



## بررسی اثر عملیات سطحی کوبش فراصوتی بر تنش‌های پسماند ایجادشده و میزان سختی سطحی روی قطعات برشکاری شده با روش تخلیه الکتریکی سیمی

امیر عبدالمهی<sup>۱</sup>، سعید امینی<sup>۲\*</sup>، محمد هادی غلامی<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۸ دی ۱۴۰۲  
پذیرش: ۲۷ بهمن ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

تخلیه الکتریکی سیمی  
کوبش فراصوتی  
تنش پسماند  
سختی  
فولاد آلیاژی Mo40

برشکاری با تخلیه الکتریکی سیمی (وایرکات)، یکی از فرآیندهای ماشین‌کاری است که در آن، یک سیم نازک با نزدیک شدن به قطعه کار و ایجاد جرقه‌هایی در حضور سیال دی‌الکتریک، به تدریج قطعه کار را برش می‌دهد. عدم تماس ابزار و قطعه کار، عدم وجود پلیسه، دقت ابعادی و پرداخت سطحی مناسب، از مزایای این روش هستند. تنش‌های پسماند سطوح وایرکات شده، ماهیت کششی دارند و در لایه‌های سطحی مقادیر بزرگی دارند. فناوری کوبش فراصوتی، با ایجاد فشردگی در لایه‌های سطحی قطعه کار، باعث ایجاد تنش پسماند فشاری و همچنین باعث بهبود برخی خواص مکانیکی از جمله سختی می‌شود. در این پژوهش، عملیات کوبش فراصوتی، با ساخت ابزار ارتعاشی فراصوتی و نصب آن بر روی دستگاه تراش، بر روی نمونه‌های وایرکات شده از فولاد آلیاژی پر کاربرد Mo40 (DIN 1.7225) در سه سطح متفاوت پرداخت، نیمه پرداخت و خشن انجام گرفت. تاثیر پارامترهایی همچون تعداد پاس، سرعت پیشروی و نوع برش قطعات وایرکات شده در دامنه ثابت ارتعاش، بر روی تنش پسماند ایجادشده، بررسی شدند. آزمایش‌های انجام‌شده با روش تاگوچی، نشان دادند که در همه حالت‌ها، این فرآیند، باعث تبدیل تنش‌های پسماند کششی به تنش‌های پسماند فشاری قابل توجه در نمونه‌های وایرکات شده می‌شود. تنش پسماند فشاری به ۱۶۵۴ مگاپاسکال نیز رسید. افزایش تعداد پاس‌ها، تنش پسماند فشاری را افزایش می‌دهد، اما افزایش سرعت پیشروی، آن را کاهش می‌دهد. با انجام فرآیند در همان پاس اول، به ترتیب برای نمونه نیمه پرداخت، پرداخت و خشن افزایش ۳۰، ۳۱ و ۴۸ درصدی در مقادیر سختی سطحی مشاهده گردید و با پاس‌های بعدی این افزایش ادامه یافت.

## Experimental study of the effects of the ultrasonic peening process on residual stress and surface hardness of parts cut with Wire EDM

Amir Abdollahi<sup>1</sup>, Saeid Amini<sup>2\*</sup>, Mohammad Hadi Gholami<sup>1</sup>

1- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

\* Corresponding Author's Email: amini.s@kashanu.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 8 January 2024

Accepted: 16 February 2024

#### Keywords:

Wire Electric Discharge  
Ultrasonic Peening Treatment  
Residual Stress  
Surface Hardness  
Mo40 Alloy Steel

### Abstract

Wire EDM (WireCut) is a machining process utilizing electric discharge to gradually cut a workpiece with a spark-generating thin wire. It offers benefits like non-contact cutting, versatility with materials, and precise dimensional accuracy. However, it is important to note that surfaces cut by WireCut process may exhibit tensile residual stresses with significant values in the surface layers. Ultrasonic Peening Treatment (UPT) can be employed as a new approach to modify the surface structure of wire EDMed workpieces. UPT, which induces compression in the surface layers of the workpiece, generates compressive residual stress and enhances mechanical properties including hardness. In this study, UPT was performed on wire EDMed workpieces made of alloy steel Mo40 (DIN 1.7225) using an ultrasonic vibrating tool on a lathe, at 3 levels: finishing, semi-finishing, and roughing. The impact of parameters such as the number of passes, feeding rate, and the type of wire EDM cut on the constant amplitude of vibration were studied to understand their effect on the residual stress generated. The experiments conducted using the Taguchi method revealed that in every case, this process resulted in the conversion of tensile residual stresses into substantial compressive residual stresses in wire EDMed workpieces. The compressive residual stress also reached 1654 MPa. More passes lead to higher compressive residual stress, while a higher feeding rate leads to a decrease. Surface hardness increased by 30%, 31%, and 48% for the semi-finishing, finishing, and roughing workpieces in the initial pass. This trend continued with each subsequent pass.

### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Abdollahi A, Amini S, Gholami MH. Experimental study of the effects of the ultrasonic peening process on residual stress and surface hardness of parts cut with Wire EDM. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 November 22;10(9):19-31. doi: 10.22034/IJME.2024.433219.1894 [In Persian]

