



مطالعه تجربی آسیب‌های زیرسطحی و مکانیزم‌های باربرداری در فرآیند فرزکاری با جت آب و ساینده بر روی سرامیک آلومینیوم اکسید

فرزاد پشم فروش^{۱*}، رامین بیرقی بارانلو^۲، رسول معروفی آذر^۳ و علی حسن پور باباجان^۴

^۱ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۴ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

چکیده

ماشینکاری مواد ترد به دلیل سختی و مقاومت سایشی زیاد، آسیب‌های زیرسطحی وارده و کیفیت سطحی پایین قطعات، توسط روش‌های سنتی بسیار دشوار بوده و به دلیل سایش ابزار برشی بسیار پرهزینه است. در این میان، ماشینکاری با جت آب و ساینده به دلیل عدم وجود تنش‌های حرارتی، نیروی بسیار کم وارد به قطعه کار و عدم تماس مستقیم بین ابزار و قطعه کار کاربرد زیادی در برشکاری مواد سخت و شکننده دارد؛ لذا در این تحقیق به مطالعه تجربی فرزکاری با جت آب و ساینده روی سرامیک آلومینیوم اکسید پرداخته شد. در این راستا تأثیر پارامترهای ورودی از قبیل فشار جت آب، سرعت پیشروی، درصد وزنی ذرات ساینده و فاصله نازل از سطح قطعه کار، روی آسیب‌های زیرسطحی و مکانیزم‌های باربرداری تحلیل گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، مکانیزم غالب براده‌برداری برای سرامیک آلومینیوم اکسید میکرو شکست است که در آن، براده‌برداری از طریق ایجاد میکرو ترک‌ها و میکرو چاله‌هایی صورت می‌پذیرد که در ناحیه‌ای پایین‌تر از عمق برخورد ذرات ساینده ایجاد می‌شوند. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل آماری، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عمق آسیب‌های زیرسطحی به ترتیب عبارتند از فشار جت آب، درصد وزنی ذرات ساینده، سرعت پیشروی و فاصله نازل از سطح قطعه کار.

کلمات کلیدی: فرزکاری با جت آب و ساینده؛ مکانیزم‌های باربرداری؛ آسیب‌های زیرسطحی؛ سرامیک آلومینیوم اکسید.

Experimental Study of Subsurface Damage and Material Removal Mechanisms in Abrasive Waterjet Milling Process of Aluminum Oxide Ceramic

F. Pashmforoush^{1,*}, R. Beyraghi Baranlou², R. Maroofiazar³, A. Hassanpour Babajan⁴

¹ Assis. Prof., Mech. Eng., University of Maragheh, Maragheh, Iran.

² Master of Science, Mech. Eng., University of Maragheh, Maragheh, Iran.

³ Assis. Prof., Mech. Eng., University of Maragheh, Maragheh, Iran.

⁴ Master of Science, Mech. Eng., University of Maragheh, Maragheh, Iran.

Abstract

Machining of brittle materials by conventional machining processes is very difficult due to the high hardness and wear resistance of this material, subsurface damages, poor surface quality and severe wear of the cutting tool. In this regard, abrasive water jet machining is widely used for machining of hard and brittle materials due to its excellent properties such as lack of thermal stresses, low machining forces, lack of mechanical contact between the specimen and cutting tool. Hence, in this research, abrasive water jet milling of aluminum oxide ceramic was experimentally investigated. In this respect, the influence of input parameters such as water jet pressure, feed rate, abrasive particles weight fraction and nozzle gap was evaluated on subsurface damages and material removal mechanisms. The obtained results indicate that the dominant material removal mechanism for aluminum oxide is micro-fracture, in which, material removal takes place by formation of micro-cracks and micro-craters beneath the abrasives indentation depth. The statistical analysis of variance (ANOVA) revealed that the most significant parameters affecting subsurface damage depth are water jet pressure, weight fraction of abrasive particles, feed rate and nozzle gap, respectively.

Keywords: Abrasive Water Jet Milling; Material Removal Mechanisms; Subsurface Damage; Aluminum Oxide Ceramic.

۱- مقدمه

ماشینکاری مواد ترد به دلیل سختی و مقاومت سایشی زیاد، توسط روش‌های سنتی بسیار دشوار بوده و به دلیل سایش شدید ابزار برشی بسیار پرهزینه است؛ همچنین شدت آسیب‌های زیرسطحی در فرآیندهای سنتی، بسیار بیشتر بوده و کیفیت سطحی قطعات ماشینکاری شده پایین است؛ لذا استفاده از فرآیندهای پیشرفته ماشینکاری برای براده‌برداری دقیق و مقرون به صرفه این مواد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳-۱]. در این میان، ماشینکاری با جت آب و ساینده، از جمله فرآیندهای غیر سنتی است که در آن به کمک ذرات ساینده به همراه یک جت آب با فشار بالا، عملیات براده‌برداری مواد سخت مانند، سرامیک‌ها، سنگ‌ها و فلزات انجام می‌پذیرد. در این فرآیند جریان حاصل از مخلوط آب و ذرات ساینده با سرعت بالا به سطح قطعه کار برخورد کرده و از طریق مکانیزم‌های میکرو برش یا میکرو شکست، عمل براده‌برداری انجام می‌پذیرد [۴]. مهم‌ترین مزایای این فرآیند که آن را به ابزار مهمی برای ماشینکاری طیف وسیعی از مواد فلزی و غیر فلزی تبدیل کرده است عبارتند از: توانایی ماشینکاری در تمام جهات بدون ایجاد پلیسه، عدم وجود تنش‌های حرارتی، نیروی بسیار کم وارد به قطعه کار، عدم تماس مستقیم بین ابزار و قطعه کار، عدم نیاز به تیز کردن ابزار (جت آب و ساینده) و سازگاری با محیط زیست [۵]. معایبی که برای این فرآیند می‌توان بیان نمود، عبارتند از: هزینه اولیه بالا، ایجاد سرو صدای زیاد در حین ماشینکاری، هزینه تعمیر و نگهداری زیاد [۶].

تا کنون مطالعات مختلفی روی این فرآیند صورت پذیرفته است. اولمن و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۲، تراشکاری با جت آب و ساینده را به صورت تجربی روی آلومینیوم مورد آزمایش قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد که آسیب دانه‌ها از نظر حرارتی و ترک‌های سطحی در مقایسه با روش‌های دیگر تراشکاری بسیار کمتر است. مشابه این تحقیق توسط کارتال و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۷، با هدف بررسی تأثیر پارامترهای تراشکاری با جت آب و ساینده روی آلومینیوم صورت گرفت. ایشان تأثیر پیشروی نازل، فاصله نازل با سطح قطعه کار و درصد مخلوط شدگی ذرات ساینده را روی صافی سطح مطالعه کردند. طی نمونه زنی‌های مختلف نتیجه‌گیری گردید که با کاهش مقدار پیشروی،

افزایش فاصله نازل تا قطعه کار و افزایش درصد وزنی ذرات ساینده، کیفیت سطح بهتر می‌شود.

لیهوکا و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۶، قابلیت ماشینکاری برنج را توسط روش ماشینکاری با جت آب و ساینده مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق نمونه برنجی پس از شیارزنی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، مورد مشاهده و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این ارزیابی، بیانگر عدم وجود مرز مشخص بین شیار و سطح قطعه، کیفیت سطح پایین، اکستروژن مواد بالای سطح شیار و وجود ترک در زیر سطح داخلی شیار است.

