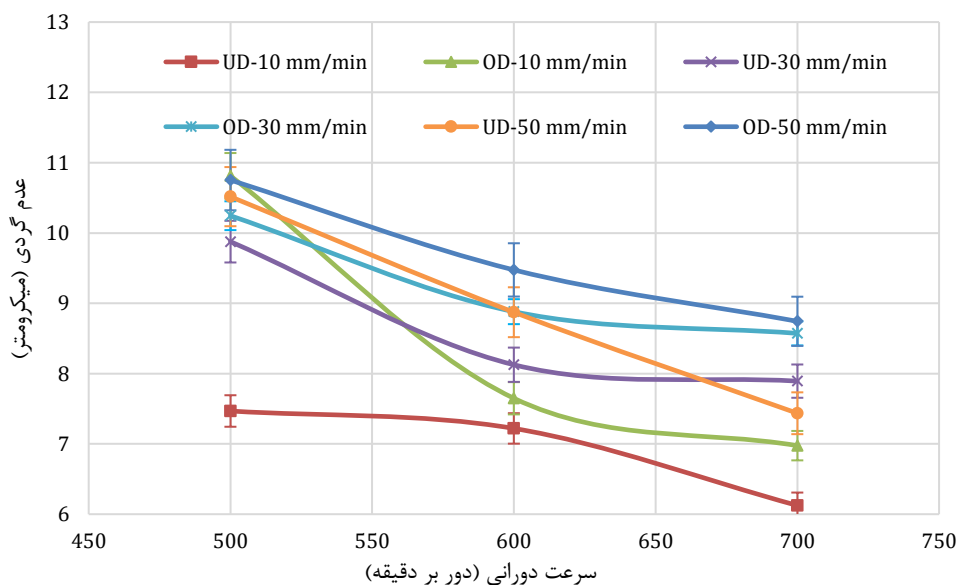
علاوه بر این افزایش سرعت دورانی به دلیل کاهش چسبندگی براده و راحت‌تر جدا شدن آن، موجب می‌شود که سطح سوراخ کمتر خراشیده شده و پستی‌وبلندی‌های روی سطح کمتر شود. اما طبق نتایج حاصل، با تغییر نرخ پیشروی چون از یک‌طرف چسبندگی براده کمتر و به بهبود صافی سطح کمک می‌کند و از طرف دیگر ضخامت براده تغییر شکل نیافته بیشتر شده که منجر به افزایش نیروی محوری وارد بر مته می‌شود و در نتیجه مته کند شده و صافی سطح سوراخ خراب می‌شود، تغییر نرخ پیشروی در گستره انتخاب‌شده، تأثیر اندکی بر زبری سطح سوراخ داشته و تقریباً روند ثابتی از صافی سطح در نرخ پیشروی‌های متفاوت وجود خواهد داشت. این مورد به خوبی در نمودار شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۷ تغییرات زبری سطح سوراخ در سرعت‌های دورانی و نرخ‌های پیشروی مختلف در دو حالت سوراخ‌کاری ارتعاشی و سوراخ‌کاری معمولی

### ۳-۳- گردی سوراخ

برای اندازه‌گیری میزان عدم گردی سوراخ، از دستگاه اندازه‌گیری تصویری مدل KIM-3020CU-IM استفاده شده است. نتایج حاصل از عدم گردی سوراخ‌ها در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸ تغییرات گردی سوراخ در سرعت‌های دورانی و نرخ‌های پیشروی مختلف در دو حالت سوراخ‌کاری ارتعاشی و سوراخ‌کاری معمولی

به‌طور کلی اعمال ارتعاشات فراصوت با توجه به اینکه باعث افت نیروهای ماشین‌کاری می‌شود و طول عمر ابزار را بهبود می‌بخشد؛ در نتیجه به پایداری فرایند کمک می‌کند. با بهبود پایداری، ارتعاشات ناخواسته در فرایند برش کمتر شده و باعث بهبود پارامترهایی از جمله صافی سطح، گردی و استوانه‌ای بودن سوراخ می‌گردد [۱۶]. همچنین می‌توان گفت که عامل مهم در میزان گردی سوراخ‌ها، توانایی ابزار در حفظ شکل و هندسه خود است. مهم‌ترین عاملی که باعث می‌گردد ابزار شکل خود را از دست بدهد، آسیب به ابزار است که وابسته به دو عامل مهم دما و نیروی ماشین‌کاری در منطقه برش است. در نتیجه با اعمال ارتعاشات فراصوت و کاهش آسیب به ابزار، هندسه و شکل مته مدت‌زمان بیشتری حفظ‌شده و سوراخ‌هایی با ابعاد و هندسه دقیق‌تری ایجاد می‌شود. همچنین با توجه به نمودار شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت برشی و کاهش نرخ پیشروی، گردی سوراخ‌ها را افزایش داد.

### ۳-۴- نوع و اندازه براده

از دیگر نتایج این پژوهش نیز می‌توان به کوچک‌تر شدن اندازه براده و خرد شدن آن با به‌کارگیری امواج فراصوت در سوراخ‌کاری چدن خاکستری اشاره کرد. شکل ۹ مقایسه اندازه و نوع براده در دو حالت سوراخ‌کاری ارتعاشی و سوراخ‌کاری معمولی را نشان می‌دهد.