## ۱- مقدمه

فرآیند ماشین‌کاری به روش تخلیه الکتریکی، از طریق ایجاد جریان بالای الکترون‌ها بین سیم و قطعه امکان‌پذیر می‌شود. این ماشین‌کاری، در یک محیط واسط به نام دی‌الکتریک که فاصله<sup>۱</sup> میان سیم و قطعه‌کار را پر کرده و باعث ایجاد تخلیه الکتریکی می‌شود، انجام می‌گردد. فرآیند وایرکات را می‌توان یک فرآیند ترموالکتریکی دانست. بر اساس تئوری ترموالکتریکی، مهم‌ترین عامل براده‌برداری، دمای بسیار بالای ناشی از شدت جریان تخلیه است. دماهای موضعی بسیار بالا، روی ساختار و خواص متالورژیکی و مکانیکی سطوح ماشین‌کاری شده اثر می‌گذارند. ماهیت لایه سطحی، تاثیر بسیار زیادی بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه کار دارد. اصلی‌ترین جنبه‌های سلامت سطح<sup>۲</sup>، که در حین ماشین‌کاری و پس از آن دارای اهمیت هستند عبارت‌اند از زبری، ترک‌های ریز و درشت در سطح قطعه کار، تغییرات سطحی، تنش‌های پسماند و تشکیل عیوب و خلل و فرج‌های سطحی. تنش‌های پسماند در این نوع ماشین‌کاری، عمدتاً به دلیل غیریکنواختی در شار حرارتی، تغییر فاز متالورژیکی و تغییر شکل پلاستیکی غیر همگن، موضعی است. مطالعه بر روی تنش‌های پسماند سطوح وایرکات شده نشان می‌دهد که معمولاً ماهیت کششی دارند و در لایه‌های سطحی مقادیر بزرگی دارند و با افزایش انرژی پالس، مقدارشان افزایش می‌یابد. شکل‌گیری ترک‌های سطحی<sup>۳</sup> به این دلیل است که مقدار تنش‌های کششی حاصل از انقباض ماده در حین سرد شدن قطعه کار پس از جرقه‌زنی، از مقدار حداکثر تنش کششی ماده قطعه کار، فراتر می‌رود. پس از فرآیند تخلیه الکتریکی، سه لایه بر روی فلز قطعه کار تشکیل می‌شود. لایه اول، لایه پاششی یا ترشح‌شده<sup>۴</sup> است که حاصل از فوران فلز ذوب‌شده قطعه کار و اثرات مذابی مواد الکتروود، بر روی سطح قطعه کار است. لایه دوم، لایه سفید<sup>۵</sup> یا لایه انجماد مجدد شده نام دارد. در واقع، مواد مذاب به سرعت توسط سیال دی‌الکتریک سرد و منجمد می‌شوند تا این ناحیه را تشکیل دهند. ایجاد ترک‌های کوچک در این لایه بسیار سخت و شکننده امکان‌پذیر است. اگر این لایه بسیار ضخیم باشد یا به نحوی از آن کاسته نشود، اثرات این لایه می‌تواند در شرایط بارگذاری و کاری، منجر به شکست یا نقص زود هنگام<sup>۶</sup> شود. آخرین لایه، منطقه تحت تاثیر حرارت<sup>۷</sup> نامیده می‌شود. این لایه فقط تحت تاثیر حرارت قرار می‌گیرد و ذوب نمی‌شود. این مناطق استحاله شده، به شدت سلامت سطح قطعه کار را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱]. متغیرهای زیادی بر یکپارچگی سطح قطعه وایرکات شده تاثیر دارند که عبارت‌اند از: جریان جرقه، مدت‌زمان جرقه (زمان خاموشی پالس)، ولتاژ مدارباز، قطبیت الکتروود، خواص مواد ابزار و قطعه کار، ویژگی‌ها و خواص سیال دی‌الکتریک، غلظت تراشه در سیال. دهستانی و ابوترابی [۲]، به تاثیر پارامترهای شدت جریان و پیشروی میز در فرآیند وایرکات، روی صافی سطح و عمر خستگی قطعه کار از جنس Mo40 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش میزان پیشروی میز و شدت جریان، صافی سطح و عمر خستگی قطعه کار کاهش می‌یابد. آن‌ها دریافتند پیشروی، نیز پارامتری تعیین‌کننده بر زبری سطح و عمر خستگی قطعات وایرکات شده است. وحید زارع و همکاران [۳]، نیز با مطالعه عوامل مؤثر بر دامنه ارتعاشات سیم در فرآیند وایرکات، نشان دادند که با افزایش نیروی کشش محوری، کاهش فرکانس تخلیه بار الکتریکی، کاهش دمای ایجاد شده و کمتر کردن ضخامت قطعه کار می‌توان دامنه ارتعاشات سیم را کاهش داد و در نتیجه دقت برش بالا و سطح نهایی یکنواخت‌تر حاصل می‌شود. ایجاد تنش پسماند، در جریان انجماد مواد در لایه بسیار کم‌عمق در حضور گرادیان دمای بالا، اجتناب‌ناپذیر است [۴]. تنش‌های پسماند کششی ناشی از فرآیند وایرکات تمایل دارند تا ذره‌های تشکیل‌دهنده قطعه را از هم دور کنند که باعث ترد شدن و کاهش مقاومت مکانیکی سطح می‌شوند. در مقابل، تنش‌های پسماند فشاری، باعث فشرده شدن مرز دانه‌های سطحی و بسته شدن ترک‌های ریز شده و در نتیجه شروع ترک را به تأخیر می‌اندازند. یکی از روش‌های بهبود خواص مکانیکی سطوح و خواص متالورژیکی مواد، روش کوبش فراصوتی است. در این فرآیند، ارتعاشات فراصوتی با فرکانس بالا از طریق پین به سطح نمونه منتقل شده و با اثر ضربات متوالی، تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>۸</sup> در لایه‌های سطحی نمونه ایجاد و باعث بروز تنش پسماند فشاری، کاهش اندازه دانه‌ها، اصلاح مشخصات هندسی سطح، کاهش زبری سطح، افزایش سختی و مقاومت سایشی قطعه می‌شود [۵]. ین و همکارانش [۶]، یک مدل سه‌بعدی اجزاء

<sup>1</sup> Gap

<sup>2</sup> Surface Integrity

<sup>3</sup> Surface Cracks

<sup>4</sup> Spattered Layer

<sup>5</sup> White Layer (recast region)

<sup>6</sup> Premature Failure

<sup>7</sup> Heat Affected Zone (HAZ)

<sup>8</sup> Severe Plastic Deformation

محدود، در حین عملیات کوبش و پس از عملیات، برای بررسی توزیع تنش پسماند توسعه دادند. سپس با اندازه‌گیری تنش پسماند ایجاد شده به روش پراش اشعه ایکس<sup>۱</sup> و مقایسه نتایج با نتایج اجزاء محدود، مدل ارائه شده را اعتبارسنجی نمودند. یوان و همکاران [۷]، توزیع مجدد تنش پسماند پس از عملیات سطحی کوبش فراصوتی در اتصالات جوشی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که این فرآیند، تنش پسماند کششی ناشی از جوشکاری را به‌طور کامل از بین می‌برد و تنش پسماند فشاری در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. فریدونی و همکاران [۸]، از فرآیند کوبش فراصوتی برای افزایش عمر خستگی اتصالات جوشی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ استفاده کردند. نتایج نشان داد که این فرآیند، می‌تواند عمر خستگی را وقتی میزان بارگذاری خستگی در حدود ۸۵ درصد حد تسلیم ماده است تا ۴۰ درصد افزایش دهد. بررسی رفتار سایشی فولاد گرافیتی در فرآیند کوبش فراصوتی توسط امینی و همکاران [۹]، تحقیق دیگری است که نتایج آن نشان داد انجام فرآیند کوبش فراصوتی بر روی سطح غلتک‌های نورد، باعث افزایش مقاومت به سایش، استحکام، صافی سطح و طول عمر آن‌ها می‌شود. سیدعلی صدوقی و نینی و علی قاسمی [۱۰]، به بررسی جامع تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده کوبش فراصوتی بر تنش پسماند و زبری سطح در قالب آزمایش‌ها، شبیه‌سازی‌های عددی و بهینه‌سازی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش قطر پین، سرعت عمودی پین و همچنین تعداد برخوردها باعث افزایش عمق لایه تنش پسماند فشاری می‌شود. کاهش سرعت عمودی و افقی پین و افزایش قطر پین و فاصله بین دو برخورد مجاور منجر به کاهش پارامترهای زبری می‌گردد. اخیراً، اصلاح سطح محصولات تولید شده به روش افزایشی لایه‌ای<sup>۲</sup> مورد توجه قرار گرفته است. امینی و همکاران [۱۱]، به بهبود رفتار خوردگی تیتانیوم خالص فرآوری شده به روش بستر پودر لیزری<sup>۳</sup> با استفاده از فرآیند کوبش فراصوتی پرداختند. نتایج نشان دادند فرآیند کوبش فراصوتی، تخلخل‌های سطحی را از بین می‌برد و مارتزیت‌های سوزنی شکل تشکیل شده در طول تولید به کمک لیزر را اصلاح و ساختار را همگن می‌کند.

در این پژوهش، از فولاد پر کاربرد آلیاژی Mo40(DIN 1.7225) به شکل میلگرد آن، استفاده شده است. خواص متنوع این فولاد آن را به انتخابی باارزش و قابل اعتماد برای طیف وسیعی از مصارف صنعتی تبدیل می‌کند. ابتدا نمونه‌ها از میلگرد Mo40 پس از ماشین‌کاری و سخت‌کاری اولیه، در سه سطح متفاوت پرداخت<sup>۴</sup> (۷ آمپر)، نیمه پرداخت<sup>۵</sup> (۹ آمپر) و خشن<sup>۶</sup> (۱۵ آمپر) با فرآیند وایرکات، برش داده شدند، سپس سطوح آن‌ها تحت عملیات کوبش فراصوتی قرار گرفت. تأثیر پارامترهایی همچون تعداد پاس (۳، ۵ و ۱۰ پاس)، سرعت پیشروی (۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۶ میلی‌متر بر دور) و نوع برش در قطعات وایرکات شده در دامنه ثابت ارتعاش، بر روی تنش پسماند ایجاد شده، مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه‌گیری تنش پسماند به وسیله روش پراش اشعه ایکس، صورت گرفت. همچنین آزمون میکرو سختی بر روی نمونه‌های وایرکات شده، قبل و بعد از فرآیند کوبش فراصوتی، در حالت‌های مختلف انجام گرفت. سپس با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ابعادی ویدیویی<sup>۷</sup> تصاویری از سطوح قبل و بعد از کوبش، در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. جهت طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند، از روش تاگوچی استفاده شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

