



## Experimental Study of Geometric Tolerances and Surface Roughness in Abrasive Water Jet Machining Process of Hardox 400 Steel

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Pashmforoush F. <sup>\*1</sup> PhD,  
Hassanpour Babajan A. <sup>1</sup> MSc,  
Beyraghi Baranlou R. <sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Pashmforoush F, Hassanpour Babajan A, Beyraghi Baranlou R. Experimental Study of Geometric Tolerances and Surface Roughness in Abrasive Water Jet Machining Process of Hardox 400 Steel. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(4):953-961.

### ABSTRACT

In this study, an abrasive water jet machining process was used to evaluate the machinability of Hardox 400 steel, as one of the most widely used materials in the sheet metal industry. In this regard, surface roughness and geometrical tolerances (flatness, parallelism, and perpendicularity) were considered as the machining outputs, and water jet pressure, the weight percentage of abrasive particles, nozzle gap and feed rate were considered as the process input parameters. Followed by machining tests, the measurement of geometrical tolerances and surface roughness was performed through coordinate measuring machine (CMM) and surface roughness tester, respectively. The obtained results indicate that by the increase of jet pressure, decrease of feed rate, decrease of nozzle gap and increase of abrasives particles weight fraction, the surface quality improves and the geometrical errors reduce. Also, it was observed that the best surface roughness and geometrical tolerances have been obtained in the case of water jet pressure of 300 MPa, the feed rate of 10 mm/min, the abrasive weight percentage of 30% and nozzle gap of 1 mm. By repeating the experimental tests, it was shown that the relative error of the obtained results is less than 10%, which indicates the high repeatability of the results.

**Keywords** Abrasive Water Jet Machining; Surface Roughness; Geometrical Tolerances; Hardox 400 Steel

### CITATION LINKS

[1] Experimental study on abrasive water jet machining of PZT ceramic [2] Optimization of machining parameters in the abrasive waterjet turning of alumina ceramic based on the response surface methodology [3] Abrasive waterjet cutting surfaces of ceramics – an experimental investigation [4] A study of abrasive waterjet cutting of alumina ceramics with controlled nozzle oscillation [5] Performance analysis of abrasive waterjet machining process at low pressure [6] Experimental investigation and analysis of process parameters in abrasive jet machining of Ti-6Al-4V alloy using taguchi method [7] Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis [8] An experimental study of abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V [9] Cutting of Ti-6Al 4V titanium alloy using abrasive water jet and multiobjective optimization of geometry features [10] Investigation on surface roughness in abrasive water-jet machining by response surface method [11] Influence of machining parameters on part geometrical error in abrasive waterjet offset-mode turning [12] Experimental research on the machinability of Hardox steel by abrasive waterjet cutting [13] Investigation of the effect of cutting speed on surface quality in abrasive water jet cutting of 316L stainless steel [14] Experimental control of kerf width taper during abrasive water jet machining [15] A review on the erosion mechanisms in abrasive waterjet micromachining of brittle materials [16] An investigation of abrasive water jet machining on graphite/glass/epoxy composite [17] Cutting capability equation of abrasive suspension jet [18] Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box–Behnken design [19] Multi-performance optimization of abrasive water jet machining of Inconel 617 using WPCA [20] Prediction model of depth of penetration for alumina ceramics turned by abrasive waterjet-finite element method and experimental study [21] Numerical simulation of surface roughness and erosion rate of abrasive jet micro-machined channels

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Maragheh, Maragheh, Iran

#### \*Correspondence

Address: Daneshgah Boulevard, Madar Square, Maragheh University, Maragheh, East Azarbaijan, Iran  
Phone: +98 (41) 37278001  
Fax: +98 (41) 37276060  
f.pashmforoush@maragheh.ac.ir

#### Article History

Received: May 11, 2019  
Accepted: August 03, 2019  
ePublished: April 17, 2020

## مطالعه تجربی تلرانس‌های هندسی و صافی سطح در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده روی فولاد هاردوکس ۴۰۰