حجاجی و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۷، به بررسی تأثیر ماشینکاری با جت آب و ساینده روی کامپوزیت کربن/اپوکسی پرداختند. تصاویر میکروسکوپی نشان داد که در قسمت‌هایی از قطعه کار، الیاف تقویت کننده دچار شکست شده‌اند؛ همچنین نتایج آزمایش کشش نشان داد که کیفیت سطح قطعه تأثیر زیادی در استحکام کششی مواد دارد.

پوتز و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۸، قابلیت ماشینکاری کامپوزیت هیبریدی پایه کربن تقویت شده با ورق آلومینیوم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد، به دلیل کم بودن مقدار نیروهای وارده به قطعه کار و همچنین عدم وجود تنش‌های حرارتی در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده، این فرآیند نسبت به سایر فرآیندهای برشکاری عملکرد مطلوب‌تری دارد.

سریواستاوا و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۷، تراشکاری با جت آب و ساینده را روی کامپوزیت‌های پایه فلزی مورد بررسی قرار دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده، وجود ترک و شکست‌های ناشی از براده‌برداری است؛ همچنین به دلیل فشار زیاد جت، ذرات ساینده در اندازه‌های میکرو در سطح قطعه فرو می‌روند؛ همچنین مشاهده گردید، فشار جت آب باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک روی سطح و زیر سطح قطعه می‌شود.

لیو و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۴، فرآیند تراشکاری با جت آب و ساینده را روی سرامیک آلومینا به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. ایشان تأثیر دور، سرعت پیشروی، فشار و زاویه نازل را روی کیفیت سطح قطعات، مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده، بیانگر کیفیت سطحی

اوایل حرکت خود به شدت شتاب می‌گیرند و سپس داخل لوله نازل میل به تعادل دارند که با انتخاب طول مناسب لوله می‌توان زمان مناسب را برای تعادل ذرات فراهم ساخت.

گو و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۱۶، شبیه‌سازی عددی فرآیند برش جت آب ساینده را بر اساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار، مورد بررسی قرار دادند. هدف از این بررسی، آنالیز برخورد ذرات ساینده به سطح قطعه کار و اندازه‌گیری عمق برش در فشارهای مختلف بود. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با تحقیق تجربی بیانگر اختلاف قابل قبولی بین نتایج به دست آمده است.

با توجه به پیشینه تحقیق فوق ملاحظه می‌شود که تاکنون مطالعات بسیار کمی در زمینه مکانیزم‌های باربرداری و آسیب‌های زیرسطحی (به ویژه بر روی سرامیک آلومینیوم اکسید) صورت پذیرفته است. فقط در یک تحقیق، "آسیب-های زیرسطحی" در فرایند "تراشکاری" با جت آب و ساینده روی سرامیک آلومینیوم اکسید، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. لذا در این مقاله، در فرآیند "فرزکاری" با جت آب و ساینده، "آسیب‌های زیرسطحی" و هم‌منظور "مکانیزم‌های باربرداری" به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، آزمایش‌های ماشینکاری به ازای مقادیر مختلف پارامترهای ورودی (فشار جت آب، سرعت پیشروی، فاصله نازل تا سطح قطعه کار و درصد وزنی ذرات ساینده) انجام پذیرفت و قطعات نمونه توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

قطعه نمونه استفاده شده در آزمایش‌های تجربی بلوک‌های مستطیلی با ابعاد $50 \times 50 \times 10$ میلی‌متر از جنس سرامیک آلومینیوم اکسید (آلومینا) با درجه خلوص 99.5% است که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۱ قابل مشاهده است [۱۹]. ذرات ساینده استفاده شده نیز به دلیل سختی بالای قطعه نمونه از جنس سیلیکون کارباید است که تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. اندازه ذرات ساینده، تقریباً برابر 311×175 میکرون با مش ۸۰ است.

مطلوب تراشکاری با جت آب و ساینده نسبت به فرآیند سنگ‌زنی است.

کومار و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۱ شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری با جت آب ساینده را روی آلیاژهای تیتانیوم مورد استفاده در اجزای هواپیما و ایمپلنت‌های زیست پزشکی مطالعه کردند. هدف از این مطالعه، بررسی برخورد یک تک ذره ساینده به سطح قطعه کار و ایجاد حفره ناشی از فرسایش و برداشت براده در سرعت و زوایای مختلف بود که در این شبیه‌سازی از زاویه 30° تا 90° درجه در محدوده سرعت 180 تا 220 متر بر ثانیه استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که هر چه قدر سرعت و زاویه پرتاب بیشتر باشد، عمق برش بیشتر شده و حفره ایجاد شده شبیه به دایره منظم می‌شود؛ ولی هر چه زاویه و سرعت پرتاب کمتر شود، عمق برش کمتر شده و حفره به شکل بیضی کشیده شده در می‌آید.

مشابه این تحقیق توسط لیو و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۶ روی سرامیک آلومینا و با هدف مطالعه توزیع تنش‌ها صورت پذیرفت. نتایج حاصل، ایجاد تنش کششی در سطح برخورد ذرات را نشان داد که این تنش عامل اصلی برداشت ماده از قطعه هدف است؛ همچنین در این تحقیق، تأثیر زاویه پرتاب ذرات ساینده روی عمق برش مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج تجربی مقایسه گردید. مقایسه نتایج به دست آمده، بیانگر دقت بالای روش المان محدود در پیش‌بینی عمق نفوذ ذرات ساینده است.

شاه وردی و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۱۱، شبیه‌سازی ماشین‌کاری با جت آب و ساینده را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۱ روی فولاد کم کربن انجام دادند. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی تأثیر فشار جت آب و سرعت حرکت نازل بر عمق برش است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هر چه قدر سرعت حرکت نازل کمتر و فشار جت آب بیشتر باشد، عمق برش نیز بیشتر می‌شود.

فنگ و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۱۱، حرکت ذره ساینده داخل محفظه و لوله تمرکز نازل و پرتاب آن به سمت قطعه کار را با روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ذرات در

^۱ Smoothed Hydrodynamics Particle (SPH)



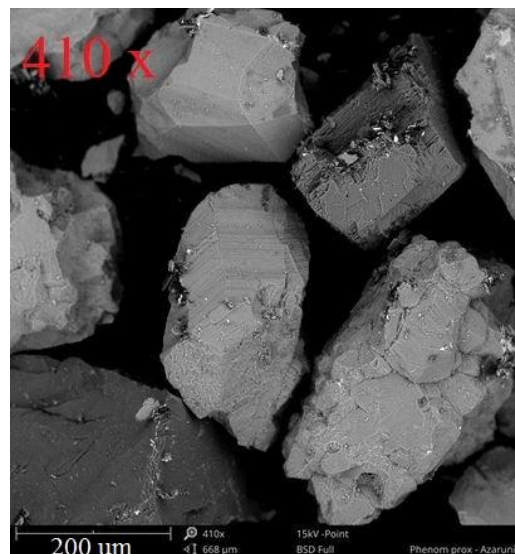
شکل ۲- دستگاه جت آب و ساینده مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۳- نمونه‌ای از مراحل فرزکاری با جت آب و ساینده بر روی نمونه‌های سرامیکی

جدول ۱- مشخصات مکانیکی نمونه‌های سرامیک آلومینیوم اکسید [۱۹]

چگالی (g/cm ³)	دمای ذوب (°C)	استحکام فشاری (MPa)	ضریب پواسون
۳/۸	۲۰۷۲	۲۱۰۰	۰/۳



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ذرات ساینده

دستگاه واتر جت مورد استفاده در این پژوهش که در شکل ۲ نشان داده شده است، ساخت شرکت رادوکس^۱ است که توانایی تنظیم فاصله نازل تا قطعه کار ۳ میلی‌متر را دارا است که این مزیت برای ماشین‌کاری با عمق زیاد و کاهش زاویه انحراف جت آب مناسب است.