با وجود پژوهش‌های صورت گرفته، فرآیند کوبش فراصوتی هنوز هم یک مبحث چالش‌برانگیز و مورد توجه محققین است. حذف تنش‌های پسماند کششی در قطعات وایرکات شده، مقوله‌ای بسیار مهم و کاربردی در صنعت است. فرآیند کوبش فراصوتی، یک فرآیند کار سرد و از فرآیندهای جدید است که در آن سطح قطعه کار، توسط ابزار کروی تحت ضربات شدید قرار می‌گیرد. فناوری کوبش فراصوتی، یکی از مؤثرترین روش‌های عملیات مکانیکی بدون براده برداری بر روی سطوح قطعات است که با تغییر شکل پلاستیک سطح قطعه، به وسیله کار سختی، فشردگی سطح و در نهایت ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های سطحی در کاهش زبری سطح، افزایش سختی، بالا بردن مقاومت سایشی و بالا بردن عمر خستگی قطعه مؤثر است. با استفاده از این روش می‌توان خواص مکانیکی سطح را بدون هیچ‌گونه عملیات حرارتی بعدی یا محدودیت اندازه و با مصرف کم انرژی، بهبود بخشید. در این فرآیند لایه زیرسطحی

<sup>1</sup> X-Ray Diffraction (XRD)

<sup>2</sup> Metal Additive Manufacturing (AM)

<sup>3</sup> Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

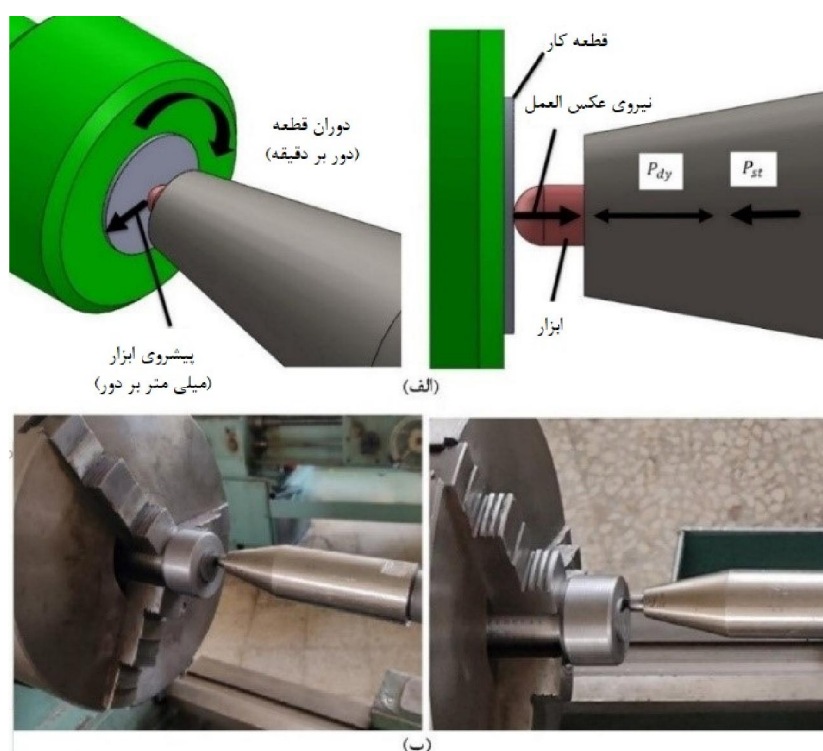
<sup>4</sup> Finishing

<sup>5</sup> Semi-Finishing

<sup>6</sup> Roughing

<sup>7</sup> Vision Measurement Machin (VMM)

فلز، به نقطه تسلیم کششی خود می‌رسد تا تغییر فرم پلاستیک ایجاد شود. با بلند شدن ابزار کروی از سطح و برگشت الاستیک لایه زیرسطحی در محل برخورد ابزار کروی، سطح قطعه کار تحت تنش فشاری ناشی از این برگشت قرار می‌گیرد و هم‌پوشانی فرورفتگی‌های ناشی از برخوردها، یک‌لایه یکنواخت با تنش فشاری باقیمانده به‌جای می‌گذارد. برای آماده‌سازی فرآیند کوبش فراصوتی، به تجهیزاتی مانند ژنراتور فراصوتی، سیستم پنوماتیک، مبدل پیزوالکتریک، تقویت‌کننده<sup>۱</sup>، هورن<sup>۲</sup>، ابزار کروی، قطعه کار، دستگاه تراش و قیدوبند<sup>۳</sup> نیاز است. شکل ۱ شماتیک تجهیز فناوری کوبش فراصوتی در حال کار بر روی پیشانی قطعه کار را نشان می‌دهد. جهت انجام فرآیند، قطعه کار در درون قیدوبند مناسب قرار گرفته و توسط دستگاه تراش حول محور خود می‌چرخد. پس از تنظیم دوران در دستگاه تراش، ابزار کوبش با مقدار تنظیمی پیشروی دستگاه تراش، در طول قطعه کار حرکت می‌کند و ارتعاشات مکانیکی را به سطح قطعه کار انتقال می‌دهد. نیروی استاتیکی حاصل از نیروی پنوماتیکی  $P_{st}$  و نیروی دینامیکی حاصل از ارتعاش ابزار  $P_{dy}$ ، در مجموع نیروی کل  $P_t$  را ایجاد می‌کنند که با نیروی عکس‌العمل قطعه کار مقابله می‌کنند و به سطح قطعه کار وارد می‌شوند.



شکل ۱ الف) نمایش شماتیک فرآیند، دوران قطعه کار و پیشروی ابزار، ب) ابزار کوبش فراصوتی روی دستگاه تراش

رابطه ۱ که در آن نیروی کل واردشده به سطح قطعه کار،  $P_{st}$  نیروی استاتیکی و  $P_{dy}$  نیروی دینامیکی است، معادله‌ای است که فناوری کوبش فراصوتی از آن تبعیت می‌کند [۹]. نیروی استاتیکی توسط سیلندر پنوماتیک تامین شده و به قیدوبند اعمال می‌شود. در این معادله،  $p$  دامنه نیروی دینامیکی می‌باشد و نیروی دینامیکی تابعی از فرکانس ژنراتور  $f$  است. بنابراین هرگونه تغییر در فرکانسی که توسط ژنراتور تولید می‌شود باعث اعمال نیروی دینامیکی متفاوتی در سر ابزار می‌گردد.

$$P_t = P_{st} + P_{dy} = P_{st} + p \times \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

با استفاده از رابطه (۲) می‌توان  $N$  تعداد ضربه‌های ارتعاشی فراصوتی بر روی سطح قطعه کار را به دست آورد. در این رابطه،  $f$  فرکانس فراصوتی برحسب هرتز،  $d$  قطر قطعه کار بر حسب میلی‌متر،  $n$  سرعت اسپیندل برحسب دور بر دقیقه،  $s$  پیشروی بر حسب میلی‌متر بر دور و  $v$  سرعت خطی برحسب میلی‌متر بر ثانیه است [۱۲].