فرزاد پشم‌فروش\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

علی حسن‌پورباباجان MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

رامین بیرقی‌بارانلو MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده، قابلیت ماشینکاری فولاد هاردوکس ۴۰۰ به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مواد مورد استفاده در صنعت ورق‌سازی، مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا زبری سطح و تلرانس‌های هندسی (تختی، ترازوی و تعامد) به عنوان خروجی‌های فرآیند و فشار جت آب، درصد وزنی ذرات ساینده، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و سرعت پیشروی نازل نیز به عنوان ورودی‌های فرآیند در نظر گرفته شدند. پس از انجام آزمون‌های ماشینکاری، تلرانس‌های هندسی توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات و زبری سطح توسط دستگاه زبری‌سنج تماسی اندازه‌گیری شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که با افزایش فشار، کاهش سرعت پیشروی، کاهش فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و افزایش درصد وزنی ذرات ساینده، کیفیت سطح بهتر شده و میزان خطاهای هندسی کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته نشان داد که بهترین کیفیت سطح و تلرانس‌های هندسی به‌ازای فشار ۳۰۰ مگاپاسکال، سرعت پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، درصد وزنی ساینده ۳٪ و فاصله نازل ۱ میلی‌متر حاصل شده است. همچنین تکرار آزمون‌های تجربی نشان داد که محدوده خطای نسبی آزمون‌ها در اکثر حالات کمتر از ۱۰٪ بوده که بیانگر تکرارپذیری بالای نتایج به‌دست‌آمده است.

**کلیدواژه‌ها:** ماشینکاری با جت آب و ساینده، زبری سطح، تلرانس‌های هندسی، فولاد هاردوکس ۴۰۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۲

\*نویسنده مسئول: f.pashmforoush@maragheh.ac.ir

### ۱- مقدمه

ماشینکاری با جت آب و ساینده یکی از فرآیندهای پیشرفته ماشینکاری است که کاربرد بسیار زیادی در برشکاری و ماشینکاری طیف وسیعی از مواد از قبیل فولادها، سنگ‌ها، سرامیک‌ها و غیره دارد. در این فرآیند، جت آب پرفشار و جریان ساینده با هم مخلوط شده و پس از عبور از میان یک نازل با قطر کم با سرعت بالا به سطح قطعه‌کار برخورد کرده و از طریق مکانیزم‌های میکروبرش یا میکروشکست، عمل براده‌برداری را انجام می‌دهد. فشارکاری جت آب در حدود ۱۵۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال است که برای تولید جتی با بزرگی سرعت حدود ۹۰۰ متر بر ثانیه کافی است.

فولاد هاردوکس ۴۰۰ یکی از پرکاربردترین مواد مورد استفاده در صنایع مختلف به‌ویژه صنعت ورق‌سازی است. این فولاد دارای

خواص مکانیکی منحصربه‌فردی از قبیل چقرمگی زیاد، سختی و مقاومت سایشی زیاد و قابلیت جوشکاری بالا است. ورق‌های مقاوم به سایش هاردوکس به‌دلیل اجرای دقیق عملیات حرارتی از خواص درونی یکنواخت و همچنین از حداقل میزان تنش پسماند برخوردارند. این ورق‌ها معمولاً حتی پس از برش به قطعات کوچک‌تر، اعم از برش‌کاری سرد یا گرم، کیفیت سطحی خود را از دست نمی‌دهند. با این حال، ماشینکاری این فولاد توسط روش‌های سنتی بسیار دشوار بوده و به‌دلیل سایش زیاد ابزارهای برشی مقرون‌به‌صرفه نیست. لذا استفاده از روش‌های پیشرفته برای ماشینکاری دقیق این ماده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بین، فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده به‌دلیل قابلیت‌های بالا (از قبیل عدم تنش‌های حرارتی، سرعت برشی زیاد، کیفیت سطحی مطلوب لبه‌های ماشینکاری‌شده، سازگاری با محیط زیست و توان مورد نیاز کم) یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای ماشینکاری این فولاد سخت و مقاوم به سایش است. با این حال، این فرآیند دارای معایبی نظیر گران‌بودن سیستم و تجهیزات، تولید سر و صدای زیاد، کوتاه‌بودن عمر نازل به‌علت سایش در اثر مواد ساینده، خطر برگشت (کمانه‌کردن) ذرات ساینده و مسدودشدن تیوپ مخلوط‌کننده است.

**ژانواد** و همکاران، فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده را روی سرامیک پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار دادند. ایشان به بررسی تاثیر فشار آب، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و نرخ پیشروی بر عمق برش و زاویه مخروط‌شدگی قطعات پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که افزایش فشار آب و کاهش نرخ پیشروی و فاصله نازل باعث کاهش زاویه مخروط‌شدگی و افزایش عمق برش می‌شود<sup>[1]</sup>.