سیستم نازل این دستگاه از نوع تغذیه کناری است که دارای قطر منفذ^۲ ۰/۲۵ میلی‌متر، قطر لوله تمرکز^۳ ۰/۷۶ میلی‌متر و طول لوله تمرکز ۲۰۰ میلی‌متر است. پمپ دستگاه توانایی تولید توان ۳۷ hp، فشار ۴۲۰ مگاپاسکال و دبی آب ۳/۷ لیتر بر دقیقه را دارد که برای قطر نازل ۰/۲ تا ۰/۳۳ میلی‌متر مناسب است. نمونه‌ای از مراحل فرزکاری با جت آب و ساینده روی بلوک سرامیکی در شکل ۳ قابل مشاهده است.

^۱ Radox

^۲ Orifice

^۳ Focus Tube

۳- نتایج

۳-۱- بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر آسیب‌های زیرسطحی

در هر مرحله از آزمایش‌های تجربی با تغییرات پارامترهای ورودی اقدام به فرزکاری شد، سپس از هر شیار ایجاد شده از وسط نمونه، مکعبی به اندازه ۱۰ میلی‌متر برش داده شد و توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از هر دو وجه حرکت نازل، عکس برداری گردید.

به منظور بررسی تأثیر یک پارامتر مشخص، آن پارامتر به صورت یک کمیت متغیر و سایر پارامترها به صورت یک کمیت ثابت در نظر گرفته شدند که مقدار این پارامترها برابر با حد وسط بازه تغییراتشان انتخاب شد. تأثیر پارامترهای ورودی بر آسیب‌های زیرسطحی به شرح زیر است.

۳-۱-۱- تغییرات سرعت پیشروی

در مرحله اول از آزمایش‌های تجربی، نمونه‌ها با فشار ۳۰۰ مگاپاسکال، فاصله نوک نازل تا قطعه کار ۱ میلی‌متر، درصد وزنی ذرات ساینده ۳۰٪ و سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه فرزکاری شدند. بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی که در شکل ۴ نشان داده شده است، ملاحظه گردید که هیچ گونه آسیبی به قطعه کار وارد نشده است. در مرحله بعدی پیشروی نازل به ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه کاهش داده شد. این کاهش، میزان برخورد ذرات ساینده به یک نقطه از قطعه کار را نسبت به نمونه قبل تا دو برابر افزایش می‌دهد. این کاهش پیشروی نیز هیچ گونه آسیب زیرسطحی در قطعه کار ایجاد نکرد. در مرحله سوم از آزمایش‌های تجربی میزان سرعت پیشروی به ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه کاهش داده شد که در این مرحله به دلیل افزایش تعداد برخورد ذرات در قطعه کار، ترکی به عمق ۸۴/۸ میکرون به وجود آمده است. علت این امر، اینست که با کاهش سرعت پیشروی نازل، میزان برخورد ذرات ساینده بیشتر می‌شود؛ به عبارتی، تعداد ذرات ساینده‌ای افزایش می‌یابد که در واحد زمان به قطعه کار برخورد می‌کنند، در نتیجه به واسطه افزایش نیروی برخورد ذرات ساینده، احتمال ایجاد ترک نیز بیشتر می‌شود. تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به این نمونه که از پیشانی قطعه کار گرفته شده است، در شکل ۴ نشان داده شده است.

میکروسکوپ استفاده شده برای آنالیز نتایج به دست آمده، میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت کشور هلند (شرکت فنوم^۱)، مدل پرو ایکس^۲ است که محدوده بزرگ-نمایی این دستگاه تا ۱۳۰۰۰۰ برابر و تفکیک‌پذیری^۳ تصاویر معادل ۱۴ نانومتر است. امکان به کارگیری ولتاژهای افزایشی چندگانه ۱۵ kV، ۱۰ kV، ۵ kV و استفاده از نرم‌افزار قدرتمند برای تعیین پراکندگی عناصر داخل نمونه از سایر ویژگی‌های این دستگاه است.

پارامترهای ورودی فرآیند و بازه تغییراتشان در جدول ۲ خلاصه شده است.

مقادیر این پارامترها با مطالعه مقالات مشابه، انجام آزمایش‌های اولیه و همینطور محدودیت‌های دستگاه واتر جت انتخاب گردید. به عنوان مثال فقط دو فشار ۱۵۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال روی دستگاه واتر جت قابل اعمال بود؛ همچنین با انجام تست‌های اولیه مشخص گردید که به دلیل سختی بیش از حد قطعه کار که از جنس سرامیک آلومینیوم اکسید است، در بسیاری از حالات (به ازاء "مقدار کم فشار جت آب، سرعت بالای پیشروی، درصد وزنی پایین ذرات ساینده و فاصله زیاد نازل")، اصلاً ذرات ساینده قادر به نفوذ موثر داخل قطعه کار نبوده و فرآیند واتر جت قادر به فرزکاری (شیار زنی) در نمونه‌های مورد آزمایش نبود. با در نظر گرفتن موارد فوق، انتخاب پارامترهای ورودی فرآیند و طراحی آزمایش‌های مربوطه صورت پذیرفت.

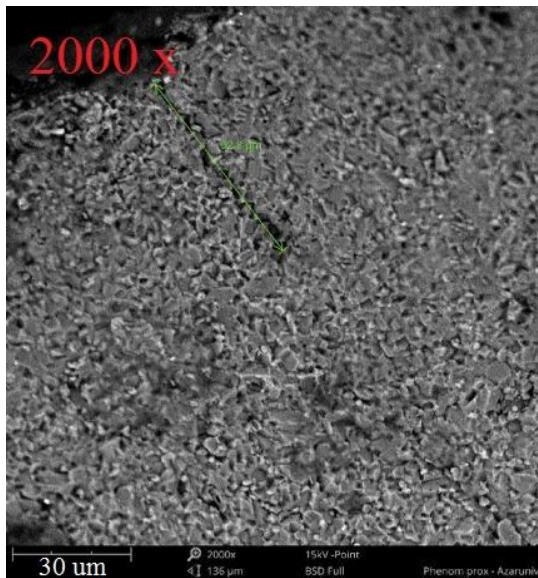
جدول ۲- پارامترهای ورودی فرآیند فرزکاری با جت آب و ساینده

پارامترهای ورودی	محدوده تغییرات
فشار (مگاپاسکال)	۱۵۰ - ۳۰۰
پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	۲۰ - ۴۰
درصد وزنی ذرات ساینده	۳۰ - ۵۰
فاصله نازل تا قطعه کار (میلی‌متر)	۱ - ۱/۵