<sup>1</sup> Booster

<sup>2</sup> Horn

<sup>3</sup> Fixture

$$N = \frac{f}{s \times v} = \frac{60 \cdot f}{s \times \pi \times d \times n} \quad (2)$$

در این پژوهش، سرعت دورانی ۴۵ دور بر دقیقه و قطر قطعه کار ۲۳/۵ میلی‌متر و مقدار فرکانس ۲۰ کیلوهرتز با دامنه ثابت در سه سطح پیشروی ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۶ میلی‌متر بر دور است. تعداد ضربه‌های ارتعاشی فراصوتی به ترتیب ۵۴۳۸۰، ۳۶۲۵۳ و ۲۷۱۹۰ بار بر میلی‌متر برای یک پاس فرآیند کوبش فراصوتی بر روی پیشانی قطعه کارها به دست می‌آیند. این ضربه‌های مکانیکی باعث به وجود آمدن تغییر شکل پلاستیکی بر روی سطح و نهایتاً ایجاد تنش پسماند بر روی لایه‌های سطحی قطعه کار می‌شوند. در واقع به علت تغییر شکل دانه‌ها، مساحت کلی مرز دانه‌ها به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و مرز دانه‌های جدید از طریق نابجایی‌هایی که به‌طور پیوسته در طی فرآیند تولید می‌شوند، شکل می‌گیرند.

## ۲-۱- مواد

ماده مورد استفاده در این پژوهش، میلگرد از جنس فولاد آلیاژی Mo40(DIN 1.7225) با مشخصات مندرج در جدول ۱، ساخت شرکت فولاد آلیاژی ایران در یزد، به قطر ۲۵ میلی‌متر به طول تقریبی ۱۱۰ میلی‌متر به تعداد ۳ عدد بوده که برای از بین بردن ناهمواری‌های سطحی، ماشین‌کاری اولیه‌ای برای رسیدن به قطر ۲۳/۵ میلی‌متر با تلورانس  $\pm 0/1$  بر روی نمونه‌ها انجام گردید. قابلیت ماشین‌کاری مناسب، یکی از مزیت‌های این فولاد است. از مهم‌ترین کاربردهای این فولاد آلیاژی، می‌توان به استفاده گسترده آن در صنعت قالب‌سازی، ساخت چرخ‌های دندانه‌دار، پنیون‌ها، شاتون‌ها، غلتک‌های صنایع سیمان و فولاد، پیچ‌های مقاوم، دستگاه‌های سنگ‌شکن و ... اشاره کرد.

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی فولاد آلیاژی Mo40 (کد D۷۲۲۵ شرکت فولاد آلیاژی ایران - یزد) یا کد DIN 1.7225

ترکیبات شیمیایی						
عنصر	C	Cr	Si	Mn	Mo	عناصر دیگر
درصد متوسط وزنی	۰/۴۱٪	۱/۰۵٪	۰/۲۸٪	۰/۷٪	۰/۲۰٪	۰/۱۰٪
خصوصیات فیزیکی						
مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )			
۲۱۰	۶۵۵	۴۱۵	۷/۸۵			

نمونه‌های فولاد آلیاژی Mo40 بدون عملیات حرارتی، سختی ۳۲ راکول سی<sup>۱</sup> داشتند. حضور کروم در این فولاد، سختی‌پذیری آن را افزایش می‌دهد. آزمون جامینی<sup>۲</sup> بر روی یکی از میلگردهای با قطر ۲۳/۵ میلی‌متر نشان داد که قطر بحرانی برای دستیابی به سختی ۴۸ راکول سی، حدوداً ۵۳ میلی‌متر است. بنابراین به منظور افزایش حداکثر سختی، پس از ماشین‌کاری اولیه، ابتدا نمونه‌ها چربی زدایی شده و سپس به مدت ۲۰ دقیقه درون کوره حمام نمکی با دمای ۸۶۰°C قرار گرفتند. جهت نرمالیزاسیون، نمونه‌ها از کوره خارج شده و در درون روغن به سرعت تا حدود دمای ۴۰۰°C سرد شدند. سپس جهت عملیات سخت‌کاری، مجدداً در کوره قرار گرفتند و تا دمای ۸۶۰°C به مدت ۱۰ دقیقه گرم شدند. پس‌از این مدت، نمونه‌ها تا دمای اتاق، داخل روغن سرد شده و سختی میلگردها به مقدار ۴۸ راکول سی به صورت عمقی افزایش یافت (شکل ۲).

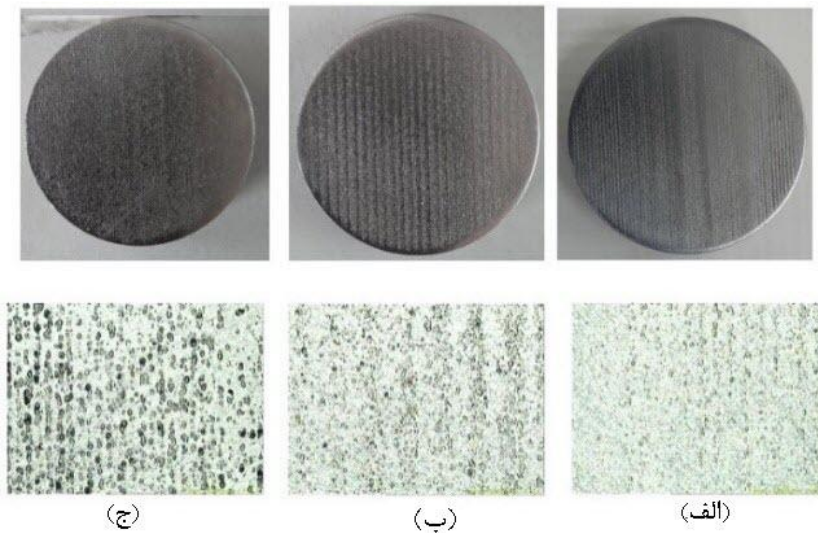
در این تحقیق، پارامترهای برش در ماشین وایرکات، بر اساس جریان (آمپر) تنظیم شد. پارامتر جریان را می‌توان بین ۰ تا ۱۵ آمپر تنظیم کرد. مقادیر بالاتر جریان، ماشین‌کاری را سریع‌تر می‌کند، ولی ممکن است باعث پارگی سیم شود. تعداد ۱۲ عدد نمونه قطعات نهایی با ضخامتی معادل ۸ میلی‌متر با تلورانس  $\pm 0/1$  در سه حالت: پرداخت (جریان ۷ آمپر)، نیمه پرداخت (جریان ۹ آمپر) و خشن (جریان ۱۵ آمپر) برشکاری گردیدند. شکل ۳ تصاویر تهیه شده توسط دستگاه اندازه‌گیری ابعادی ویدیویی از سطح مقطع قطعات نهایی در هر سه حالت برش، را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Rockwell Hardness C (HRC)

<sup>2</sup> Jominy Test



شکل ۲ الف) سه عدد نمونه میلگرد از فولاد آلیاژی M040 پس از فرآیند سخت کاری، ب) ضخامت نهایی قطعه، ج) قطر نهایی قطعه، د) تنظیمات پارامترهای ماشین کاری در ماشین وایرکات و (ذ) نمونه در حال برش



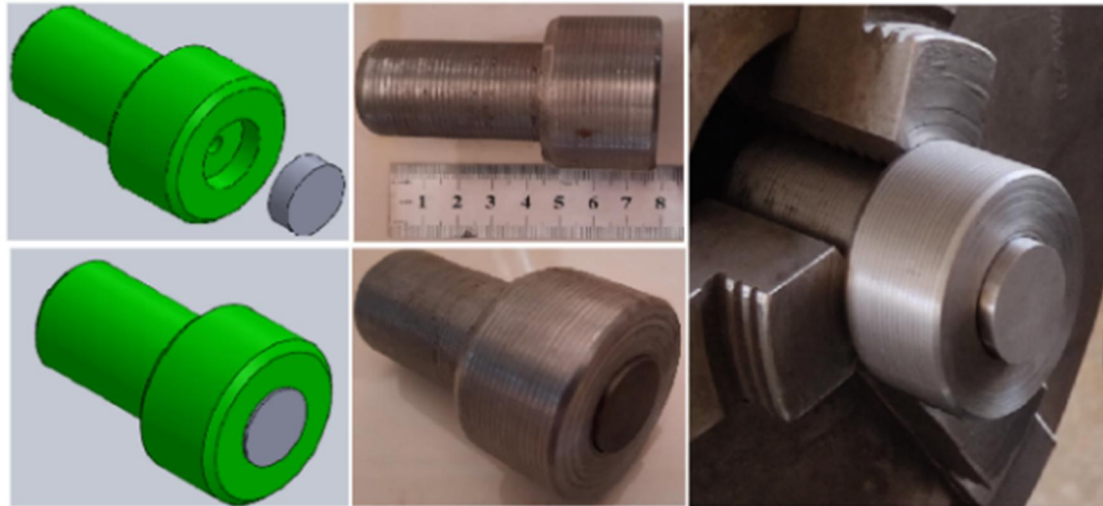
شکل ۳ الف) حالت پرداخت - جریان ۷ آمپر، ب) حالت نیمه پرداخت - جریان ۹ آمپر، ج) حالت خشن - جریان ۱۵ آمپر