**سیلیوان و سوندر** تاثیر پارامترهای ورودی مانند فشار آب، سرعت حرکت نازل، دبی جرمی ذرات ساینده و فاصله نازل تا قطعه‌کار را روی زبری سطح بررسی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که از بین پارامترهای ورودی، فشار آب بیشترین تاثیر را بر زبری سطح دارد. افزایش فشار آب، افزایش دبی ذرات ساینده، کاهش فاصله نازل و کاهش سرعت پیشروی نازل باعث کاهش زبری سطح می‌شود<sup>[2]</sup>. مشابه این تحقیق، توسط یو و همکاران برای فرآیند تراشکاری با جت آب و ساینده صورت پذیرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، افزایش فشار آب و دبی جرمی ذرات ساینده باعث کاهش زبری سطح می‌شود. همچنین با افزایش فشار آب، نرخ باربرداری افزایش می‌یابد ولی با افزایش دبی ذرات ساینده نرخ باربرداری کاهش می‌یابد<sup>[3]</sup>.

**وانگ و سو** به بررسی تاثیر ارتعاش نازل بر پارامترهای خروجی مانند زبری سطح، عمق برش و زاویه مخروط‌شدگی پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که ارتعاش نازل با یک زاویه کوچک می‌تواند عمق برش را تا ۸۲٪ افزایش و زاویه مخروطی شدن را تا ۵۴٪ کاهش دهد. همچنین تحت شرایط بهینه برشی، ارتعاش نازل باعث کاهش قابل توجه زبری سطح می‌شود<sup>[4]</sup>.

افزایش می‌یابد. فشار آب بالا و دبی ساینده پایین شرایط مناسبی را برای رسیدن به زبری سطح مطلوب فراهم می‌سازد [10].

ظهور و همکاران، تاثیر پارامترهای ماشینکاری را بر خطاهای هندسی در تراشکاری میله‌های آلومینیومی انجام دادند. فشار آب، سرعت پیشروی، سرعت چرخش قطعه‌کار، دبی جرمی ساینده و عمق برش به‌عنوان پارامترهای اصلی ماشینکاری در نظر گرفته شدند. ایشان به این نتیجه رسیدند که در میان این پارامترها به‌ترتیب فشار، دبی ذرات ساینده، سرعت پیشروی و عمق برش به‌طور قابل ملاحظه‌ای موثر هستند، در حالی که سرعت چرخشی قطعه‌کار تاثیر زیادی بر خطای هندسی قطعات تراشکاری شده با جت آب و ساینده ندارد. افزایش فشار، کاهش دبی ذرات، کاهش عمق برش و کاهش سرعت پیشروی باعث کاهش خطای هندسی می‌شود [11].

فیلیپ و همکاران، تاثیر سرعت پیشروی و فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار را با استفاده از مدل طراحی فاکتوریل مورد مطالعه تجربی قرار دادند. بر اساس اندازه‌گیری ابعاد و زبری سطح قطعات، تاثیر پارامترها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ایشان به این نتیجه رسیدند که سرعت پیشروی بیشترین تاثیر را بر کیفیت قطعات ماشینکاری شده دارد؛ به این صورت که افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش زمان ماشینکاری می‌شود ولی در مقابل کیفیت سطح را به‌شدت کاهش می‌دهد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که فاصله نازل تا قطعه‌کار بهتر است بین ۱/۵ تا ۲ میلی‌متر باشد [12].

لوشنر و همکاران، تاثیر سرعت برشی را بر زبری سطح فولاد زنگ‌نزن در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده مورد مطالعه قرار دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با کاهش سرعت برش، کیفیت سطح برش به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. بر اساس تصاویر گرفته‌شده از سطح برشکاری شده، مشخص شد که روی سطح برش‌خورده دو ناحیه متمایز وجود دارد که در ناحیه اول هیچ نوع علایم ماشینکاری وجود ندارد. اما در ناحیه دوم علایم ماشینکاری به‌راحتی قابل مشاهده است که عرض این ناحیه و علایم ماشینکاری به‌وجودآمده به سرعت برشی بستگی دارد [13].