^۱ Phenom

^۲ Prox

^۳ Resolution

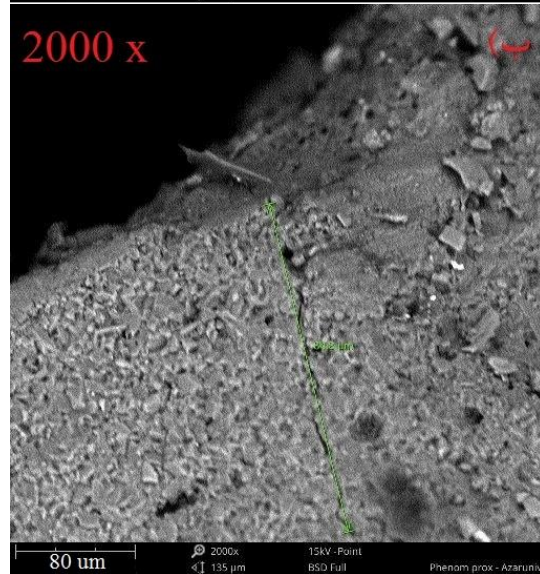
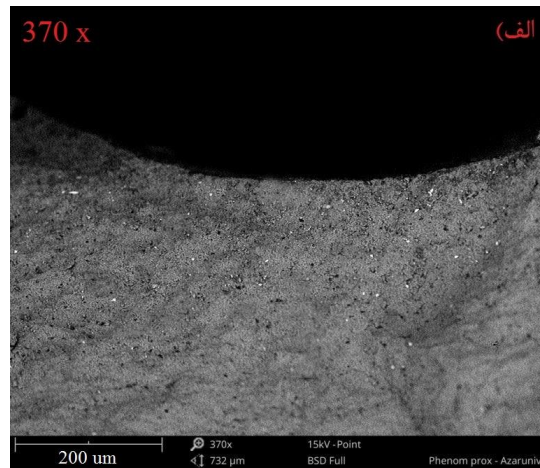


شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی از آسیب‌های زیرسطحی به ازای فاصله نازل ۱ میلی‌متر

کار را تا حدی کاهش می‌دهد. این افزایش فاصله باعث شد، هیچ گونه آسیب زیرسطحی در قطعه کار ایجاد نشود. در مرحله بعدی برای اطمینان از تأثیر تغییرات فاصله نازل، پارامتر فوق به ۲ میلی‌متر افزایش داده شد که در این افزایش فاصله نیز بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی، قطعه کار دچار هیچ گونه آسیبی نشده است؛ لذا با افزایش فاصله نازل از سطح قطعه کار، به دلیل کاهش سرعت جت آب، شدت برخورد ذرات و در نتیجه نیروی عمودی وارده کمتر شده و به تناسب آن، عمق نفوذ ذرات ساینده نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه احتمال ایجاد ترک نیز کمتر می‌شود.

۳-۱-۳- تغییرات درصد ساینده

به منظور بررسی تأثیر درصد وزنی ذرات ساینده، قطعه نمونه در فشار ۳۰۰ مگاپاسکال، پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه، فاصله نوک نازل از سطح قطعه کار ۱ میلی‌متر و درصد ساینده ۳۰٪ ماشینکاری شد. عکس‌برداری الکترونی روبشی نشان داد که در این نمونه هیچ گونه آسیبی وجود ندارد. در مراحل بعدی درصد ساینده به ۴۰٪ و ۵۰٪ افزایش یافت. بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشخص گردید که در حالت ۴۰٪ هیچ آسیبی به قطعه کار وارد نشد، ولی در حالت ۵۰٪ به دلیل افزایش عمق ماشینکاری، ترکی با عمق ۱۱۲



شکل ۴- تأثیر سرعت پیشروی بر آسیب‌های زیرسطحی؛

الف) سرعت پیشروی، ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و

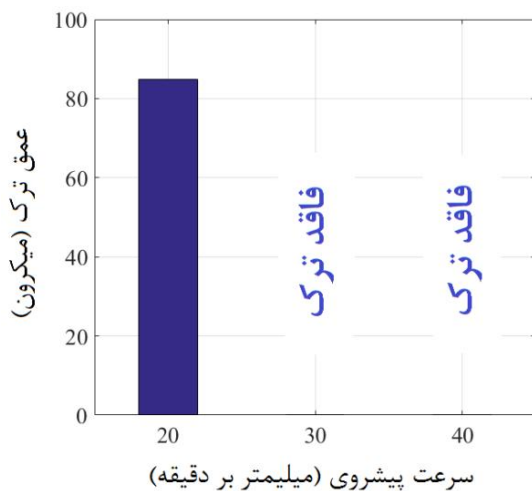
ب) سرعت پیشروی، ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه

۳-۱-۳- تغییرات فاصله نازل تا قطعه کار

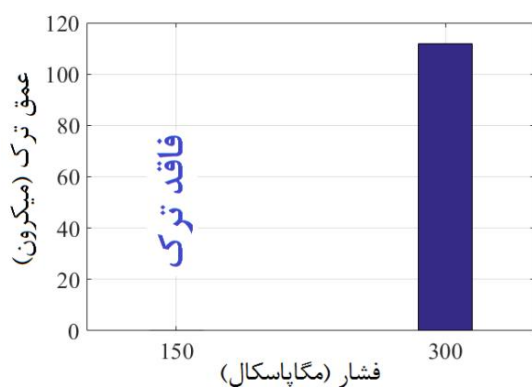
در این مرحله، نمونه‌ها با فشار ۳۰۰ مگاپاسکال، پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و درصد ساینده ۳۰٪ فرزکاری شدند. در مرحله اول، فاصله نازل از قطعه کار برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی که در شکل ۵ نشان داده شده است، مشاهده گردید که قطعه دچار ترک‌خوردگی به عمق ۵۲/۸ میکرون شده است. در مرحله بعدی فاصله نازل از سطح قطعه کار به ۱/۵ میلی‌متر افزایش داده شد. این افزایش، سرعت برخورد ذرات ساینده به قطعه

سطح قطعات فرزکاری شده شامل، آسیب‌های زیرسطحی است. خلاصه تأثیر پارامترهای ورودی بر آسیب‌های زیرسطحی در فرآیند فرزکاری با جت آب و ساینده روی نمونه‌های سرامیک آلومینیوم اکسید در شکل‌های ۷ تا ۹ و جدول ۳ نوشته شده است.