## ۲-۲- طراحی آزمایش‌ها و پارامترهای فرآیند

تجهیزات موردنیاز فرآیند کوبش فراصوتی، روی دستگاه تراش مدل TNB50 ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز، در محل کشویی عرضی مرکب دستگاه تراش، نصب شدند. نمونه‌ها به ترتیب، در درون قیدوبند مناسب، مطابق شکل ۴ قرار گرفته و به سه نظام دستگاه بسته می‌شوند. در این تحقیق، دوران ۴۵ دور بر دقیقه بوده و سرعت پیشروی<sup>۱</sup> که یکی از پارامترهای مؤثر در فرآیند کوبش فراصوتی است به صورت متغیر و در سه سطح ۰/۰۸، ۰/۱۲، و ۰/۱۶ میلی‌متر بر دور تنظیم شد.

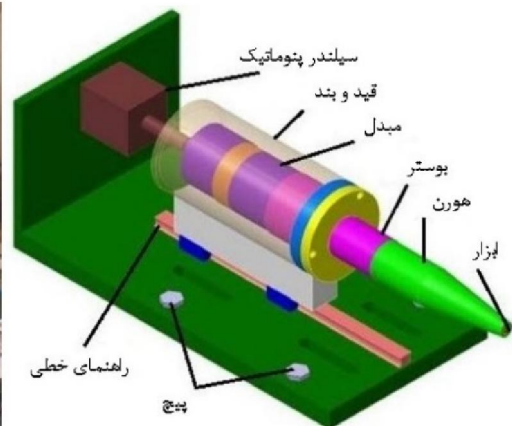
<sup>۱</sup> Feeding Rate(mm/rev)





شکل ۴ ابعاد هندسی قیدوبند و نحوه مونتاژ نمونه‌ها روی دستگاه تراش TNB50

ژنراتور فراصوتی، انرژی الکتریکی فرکانس پایین (۶۰ هرتز) را به انرژی الکتریکی فرکانس بالا (۲۰ کیلوهرتز) تبدیل می‌کند. در این تحقیق، ژنراتور، ساخت شرکت سوئیسی به نام MPI با توان ۳۰۰۰ وات و محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز است. مبدل<sup>۱</sup> با چهار عدد پیزوالکتریک، فرکانس در حدود ۲۰ کیلوهرتز را از ژنراتور دریافت کرده و آن را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می‌کند. این ارتعاشات توسط تقویت‌کننده و هورن، تقویت می‌شوند. مقدار دامنه ارتعاش برای مبدل ۵ میکرومتر است که با اتصال هورن، تقویت شده و به ۱۰ میکرومتر می‌رسد. سپس این ارتعاشات توسط ابزار کروی بر سطح قطعه کار وارد می‌شوند. مقدار فرکانس طبیعی طولی هورن، از شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار آباکوس مقدار ۲۰۴۶۶ هرتز به دست آمده که بایستی با فرکانس طبیعی ۲۰ کیلوهرتز مبدل مطابقت داشته باشد. هورن از جنس فولاد CK45 پس از مدل‌سازی، ساخته شد. در این تحقیق، از ابزار کروی از جنس تنگستن کارباید با قطر ۶ میلی‌متر و سختی RC80، جهت اعمال ضربه‌های مکانیکی بر روی سطح قطعه کار و مقاومت در برابر حرارت تولیدی، استفاده شده است. برای جلوگیری از پس‌زنی ابزار در حین بازگشت از کوبش سطح، فشار هوایی به‌عنوان نیروی استاتیکی استفاده می‌شود. این فشار همچنین عامل حرکت تجهیز کوبش فراصوتی بر روی ریل خطی است. برای تأمین هوای فشرده موردنیاز، از یک کمپرسور با فشار ۸ بار، یک سیلندر پنوماتیکی مدل SC-50X25 S و یک شیر کنترل مجهز به مانومتر فشار جهت تنظیم فشار ۱ بار استفاده می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵ مدل‌سازی اجزاء و مونتاژ تجهیزات فناوری کوبش فراصوتی

<sup>1</sup> Transducer

در این تحقیق از نرم‌افزار مینی تب<sup>۱</sup> برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. آزمایش‌ها، مطابق جدول ۲، بر اساس آرایه‌های متعامد مدل L9 به روش تاگوچی طراحی شده‌اند. ابتدا مطابق با جدول ۳ قطعات شماره‌گذاری شدند، سپس فرآیند کوبش فراصوتی مطابق با متغیرهای این جدول بر روی ۹ نمونه انجام شد. نمونه‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲، قطعات وایرکات شده نیمه پرداخت، پرداخت و خشن هستند که تحت فرآیند کوبش فراصوتی قرار نگرفته‌اند.

جدول ۲ پارامترهای مورد آزمون در فرآیند کوبش فراصوتی

سطوح	تعداد پاس	مقدار پیشروی (میلی‌متر بر دور)	نحوه برشکاری انجام شده توسط فرآیند وایرکات
سطح ۱	۱	۰/۰۸	پرداخت
سطح ۲	۳	۰/۱۲	نیمه پرداخت
سطح ۳	۵	۰/۱۶	خشن

جدول ۳ شرایط آزمون‌ها بر اساس آرایه‌های متعامد L9 طرح تاگوچی

شماره نمونه	تعداد پاس	مقدار پیشروی (میلی‌متر بر دور)	نوع برشکاری توسط فرآیند وایرکات	سطح پاس	سطح پیشروی	سطح نوع برش
۱	۱	۰/۰۸	پرداخت	۱	۱	۱
۲	۳	۰/۱۲	پرداخت	۲	۲	۱
۳	۵	۰/۱۶	پرداخت	۳	۳	۱
۴	۳	۰/۰۸	نیمه پرداخت	۲	۱	۲
۵	۵	۰/۱۲	نیمه پرداخت	۳	۲	۲
۶	۱	۰/۱۶	نیمه پرداخت	۱	۳	۲
۷	۵	۰/۰۸	خشن	۳	۱	۳
۸	۱	۰/۱۲	خشن	۱	۲	۳
۹	۳	۰/۱۶	خشن	۲	۳	۳

### ۳- نتایج و بحث

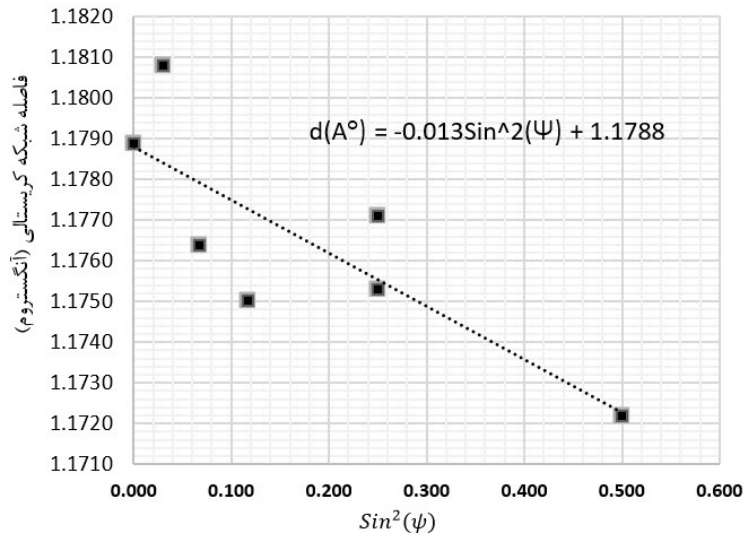
#### ۳-۱- اندازه‌گیری تنش پسماند به روش تفرق اشعه ایکس<sup>۲</sup>