شکل ۹ مقایسه نوع و اندازه براده در الف) سوراخ‌کاری معمولی و ب) سوراخ‌کاری ارتعاشی

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از طراحی، تحلیل، ساخت و مونتاژ ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی و رسیدن به شرایط ارتعاشی مطلوب، آزمون‌های سوراخ‌کاری بر روی قطعه کار چدن خاکستری GG20 در سرعت‌های دورانی و نرخ‌های پیشروی مختلف انجام شد و پس از اندازه‌گیری پارامترهای خروجی مورد مطالعه و جمع‌بندی نهایی آن‌ها، نتایج زیر به‌دست‌آمده است:

- سایش ابزار در سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی کاهش قابل‌توجه داشت. این کاهش سایش تا ۳۰٪ هم مشاهده شده است.
- از آنجا که سایش ابزار یکی از عوامل مهم و مؤثر بر عمر ابزار است، با کاهش سایش ابزار در اثر استفاده از ارتعاشات فراصوت در فرایند سوراخ‌کاری، می‌توان گفت عمر مفید مته بهبود پیدا می‌کند و احتمال خوردگی لبه‌ها و شکست آن کاهش خواهد یافت.
- صافی سطح سوراخ در فرایند سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری مرسوم افزایش می‌یابد. این افزایش صافی سطح قابل‌توجه و تا ۲۰٪ است.
- بهبود مؤثری در گردی سوراخ در فرایند سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی مشاهده‌شده است.
- براده‌ها در سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی شکسته‌تر و ریزتر شده‌اند.
- میزان چسبندگی براده به نوک ابزار که از عوامل مهم در سایش ابزار و کیفیت سطح سوراخ است، به کمک ارتعاشات فراصوت، کمتر شده و براده در سوراخ‌کاری ارتعاشی راحت‌تر از درون سوراخ خارج می‌شود.

## References

- [1] Chang SS, Bone GM. Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6. *Precision Engineering*. 2010 Jul 1;34(3):369-75. doi: [10.1016/j.precisioneng.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.09.002)
- [2] Thomas PN, Babitsky VI. Experiments and simulations on ultrasonically assisted drilling. *Journal of Sound and Vibration*. 2007 Dec 4;308(3-5):815-30. doi: [10.1016/j.jsv.2007.03.081](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.03.081)
- [3] Zhang DY, Feng XJ, Wang LJ, Chen DC. Study on the drill skidding motion in ultrasonic vibration microdrilling. *International journal of machine tools and manufacture*. 1994 Aug 1;34(6):847-57. doi: [10.1016/0890-6955\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)90064-7)
- [4] Kumabe JI. *Vibration cutting-fundamentals and applications*. Jikkyo Shuppan. 1979. [In Japanese]
- [5] Khademi V, Akbari J, Farahmand F. Ultrasonic assisted drilling of bone. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*. 2008 Sep;4(4):0. [In Persian]
- [6] Pujana J, Rivero A, Celaya A, De Lacalle LL. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009 May 1;49(6):500-8. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2008.12.014](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.12.014)
- [7] Kadivar MA, Akbari J, Yousefi R. Investigation of ultrasonic-assisted drilling of Al/SiC metal matrix composite with Taguchi method. *Key engineering materials*. 2012 Nov 30;523:215-9. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.215](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.215)
- [8] Paktinat H, Amini S, Barani A, Fadaei Tehrani A. Vibration drilling tool and thrust force investigation in vibratory drilling process of Al 2024-T6. *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*. 2015 Feb 20;26(1):129-42. doi: [10.22067/fum-mech.v26i1.44707](https://doi.org/10.22067/fum-mech.v26i1.44707)
- [9] Shakouri E, Sadeghi MH, Maerefat M, Karafi MR, Memarpour M. Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic assisted drilling of bone. *Modares Mechanical Engineering*. 2014 Sep 10;14(6):194-200. [In Persian]
- [10] Zohoor M, Ahahveisi A, Ghorbani B, Soltanzadeh T. Experimental and Analytical Study on Effective Parameters on Surface Roughness of Steel in Ultrasonic Assisted Drilling. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Feb 10;15(13):291-5. [In Persian]
- [11] Jadidi T, Hajjalimohammadi A, Azadi M. Ultrasonic Assisted Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites with Non-Rotating Vibratory Tool. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 2022 Apr 1;9(1):147-54. [In Persian]
- [12] Parvaneh A, Amini S. Effect of ultrasonic vibration on hole quality in 1.7225 hardened steel drilling. In: *Proceedings of the 19th National and 8th International Conference on Manufacturing and Production Engineering of Iran*; 1401 (2022); Iran. [In Persian]
- [13] Mohammadi A, Abbasi Mobarakeh H, Khodakarami M. Investigation of material removal rate and surface quality of super clear crystal glass workpiece in the ultrasonic machining process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Mar 21;10(1):1-0. doi: [10.22034/ijme.2023.420276.1857](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.420276.1857) [In Persian]
- [14] Singh DP, Mishra S, Porwal RK. Modal analysis of ultrasonic horn using finite element method. *Materials Today: Proceedings*. 2019 Jan 1;18:3617-23. doi: [10.1016/j.matpr.2019.07.293](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.293)
- [15] Sandvik Coromant. *Drilling tools* [Internet]. 2020 [cited 2020]. Available from: <https://www.sandvik.coromant.com/en>
- [16] Baraheni M, Jandaghi Shahi V. Enhancing dimensional accuracy of the produced holes in CFRP by ultrasonic vibration assistance. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 May 22;10(3):1-8. doi: [10.22034/ijme.2023.422082.1867](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.422082.1867) [In Persian]