به منظور بررسی کمی تأثیر پارامترهای ورودی بر عمق آسیب‌های زیرسطحی، تحلیل آماری توسط نرم‌افزار Design Expert صورت پذیرفت. بر اساس نتایج به دست آمده

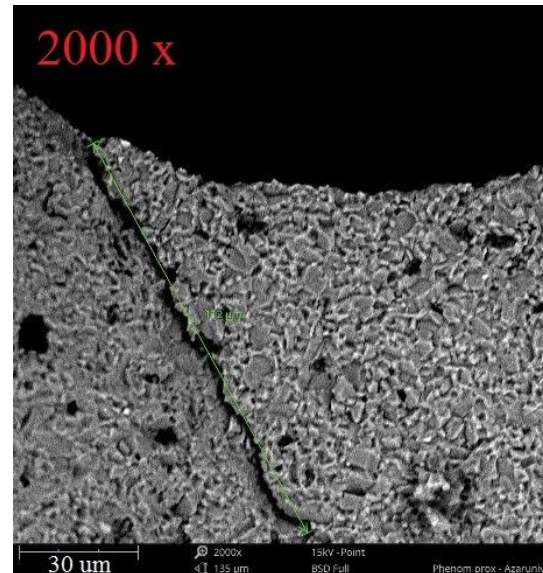


شکل ۷- تأثیر سرعت پیشروی بر عمق ترک‌های زیرسطحی (فاصله نازل = ۱/۵ میلی‌متر، درصد وزنی ساینده = ۴۰٪ و فشار = ۳۰۰ مگاپاسکال)



شکل ۸- تأثیر فشار بر عمق ترک‌های زیرسطحی (سرعت پیشروی = ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، درصد وزنی ساینده = ۵۰٪ و فاصله نازل = ۱/۵ میلی‌متر)

میکرون در قطعه نمونه ایجاد گردید که در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. هر چه قدر که درصد وزنی ذرات ساینده بیشتر می‌شود، نیروی کل وارده به سطح قطعه کار به واسطه افزایش تعداد برخوردها افزایش می‌یابد، در نتیجه احتمال ایجاد ترک نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی از آسیب‌های زیرسطحی به ازای درصد وزنی ساینده ۵۰٪

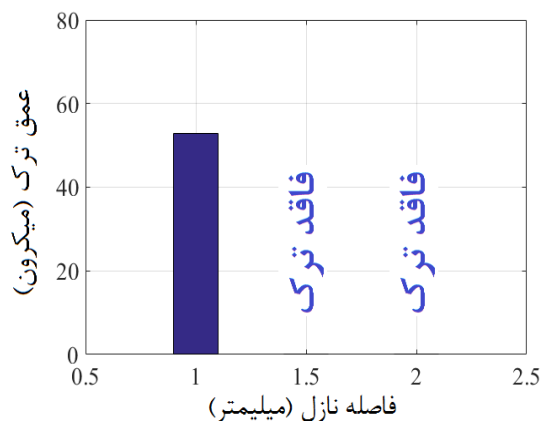
۳-۱-۴- تغییرات فشار

به منظور بررسی تأثیر فشار، آزمایش‌های تجربی به ازای مقادیر فشار جت آب ۱۵۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال، سرعت پیشروی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، فاصله نازل ۱/۵ میلی‌متر و درصد وزنی ذرات ساینده ۴۰٪ انجام پذیرفت. در حالت فشار ۱۵۰ مگاپاسکال هیچ نوع آسیب زیرسطحی مشاهده نگردید. به منظور اطمینان بیشتر از تأثیر فشار، آزمایش‌های تجربی بیشتری به ازای حالت بحرانی سایر پارامترها (بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های قبلی) صورت پذیرفت. در این مرحله مقدار سرعت پیشروی برابر ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه، فاصله نازل تا سطح قطعه کار برابر ۱ میلی‌متر و درصد وزنی ذرات ساینده برابر ۵۰٪ انتخاب شد. در این حالت نیز مشاهده گردید که به ازاء فشار ۱۵۰ مگاپاسکال، هیچ آسیب زیرسطحی در نمونه سرامیکی ایجاد نمی‌شود؛ ولی به ازاء فشار ۳۰۰ مگاپاسکال که در بندهای قبلی توضیح داده شد،

جدول ۳- تأثیر پارامترهای ورودی بر آسیب‌های زیرسطحی

شماره نمونه	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	فاصله نازل (میلی‌متر)	درصد وزنی ساینده	فشار (مگاپاسکال)	عمق ترک زیرسطحی (میکرون)
۱	۴۰	۱/۵	۴۰	۳۰۰	-
۲	۳۰	۱/۵	۴۰	۳۰۰	-
۳	۲۰	۱/۵	۴۰	۳۰۰	۸۴/۸
۴	۳۰	۱	۴۰	۳۰۰	۵۲/۸
۵	۳۰	۲	۴۰	۳۰۰	-
۶	۳۰	۱/۵	۳۰	۳۰۰	-
۷	۳۰	۱/۵	۵۰	۳۰۰	۱۱۲
۸	۳۰	۱/۵	۴۰	۱۵۰	-
۹	۲۰	۱	۵۰	۱۵۰	-

واریانس در جدول ۴ خلاصه شده است. در این جدول، مقادیر P-value و F-value، میزان اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی را بر روی عمق ترک‌ها نشان می‌دهد. پارامتر R-Square نیز میزان تطابق بین پیش‌بینی مدل آماری را با نتایج تجربی نشان می‌دهد که در این تحقیق مقدار آن برابر ۰/۸۶۳۴ است. با توجه به مقادیر P-value و F-value، پارامترهای فشار جت آب، درصد وزنی ذرات ساینده، سرعت پیشروی و فاصله نازل به ترتیب مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عمق آسیب‌های زیرسطحی می‌باشند. درصد تأثیرگذاری و مشارکت^۲ این پارامترها نیز به طور کمی توسط مقادیر مجموع مربعات^۳ صورت پذیرفت که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، بیشترین درصد تأثیرگذاری، مربوط به پارامتر فشار جت آب است که برابر ۵۴/۳۷٪ است. درصد تأثیرگذاری پارامترهای درصد وزنی ذرات ساینده، سرعت پیشروی و فاصله نازل نیز به ترتیب برابر ۳۱/۱۵٪، ۱۲/۹۱٪ و ۱/۵۷٪ است.



شکل ۹- تأثیر فاصله نازل بر عمق ترک‌های زیرسطحی (سرعت پیشروی = ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، درصد وزنی ساینده = ۴۰٪ و فشار = ۳۰۰ مگاپاسکال)

از آنالیز واریانس^۱، مشخص گردید که مدل خطی بهترین مدل برازش برای پیش‌بینی رفتار عمق ترک‌ها برحسب پارامترهای ورودی است. نتایج حاصل از تحلیل آماری آنالیز

^۲ Contribution Percentage

^۳ Sum of Squares

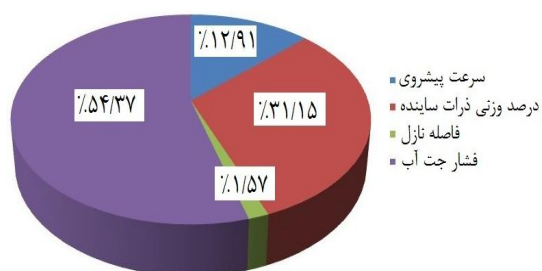
^۱ Analysis of Variance (ANOVA)

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس برای تحلیل عمق ترک‌های زیرسطحی

پارامتر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-Value	P-value
مدل	۸۷۸۹/۲۱	۴	۲۱۹۷/۳۰	۱/۲۹	۰/۰۴۰۵
سرعت پیشروی	۱۴۰۸/۷۶	۱	۱۴۰۸/۷۶	۰/۸۳	۰/۰۴۱۴
درصد وزنی ساینده	۳۳۹۹/۸۰	۱	۳۳۹۹/۸۰	۲/۰	۰/۰۲۳۰
فاصله نازل	۱۷۱/۴۳	۱	۱۷۱/۴۳	۰/۱	۰/۰۷۶۷
فشار جت آب	۵۹۳۳/۳۵	۱	۵۹۳۳/۳۵	۳/۴۸	۰/۰۱۳۵