روش تفرق اشعه ایکس، روشی غیر مخرب است که از آن می‌توان در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند ایجاد شده بر روی سطح استفاده نمود. در این روش، ابتدا بر اساس تعداد روبش روی سطح قطعه کار، زاویه مناسب پیک پر اش X مشخص می‌گردد. سپس دستگاه در این زاویه ثابت شده و قطعه کار در زوایای مختلف  $\psi$  قرار گرفته و می‌چرخد. در هر زاویه، فاصله بین صفحه‌های بلورین تعیین می‌شود و سپس نموداری برحسب  $\sin^2(\psi)$  و فاصله بین صفحه‌های بلورین رسم می‌گردد. برای محاسبه مقدار تنش پسماند، لازم است خطی میانگین بر روی این نمودار رسم کرده، شیب خط میانگین، مقدار تنش پسماند موجود در سطح است. شیب مثبت نشان‌دهنده تنش‌های پسماند کششی و شیب منفی نشان‌دهنده تنش پسماند فشاری است. عمق نفوذ اشعه ایکس، در سطح نمونه کمتر از ۵ میکرومتر است. به‌عنوان نمونه، در شکل ۶ فاصله بین صفحه‌های بلورین برحسب  $\sin^2(\psi)$ ، مربوط به نمونه قطعه شماره یک نشان داده شده است [۱۳].

<sup>1</sup> MiniTab

<sup>2</sup> X-Ray Diffraction



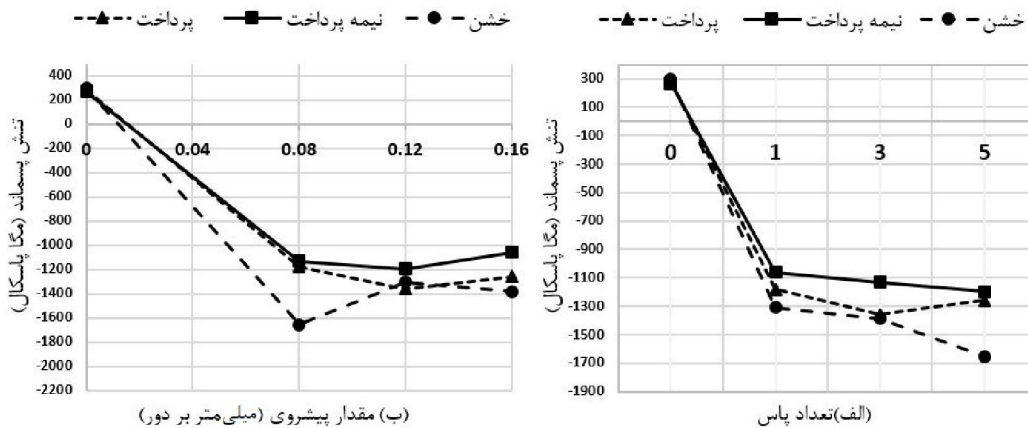


شکل ۶ نمودار فاصله صفحه‌های بلورین برحسب  $\text{Sin}^2(\psi)$  مربوط به نمونه قطعه شماره ۱

از رابطه (۳) که در آن  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  نسبت پواسون،  $d_0$  فاصله اولیه بین صفحه‌های بلورین و  $m$  شیب خط در نمودار فاصله صفحه‌های بلورین برحسب  $\text{Sin}^2(\psi)$  است، می‌توان مقدار تنش پسماند را محاسبه نمود [۱۳].

$$\sigma = \left( \frac{E}{1+\nu} \right) \cdot \frac{m}{d_0} \quad (3)$$

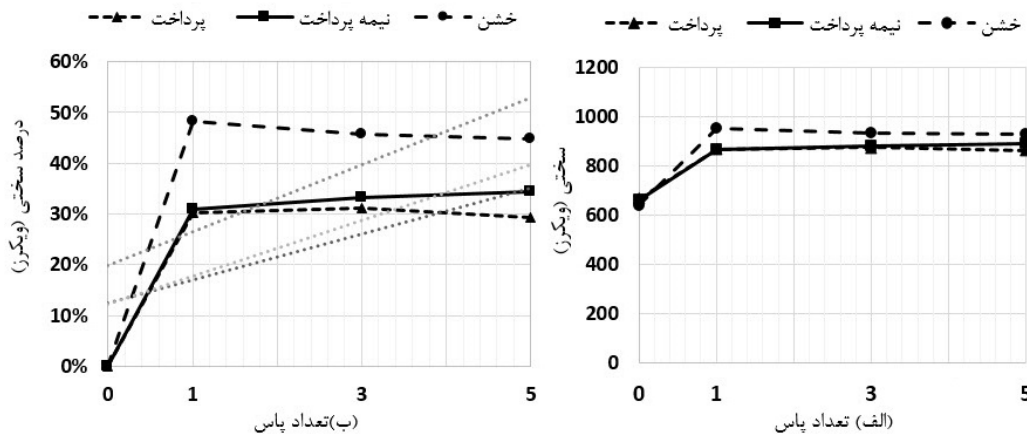
تنش پسماند در نمونه‌های وایرکات شده قبل از کوبش، در هر سه حالت کششی (مقادیر مثبت) است که از عیوب روش برشکاری با وایرکات است. انجام عملیات کوبش فراصوتی، منجر به ایجاد تنش پسماند از نوع فشاری (مقادیر منفی) و تغییر حالت تنش پسماند کششی موجود به تنش پسماند فشاری می‌شود. علت ایجاد تنش پسماند فشاری این است که ناحیه ضرب‌دیده دچار تغییر فرم شدید پلاستیک می‌شود ولی ماده اطراف آن ناحیه که در حالت الاستیک است سعی در مهار و برگرداندن به ابعاد اولیه را دارد، در نتیجه یک تنش پسماند فشاری ایجاد می‌شود. در نمودار شکل ۷-الف تغییرات تنش پسماند برحسب تعداد پاس کوبش انجام شده بر روی نمونه‌ها نمایش داده شد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس‌ها، از یک پاس به ۵ پاس، تنش پسماند افزایش یافته است. حالت پاس صفر، مربوط به نمونه‌های وایرکات شده است که تحت فرآیند کوبش فراصوتی قرار نگرفته‌اند. همچنین در نمودار شکل ۷-ب، تغییرات تنش پسماند برحسب مقدار پیشروی ابزار کوبش مشاهده می‌شود. افزایش مقدار پیشروی و یا به عبارت دیگر افزایش سرعت کوبش، باعث کاهش هم‌پوشانی ضربه‌های کنار هم می‌شود و در نتیجه باعث کاهش توزیع تنش پسماند در لایه‌های نزدیک به سطح نمونه‌ها می‌شود.