با مرور پیشینه تحقیق، مشاهده می‌شود که در اکثر مقالات به بررسی صافی سطح، نرخ باربرداری و زاویه مخروط‌شدگی قطعات پرداخته شده است و مطالعه زیادی بر تیرانس‌های هندسی انجام پذیرفته است. تاکنون تیرانس‌های هندسی حاصل از فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده (به‌ویژه روی فولاد هاردوکس) مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا هدف از این تحقیق، مطالعه تجربی تیرانس‌های هندسی (همراه صافی سطح) در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده بر فولاد هاردوکس ۴۰۰ است. در این راستا تست‌های تجربی مربوطه انجام و تاثیر پارامترهای ورودی از قبیل فشار جت آب، درصد وزنی ذرات ساینده، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و سرعت پیشروی نازل بر زبری سطح و

مورگان و همکاران، فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده را با فشار پایین ۳۴ مگاپاسگال روی فولاد کم‌کربن و آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مطالعه کرده و تاثیر سرعت حرکت نازل را بر صافی سطح، عمق نفوذ و زاویه مخروط‌شدگی مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت حرکت جت، ذرات ساینده زمان کافی را برای نفوذ به قطعه پیدا نمی‌کنند که این امر باعث کاهش عمق نفوذ می‌شود. همچنین افزایش سرعت حرکت نازل باعث افزایش صافی سطح و زاویه مخروط‌شدگی می‌شود [5].

پرسد و همکاران، تاثیر پارامترهای ورودی از قبیل فشار، قطر نازل و فاصله نازل تا قطعه‌کار را بر نرخ باربرداری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که قطر نازل بیشترین تاثیر را بر نرخ باربرداری دارد. فاصله نازل تا قطعه‌کار نیز بیشترین تاثیر را بر دقت مخروطی شدن لبه‌های بیرونی سوراخ ماشینکاری شده دارد [6].

کومانارا و همکاران، زبری سطح حاصل از فرآیند ماشینکاری جت آب و ساینده را روی پلاستیک تقویت‌شده با فیبرکربنی مطالعه کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که کاهش سرعت حرکت نازل، افزایش فشار جت و کاهش فاصله نازل منجر به بهبود صافی سطح می‌شود [7].

لی و وانگ، به بررسی عملیات سوراخکاری و شیارزنی روی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش زمان سوراخکاری و فشار آب باعث افزایش عمق نفوذ و قطر سوراخ می‌شود. در عملیات شیارزنی نیز مشاهده شد که سرعت حرکتی آهسته نازل باعث افزایش عمق شیار می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمق برش هنگام خروج جت آب کمتر از عمق برش در نقطه شروع عملیات است و لبه مخروط‌شدگی در سطح قطعه‌کار نسبت به پایین شیار طویل‌تر است [8].

امیرآبادی و همکاران، به مطالعه تیرانس‌های ابعادی ایجادشده در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساینده روی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V پرداختند. با توجه به نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های صورت‌گرفته، پارامتر نرخ ریزش ذرات ساینده بیشترین تاثیر را بر عرض برش دارد و افزایش آن باعث افزایش پهنای شکاف برش می‌شود. سرعت پیشروی نیز بیشترین تاثیر را بر شیب شکاف برش داشته و افزایش آن باعث افزایش شیب شکاف برش خواهد شد. همچنین مشاهده شد که برای دستیابی به کیفیت مطلوب مشخصه‌های هندسی شکاف برش باید از فشار بالای جت آب و حداکثر فاصله نازل ۲ میلی‌متر استفاده نمود [9].

ناریش‌یابو و موتاکریشنا، تاثیر پارامترهای ورودی از قبیل فشار جت آب، سرعت پیشروی، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و دبی جرمی ذرات ساینده را بر سطح ایجادشده روی آلیاژ برنج ۳۶۰ مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فشار آب و دبی ذرات ساینده بیشترین تاثیر را بر سطح دارند. با افزایش ۲۵ درصدی فشار آب و ۴۰ درصدی دبی ساینده زبری سطح ۳۳٪

کاهش زاویه انحراف جت آب مناسب است. سیستم نازل این دستگاه از نوع تغذیه کناری است که مشخصات هندسی آن در جدول ۳ قابل مشاهده است. پمپ دستگاه توانایی تولید قدرت ۳۷HP و دبی آب ۳/۷ لیتر بر دقیقه را دارد که مناسب برای قطر نازل ۰/۲ الی ۰/۳۳ میلی‌متر است. همچنین این پمپ توانایی تولید ۴۲۰ مگاپاسکال فشار را دارد. نمونه‌ای از مراحل ماشینکاری با جت آب و ساینده در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳) مشخصات هندسی نازل