R-Squared = ۰/۸۶۳۴

ای از ناهمواری‌های سطحی و حضور میکرو چاله‌ها^۱ است. این میکرو چاله‌ها و ناهمواری‌های سطحی نشان می‌دهد که فرآیند براده‌برداری با ایجاد میکرو ترک‌ها و وقوع پدیده میکرو شکست انجام شده است. در مکانیزم میکرو شکست، در ناحیه زیر عمق نفوذ ذرات ساینده، میکرو ترک‌هایی تشکیل می‌شود که با رشد به سمت سطح بالای قطعه منجر به باربرداری می‌شوند [۲۰]. در حالی که برای مواد داکتیل، بر اساس نتایج حاصل از سایر محققان [۲۱]، سطح ماشینکاری شده شامل، یک سری رگه‌های برشی است که بیانگر انجام عملیات براده‌برداری توسط تغییر شکل پلاستیک و مکانیزم میکرو برش است که در نمونه‌های سرامیکی به دلیل تردی بالا، این مکانیزم مشاهده نشد. البته مواد ترد نیز تحت تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری بالا و شرایط ماشینکاری کنترل شده، رفتار پلاستیک از خود نشان می‌دهند (به میزان جزئی)؛ که از این خاصیت در برخی از فرآیندهای ماشینکاری از قبیل پرداخت کاری با ذرات ساینده مغناطیسی و پولیشکاری برای باربرداری این مواد در مقیاس نانو استفاده می‌شود که در چنین حالتی میزان آسیب‌های زیرسطحی به کمترین مقدار خود می‌رسد و باربرداری از طریق مکانیزم میکرو برش صورت می‌پذیرد [۲۲، ۲۳]. یکی از اهداف این تحقیق نیز، بررسی این نکته بود که آیا از این خاصیت مواد ترد (وجود رفتار پلاستیک در شرایط خاص



شکل ۱۰- درصد تأثیرگذاری پارامترهای ورودی بر عمق آسیب‌های زیرسطحی

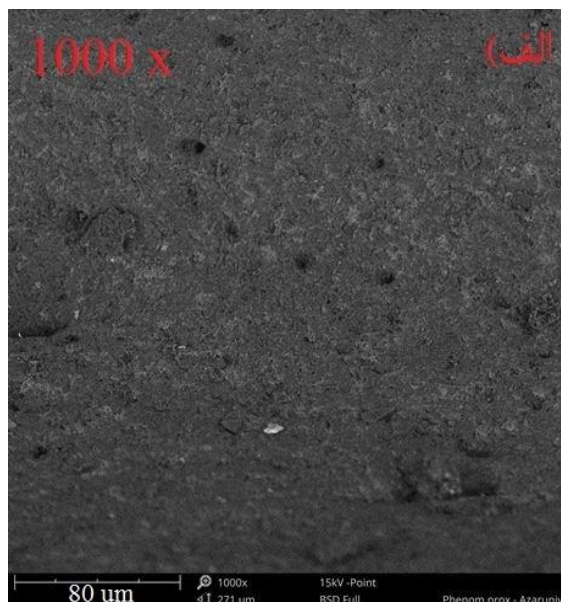
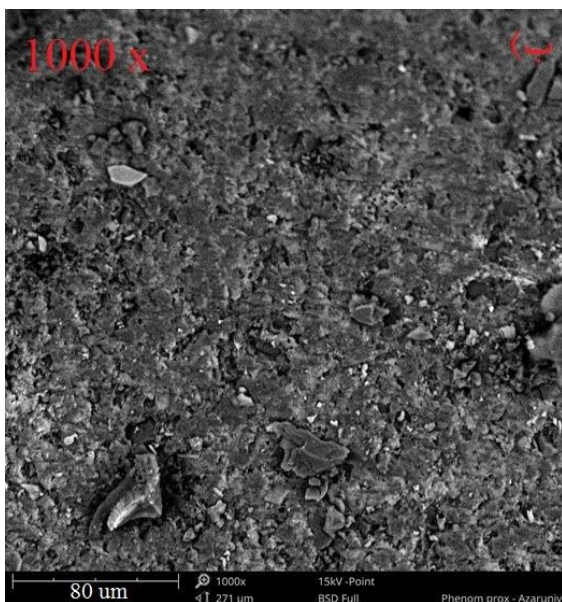
۳-۲- بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر مکانیزم باربرداری

برای تعیین مکانیزم‌های براده‌برداری سرامیک آلومینیوم اکسید توسط فرآیند فرزکاری با جت آب و ساینده، عکس-برداری از نمای داخلی کانال و سطح بالایی آن انجام شد تا ناهمواری‌ها و سطح زیر جت آب به طور کامل مشخص باشد. بدین منظور روی سرامیک‌های آلومینیوم اکسید، کانال‌هایی ایجاد شد تا تأثیر پارامترهای ورودی بر مکانیزم ماشینکاری بررسی شود. تأثیر فشار جت آب بر مکانیزم‌های باربرداری در شکل ۱۱، تأثیر سرعت پیشروی در شکل ۱۲، تأثیر درصد وزنی ذرات ساینده در شکل ۱۳ و تأثیر فاصله نازل تا سطح قطعه کار در شکل ۱۴ به تصویر کشیده شده است. عکس-های میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از تمام حالات فوق نشان می‌دهد که سطح حاصل از ماشینکاری شامل مجموعه-

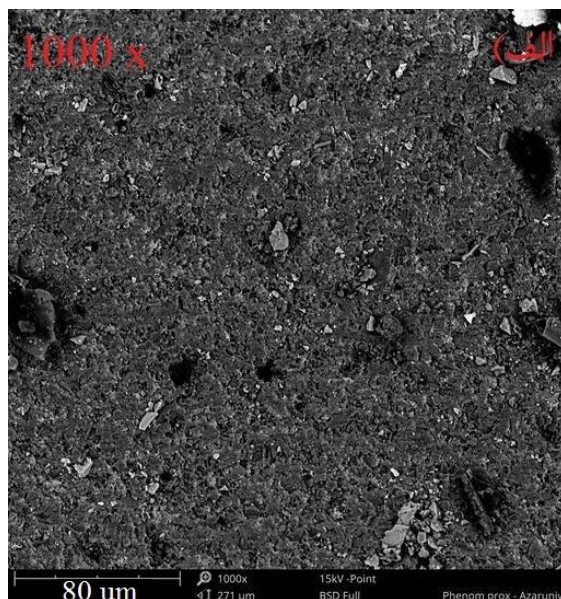
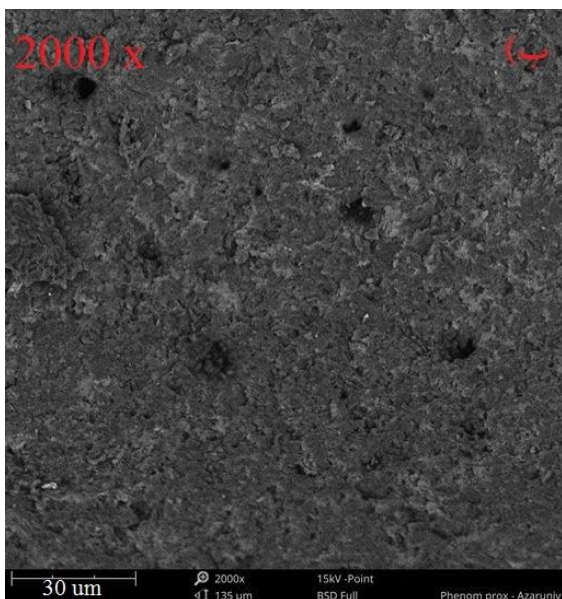
^۱ Crater