شکل ۷ الف) تنش پسماند برحسب تعداد پاس‌های کوبش، ب) تغییرات تنش پسماند برحسب مقدار پیشروی ابزار کوبش

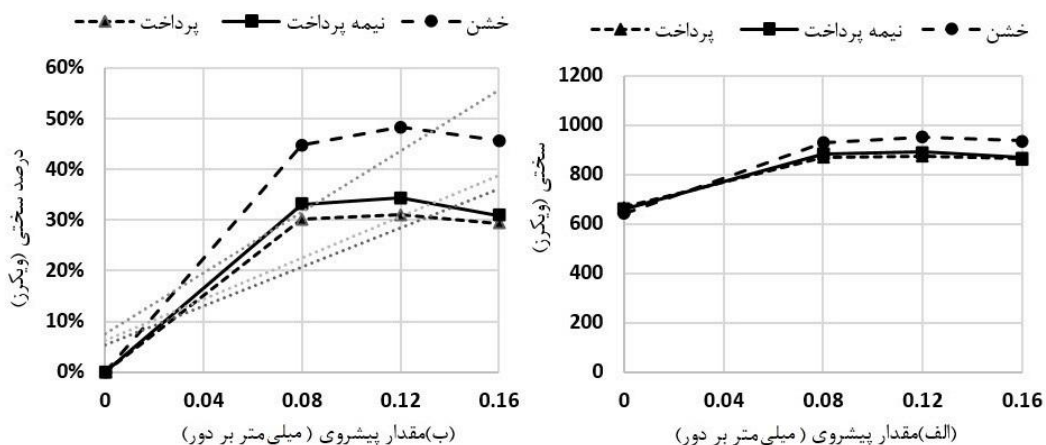
## ۳-۲- اندازه‌گیری سختی سطحی

فرآیند کوبش فراصوتی، با اعمال بار دینامیکی تا ضخامت‌های کم زیرسطحی، باعث تغییر در سختی قطعه خواهد شد. سختی سطوح، قبل و بعد از فرآیند کوبش فراصوتی توسط دستگاه میکرو سختی سنج KOOPA مدل UV1 ساخت چین ارزیابی شد. آزمون میکرو سختی برای اندازه‌گیری سختی قطعات کوچک و نازک و نیز فازهای ریزساختار با ضخامت کم به کمک اعمال نیروهای بسیار کم، بکار می‌رود. در این تحقیق، آزمون میکرو سختی بر روی سطح قطعات، با اعمال نیروی ۱ کیلوگرمی به مدت ۱۰ ثانیه و با استفاده از ابزار هرمی مربعی و میانگین عمق اثر ۶/۷۹ میکرومتر، انجام شد. در نمودار شکل ۸- الف مقادیر سختی سطحی نمونه‌ها و در شکل ۸- ب، درصد سختی سطحی نمونه‌ها بر حسب تعداد پاس‌های مختلف نمایش داده شده است. منحنی سختی سطحی برای نمونه کوبش شده در پاس یک نسبت به نمونه کوبش نشده، افزایش سختی سطحی از ۶۰۰ تا ۸۰۰ ویکرز را نشان می‌دهد. پس از انجام فرآیند در همان پاس اول، به ترتیب برای نمونه نیمه پرداخت، پرداخت و خشن افزایش ۳۰، ۳۱ و ۴۸ درصدی در مقادیر سختی سطحی مشاهده می‌گردد. همچنین با افزایش تعداد پاس‌های انجام فرآیند، مقادیر سختی سطحی نمونه‌ها نیز افزایش پیدا کرده است.



شکل ۸ الف) تغییرات سختی سطحی بر حسب تعداد پاس‌های کوبش، ب) تغییرات درصد سختی سطحی بر حسب تعداد پاس‌های کوبش

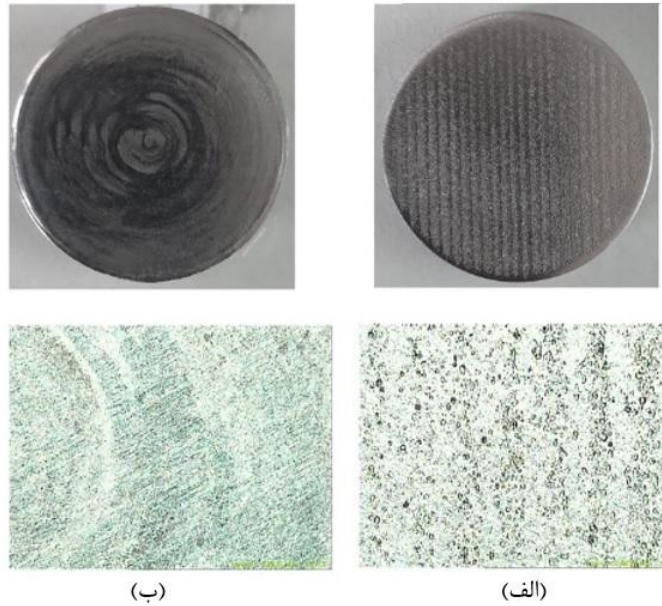
در نمودار شکل ۹- الف، سختی سطحی نمونه‌ها و در شکل ۹- ب، درصد سختی سطحی نمونه‌ها بر حسب مقادیر مختلف پیشروی نمایش داده شده است. فرآیند کوبش فراصوتی، عملیات سخت‌کاری سطحی را با صاف کردن ناهمواری‌های سطحی و فشردن آن‌ها درون یک‌لایه سخت شده انجام می‌دهد که با شکست لایه‌های زیرسطحی و ایجاد کار سختی، سختی سطح افزایش می‌یابد [۹]. سختی سطحی، با افزایش مقدار پیشروی کاهش می‌یابد. مشهود است با وجود اینکه، با افزایش مقدار پیشروی از ۰/۰۸ به ۰/۱۲ میلی متر بر دور، مقادیر سختی سطحی به ترتیب در نمونه‌های خشن ۳٪ و در نمونه‌های نیمه پرداخت ۵٪ افزایش یافته‌اند ولی با افزایش مجدد، مقدار پیشروی از ۰/۱۲ به ۰/۱۶، مقادیر سختی سطحی کاهش یافته‌اند که علت این موضوع را در کوبش سریع‌تر و زمان کمتر در فشردن لایه‌های زیرسطحی می‌توان یافت.



شکل ۹ الف) منحنی سختی سطحی بر حسب مقادیر پیشروی ابزار، ب) منحنی درصد سختی سطحی بر حسب مقادیر پیشروی ابزار

### ۳-۳- نتایج تصویربرداری ابعادی ویدیویی<sup>۱</sup>

پس از تکمیل فرآیند کوبش فراصوتی، یک ارزیابی اولیه کامل برای تأیید پوشش جامع سطوح قطعه کار انجام شد. به منظور دستیابی به این موضوع، یک دستگاه اندازه‌گیری ابعادی ویدیویی بسیار دقیق، مناسب برای اندازه‌گیری‌های دوبعدی، از شرکت Easson مدل C2515 ساخت کشور چین با دقت اندازه‌گیری  $0.035$  میلی‌متر به ازای هر پیکسل ( $0.5$  میکرومتر)، به کار گرفته شد. تصاویری از سطوح نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند کوبش فراصوتی، تهیه شد (شکل ۱۰). نتایج حاکی از آن است که فناوری کوبش فراصوتی با کوبش ناهمواری‌های سطحی، باعث تغییر در ریز ساختار ماده می‌شود.