درصد وزنی پایین ذرات ساینده و فاصله زیاد نازل " صورت پذیرفت تا بررسی شود، در صورت عمق نفوذ کم ذرات ساینده، آیا امکان ماشینکاری داکتیل نمونه‌های سرامیک آلومینیوم اکسید وجود دارد که ملاحظه گردید، اصلاً ذرات ساینده قادر به نفوذ موثر داخل قطعه کار و شیارزنی نبودند.

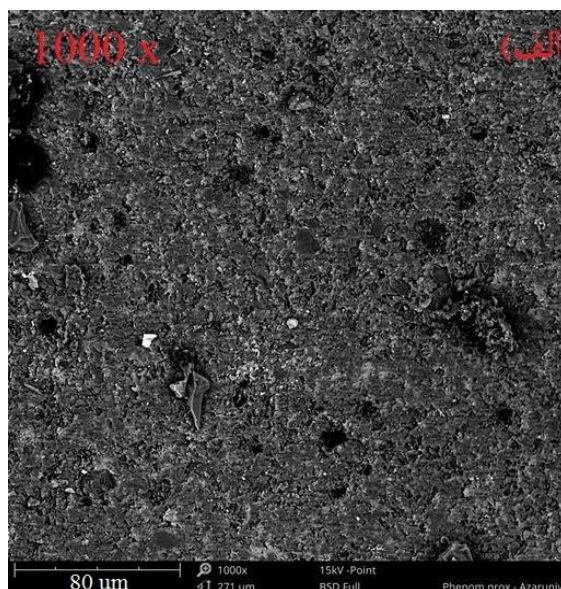
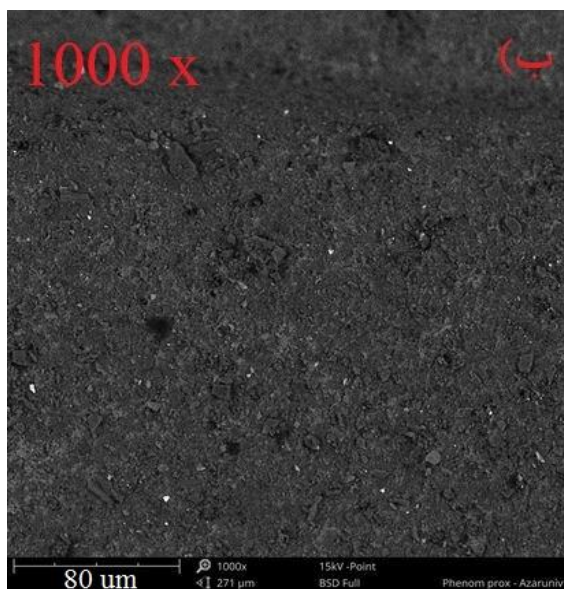
ماشینکاری) می‌توان برای فرزکاری نمونه‌های سرامیک آلومینیوم اکسید توسط مکانیزم میکروبرش در فرآیند واتر جت استفاده نمود یا نه. لذا همانطور که در قسمت ۲ (مواد و روش انجام آزمایش‌ها) اشاره شد، یک سری آزمایش‌های اولیه به ازاء "مقدار کم فشار جت آب، سرعت بالای پیشروی،



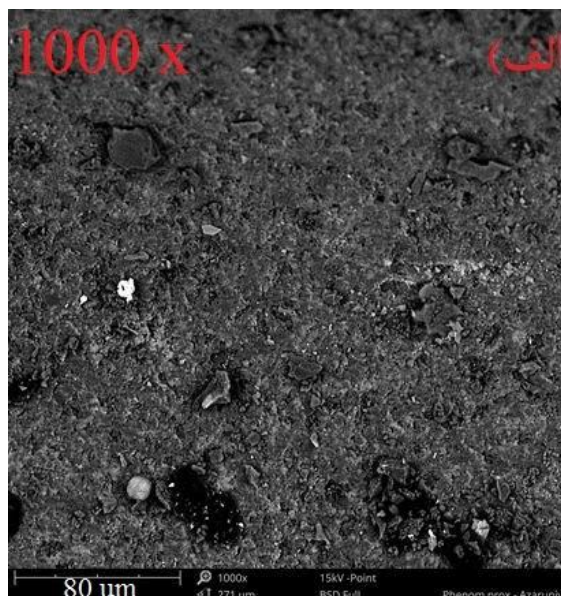
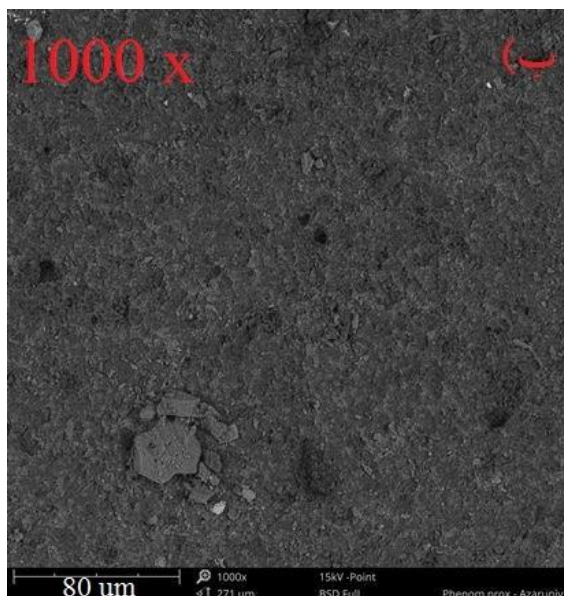
شکل ۱۱- تأثیر فشار بر مکانیزم‌های باربرداری: الف) فشار، ۱۵۰ مگاپاسکال و ب) فشار، ۳۰۰ مگاپاسکال



شکل ۱۲- تأثیر سرعت پیشروی بر مکانیزم‌های باربرداری: الف) سرعت پیشروی، ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و ب) سرعت پیشروی، ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۳- تأثیر سرعت پیشروی بر مکانیزم‌های باربرداری؛ الف) درصد وزنی ساینده، ۵۰٪ و ب) درصد وزنی ساینده، ۳۰٪



شکل ۱۴- تأثیر فاصله نازل تا سطح قطعه کار بر مکانیزم‌های باربرداری؛ الف) فاصله نازل، ۱ میلی‌متر و ب) فاصله نازل، ۲ میلی‌متر

می‌شوند. شایان ذکر است که علیرغم وجود مکانیزم میکرو شکست در تمامی نمونه‌ها، آسیب‌های "زیرسطحی" فقط در برخی از نمونه‌ها مشاهده گردید (طبق جدول ۳)؛ که با افزایش فشار جت آب، کاهش سرعت پیشروی، کاهش فاصله

به ازاء سایر پارامترهای ورودی نیز به دلیل سختی و تردی زیاد نمونه‌ها، مکانیزم غالب براده‌برداری برای تمامی قطعات سرامیکی، میکروشکست بود که در آن، در ناحیه زیر عمق نفوذ ذرات ساینده، میکرو ترک‌هایی تشکیل می‌شود که با رشد به سمت سطح بالای قطعه منجر به براده‌برداری

نازل و افزایش درصد وزنی ذرات ساینده، احتمال تشکیل این ترک‌های زیرسطحی بیشتر می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به مطالعه تجربی فرآیند فرزکاری با جت آب و ساینده روی نمونه‌های ساخته شده از سرامیک آلومینیوم اکسید (آلومینا) پرداخته شد. در این راستا تأثیر پارامترهای ورودی از قبیل، فشار جت آب، سرعت پیشروی، درصد وزنی ذرات ساینده و فاصله نازل از سطح قطعه کار روی آسیب‌های زیرسطحی و مکانیزم‌های باربرداری تحلیل گردید. خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- بر اساس نتایج آزمایش‌های تجربی، مکانیزم باربرداری در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده برای سرامیک آلومینا میکرو شکست است که در این مکانیزم، عملیات باربرداری از طریق ایجاد میکرو ترک‌ها و تشکیل میکرو چاله‌هایی صورت می‌پذیرد که در ناحیه‌ای پایین‌تر از عمق برخورد ذرات ساینده ایجاد می‌شوند.

۵- مراجع

- [۱] مهرور ع، باستی ع، جمالی ع (۱۳۹۶) بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای ماشینکاری الکتروشیمیایی با استفاده از روش روبه پاسخ. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۶۰-۴۹: ۷(۴).
- [۲] موسوی س ح، داودی ب (۱۳۹۶) تأثیرات خنک‌کاری برودتی و روانکاری بر با نانوسیال بر زبری سطح و سایش ابزار در تراشکاری سوپر آلیاژ A286. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۸۵-۷۳: ۷(۴).
- [۳] فاضل ر، جلیلی م، ابوطالبی م (۱۳۹۶) تعیین نواحی پایداری برای ارتعاشات سنگ و قطعه کار در عملیات سنگ‌زنی پلانچ با استفاده از مدل سه بعدی قطعه کار. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۸۲-۶۷: ۷(۳۰).
- [۴] امیرآبادی ح، فورگی نژاد ا، احمدی مجاوری م (۱۳۹۳) برشکاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V با فرآیند جت آب همراه ذرات ساینده و بهینه‌سازی مشخصه‌های هندسه شکاف برش. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۷۲-۶۷: ۱۴(۱۶).
- [۵] امیرآبادی ح، خلیلی ک، فورگی نژاد ا، آشوری ج (۱۳۹۲) مدلسازی برش شیشه با جت آب همراه با ذرات ساینده توسط شبکه عصبی و بهینه‌سازی زبری سطح با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۲۳-۱۳۴: ۱۳(۸).
- [6] Prabhuswamy NR, Srinivas S, Vasli A, Sheshashayan MV, Venkatesh S, Roongta Y (2018) Machinability studies of aluminium 6061 cut by

- velocity impact on ceramics by micro particle. Tribol Lett 64:43.
- [16] Shahverdi H, Zohoor M, Mousavi S (2011) Numerical simulation of abrasive water jet cutting process using the SPH and ALE methods. Int J Adv Des Manuf Tech 5:43-50.
- [17] Feng Y, Jianming W, Feihong L (2012) Numerical simulation of single particle acceleration process by SPH coupled FEM for abrasive waterjet cutting. Int J Adv Manuf Tech 59: 193-200.
- [18] Guo L, Deng S, Yang X (2016) Numerical simulation of abrasive water jet cutting chemical pipeline based on SPH coupled FEM. Chem Engineer Trans 51: 73-78.
- [19] Gudimetal P, Yargadda PKDV (2007) Finite element analysis of the interaction between an AWJ particle and a polycrystalline alumina ceramic. J Achiev Mater Manuf Engineer 23: 7-14.
- [20] Mieszala M, Torrubia PL, Axinte DA, Schwiedrzik JJ, Guo Y, Mischler S, Mischler J, Philippe L (2017) Erosion mechanisms during abrasive waterjet machining: Model microstructures and single particle experiments. J Mater Process Tech 247: 92-102.
- [21] Mardi KB, Dixit AR, Mallick A, Pramanik A, Balloková B, Hvizdos P, Foldyna J, Scucka J, Hlavacek P, Zelenak M (2017) Surface integrity of Mg-based nanocomposite produced by abrasive water jet machining (AWJM). Mater Manuf Process 32(15): 1707-1714.
- [22] Pashmforoush F, Rahimi A (2016) Numerical-experimental study on the mechanisms of material removal during magnetic abrasive finishing of brittle materials using extended finite element method. J Mech Eng Sci 203: 1498-1510.
- [23] Amirabadi H, Shafiei Alavijeh M (2017) Modeling and optimizing lapping process of 440C steel by Neural Network and Multi-objective particle swarm optimization algorithm. Modares Mechanical Engineering 17(8): 201-212.
- abrasive water jet. Mater Today-Proc 5(1): 2865-2870.
- [7] Uhlmann E, Flögel K, Kretzschmar M, Faltin F (2012) Abrasive waterjet turning of high performance materials. Proc CIRP 1: 409-413.
- [8] Kartal F, Yerlikaya Z, Gökkaya H (2017) Effects of machining parameters on surface roughness and macro surface characteristics when the machining of Al-6082 T6 alloy using AWJT. Measurement 95: 216-222.
- [9] Lehocká D, Klichb J, Foldyna J, Hlocha S, Hvizdoš P, Fidesc M, Botkova F, Cáracha J (2016) Surface integrity evaluation of brass CW614N after impact of acoustically excited pulsating water jet. Procedia Engineer 149: 236-244.
- [10] Hejjaji A, Zitoun R, Crouzeix L, Roux SL, Collombet SL (2017) Surface and machining induced damage characterization of abrasive water jet milled carbon/epoxy composite specimens and their impact on tensile behavior. Wear 376: 1356-1364.
- [11] Putz M, Rennau A, Dix M (2018) High precision machining of hybrid layer composites by abrasive waterjet cutting. Proc Manuf 21: 583-590.
- [12] Kumar Srivastava A, Naga A, Dixit AR, Tiwari S, Scucka J, Zelenak M, Hlochd S, Hlavacek P (2017) Surface integrity in tangential turning of hybrid MMC A359/B4C/Al2O3 by abrasive waterjet. J Manuf Process 28: 11-20.
- [13] Liu D, Huang C, Wang J, Zhu H, Yao P, Liu ZW (2014) Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box-Behnken design. Ceram Int 40: 7899-7908.
- [14] Kumara N, Shukla M (2011) Finite element analysis of multi-particle impact on erosion in abrasive waterjet machining of titanium alloy. J Comput Appl Math 236: 4600-4610.
- [15] Liu D, Huang C, Zhu H, Wang J, Yao P (2016) Investigation on material response to ultrahigh