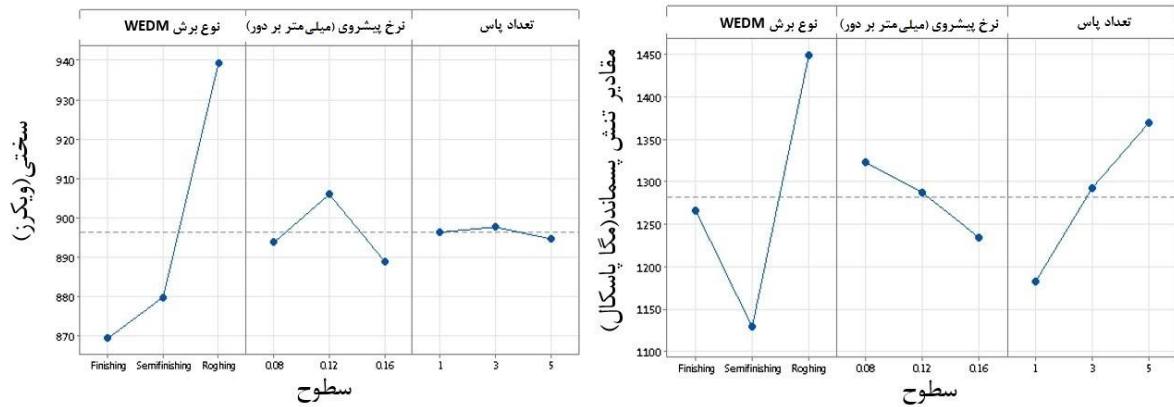


شکل ۱۰ الف) تصویر VMM از نمونه وایرکات شده قبل از کوبش با بزرگنمایی X97، ب) تصویر VMM از نمونه وایرکات شده پس از کوبش با بزرگنمایی X97

### ۳-۴- نتایج تحلیلی

با استفاده از طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، تعداد آزمون‌ها کاسته شد و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی تنش پسماند در شکل ۱۱ مشخص شد. با استفاده از این روش، پیش‌بینی می‌شود که نمونه وایرکات شده با حالت خشن و نرخ پیشروی  $0.08$  میلی‌متر بر دور و تعداد ۵ پاس دارای بیشترین تنش پسماند به صورت میانگین به مقدار  $1577$  مگاپاسکال خواهد بود که این نمونه، در بین نمونه‌های مورد آزمون موجود بوده و مقدار اندازه‌گیری تنش پسماند آن  $1654$  مگاپاسکال است و خطای مقدار پیش‌بینی شده و مقدار تجربی اندازه‌گیری شده معادل  $4.6\%$  است که خطای قابل‌قبولی است. همچنین بر اساس همین روش، پیش‌بینی می‌شود که نمونه وایرکات شده با حالت خشن و نرخ پیشروی  $0.12$  میلی‌متر بر دور و تعداد ۳ پاس دارای بیشترین مقدار سختی بصورت میانگین به مقدار  $95.06$  ویکرز خواهد بود که این نمونه موجود نبوده و لذا برای صحت سنجی پیش‌بینی مذکور، فرآیند کوبش فراصوتی بر روی نمونه جدید با حالت خشن، نرخ پیشروی  $0.12$  میلی‌متر بر دور و تعداد ۳ پاس، انجام شد. سپس آزمون سختی سطحی بر روی نمونه جدید انجام پذیرفت و مقدار سختی سطحی نمونه جدید  $856/25$  ویکرز به دست آمد. خطای مقدار پیش‌بینی شده و مقدار تجربی اندازه‌گیری شده معادل  $9.9\%$  است که خطای قابل‌قبولی است. نتایج تجربی حاکی از آن است که گروه حالت خشن کوبش شده، دارای بیشترین سختی هستند. همچنین بر اساس روش تاگوچی، عوامل تأثیرگذار بر ایجاد مقدار تنش پسماند و مقدار سختی سطحی با استفاده از فرآیند کوبش فراصوتی، به ترتیب الویت، نوع برشکاری وایرکات، مقدار پیشروی و تعداد پاس است. تصاویر دستگاه اندازه‌گیری ابعادی ویدیویی نشان از تغییر ساختار سطحی در اثر کوبش فراصوتی می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهد که لایه‌های سطحی بعد از فرآیند کوبش، ریزتر شده‌اند.

<sup>1</sup> Vision Measurement Machin (VMM)



شکل ۱۱ تأثیر پارامترهای مختلف بر روی تنش پسماند و مقدار سختی

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های وایرکات شده در هر سه حالت پرداخت، نیمه پرداخت و خشن به وجود تنش‌های پسماند کششی اشاره داشت که از معایب روش برشکاری پر کاربرد صنعتی وایرکات است. جهت رفع این عیب، فرآیند کوبش فراصوتی بر روی نمونه‌های مختلف برشکاری شده با وایرکات انجام گرفت. نتایج نشان دادند که در اثر فرآیند کوبش فراصوتی، تنش از نوع منفی و فشاری ایجاد می‌شود و با افزایش تعداد پاس‌ها، تنش پسماند افزایش می‌یابد. افزایش سرعت کوبش، باعث کاهش هم‌پوشانی ضربه‌های کنار هم می‌شود و در نتیجه باعث کاهش توزیع تنش پسماند در لایه‌های نزدیک به سطح نمونه‌ها می‌گردد. با افزایش تعداد پاس‌ها، مقدار سختی سطحی نمونه‌ها در نمونه‌های نیمه پرداخت، پرداخت و خشن افزایش ۳۰، ۳۱ و ۴۸ درصدی پیدا کرد. از طرف دیگر، مقدار سختی با افزایش مقدار پیشروی کاهش می‌یابد که علت این موضوع کوبش سریعتر و زمان کمتر در فشردن لایه‌های زیرسطحی است. طراحی آزمایش‌ها، تعداد آزمایش‌ها را کاهش داد و تأثیر پارامترهای مختلف بر تنش پسماند را شناسایی کرد. با استفاده از روش تاگوچی، عوامل مؤثر بر تنش پسماند و سختی سطح در فرآیند کوبش فراصوتی به ترتیب الویت عبارت‌اند از نوع برش، سرعت تغذیه و تعداد پاس. اندازه‌گیری ویدیویی تغییرات ساختار سطحی را تأیید نمود.

#### References

- [1] Das S, Klotz M, Klocke F. EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses. *Journal of materials processing technology*. 2003;142(2):434-51. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00624-1
- [2] Dehestani H, Abootorai MM. The effect of current intensity and feed rate on surface roughness and fatigue life of work piece in wire electrical discharge turning (WEDT) process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;7(8):36-44. [In Persian]
- [3] Zare V, Mazidi A, Amirian G. Modelling and Analysis of the Wire Tool Vibration in Wire-Cut EDM. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023. [In Persian]
- [4] Ekmekci B. Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). *Applied surface science*. 2007;253(23):9234-40.
- [5] Malaki M, Ding H. A review of ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*. 2015;87:1072-86. doi: 10.1016/j.matdes.2015.08.102
- [6] Yin D, Wang D, Li W, Li X, Zhang H, Naher S. Development of a new 3D model for the prediction of residual stress and fracture behaviour in Ti-6Al-4V after ultrasonic peening treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;247:29-39. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.033
- [7] Yuan K, Sumi Y. Simulation of residual stress and fatigue strength of welded joints under the effects of ultrasonic impact treatment (UIT). *International Journal of Fatigue*. 2016;92:321-32. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.07.018
- [8] Fereidooni B, Morovvati M, Sadough-Vanini S. Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 Stainless Steel joints in corrosive environment. *Ultrasonics*. 2018;88:137-47. doi: 10.1016/j.ultras.2018.03.012

- [9] Abbasi A, Amini S, Sheikhzadeh G. Investigation of the Wear Behavior of Graphite Steel (GSH48) in Ultrasonic Peening Process. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2018;50(3):529-40. doi: [10.22060/MEJ.2017.12899.5463](https://doi.org/10.22060/MEJ.2017.12899.5463)
- [10] Ghasemi A, Vanini SAS. A comprehensive investigation on the effect of controlling parameters of ultrasonic peening treatment on residual stress and surface roughness: Experiments, numerical simulations and optimization. *Surface and Coatings Technology*. 2023;464:129515. doi: [10.1016/j.surfcoat.2023.129515](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129515)
- [11] Ansarian I, Taghiabadi R, Amini S, Saboori A. Enhancing the corrosion behavior of Laser Powder Bed Fusion processed CP-Ti via Ultrasonic Peening. *Materials Letters*. 2023;354:135410. doi: [10.1016/j.matlet.2023.135410](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135410)
- [12] Cao X, Pyoun Y, Murakami R. Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*. 2010;256(21):6297-303.
- [13] Prevey PS. X-ray diffraction residual stress techniques. ASM International, ASM Handbook. 1986;10:380-92.