پارامتر	مقدار (میلی‌متر)
قطر سوراخ دهانه نازل	۰/۲۵
قطر سوراخ نازل	۰/۷۶
طول لوله تمرکز نازل	۲۰۰



شکل ۲) نمونه‌ای از مراحل ماشینکاری با جت آب و ساینده روی فولاد هاردوکس

به‌منظور اندازه‌گیری تolerانس‌های هندسی از ماشین اندازه‌گیری مختصات استفاده شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. از این ماشین در صنعت در اموری که نیاز به دقت بالا یا انجام عملیات خاص مانند اندازه‌گیری هم‌محوری دو سوراخ، توازی و تعامد که ابزارآلات و روش‌های معمولی قادر به انجام آن نیستند، استفاده می‌شود. مشخصات دستگاه اندازه‌گیری مختصات مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۴ خلاصه شده است. به‌منظور اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها نیز از دستگاه زبری‌سنج تماسی تیلور هابسون با پراب کریستالی با دقت اندازه‌گیری انانومتر استفاده شد که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳) دستگاه اندازه‌گیری مختصات

تولرانس‌های هندسی (توازی، تعامد و تختی) مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

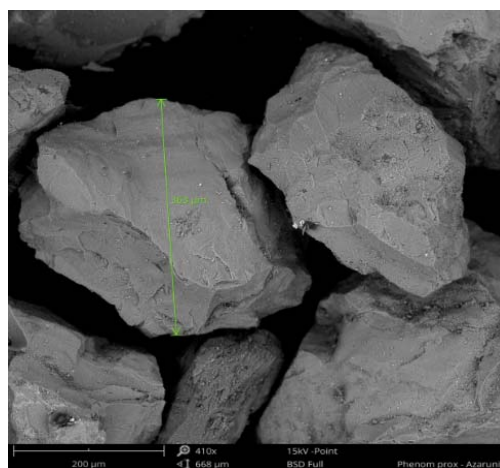
قطعه‌کار استفاده‌شده در تست‌های تجربی بلوک مستطیلی با ابعاد ۱۵×۸۵×۳۰ میلی‌متر از جنس فولاد هاردوکس ۴۰۰ است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ و مشخصات مکانیکی آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. از ویژگی‌های فولاد هاردوکس ۴۰۰، می‌توان به مقاومت سایشی بسیار زیاد، سختی بالا، جوش‌پذیری و مقاومت زیاد در دماهای پایین اشاره کرد. همچنین این فولاد از چقرمگی بالا، استحکام تسلیم و استحکام کششی زیادی برخوردار است. ذرات ساینده استفاده‌شده در این تحقیق از جنس کاربید سیلیسیم با اندازه تقریبی ۳۶۳ میکرون (مش ۸۰) است که تصویر میکروسکوپ الکترونی گرفته‌شده از این ذرات در شکل ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فولاد هاردوکس ۴۰۰

ترکیب	مقدار (%)
کربن	۰/۳ تا ۰/۴
سیلیسیم	۰/۷
منگنز	۱/۶
کروم	۱/۴
مولیبدن	۰/۶
نیکل	۱/۵

جدول ۲) مشخصات مکانیکی فولاد هاردوکس ۴۰۰

پارامتر	مقدار
سختی	۳۷۰ الی ۴۳۰ برینل
استحکام تسلیم	۹۰۰ الی ۱۱۰۰ مگاپاسکال
استحکام کششی	۱۲۵۰ مگاپاسکال



شکل ۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات ساینده کاربید سیلیسیم

دستگاه مورد استفاده در این پژوهش ساخت شرکت Radox است. این دستگاه توانایی تنظیم فاصله نازل تا قطعه‌کار ۳/۰ میلی‌متر را دارد که این مزیت برای ماشینکاری با عمق زیاد و

مدل دستگاه	EV-3020
کورس کاری	۳۰۰±۲۰۰±۲۰۰ (mm)
ابعاد دستگاه	۱۳۵±۷۲±۱۶۵ (cm)
وزن دستگاه	۲۸۰ (kg)
تکرارپذیری	۲ (μm)
حداکثر وزن قابل تحمل میز	۲۵ (kg)
دقت اندازه‌گیری	۰/۱ (μm)



شکل ۴) دستگاه زبری‌سنج تیلور هابسون

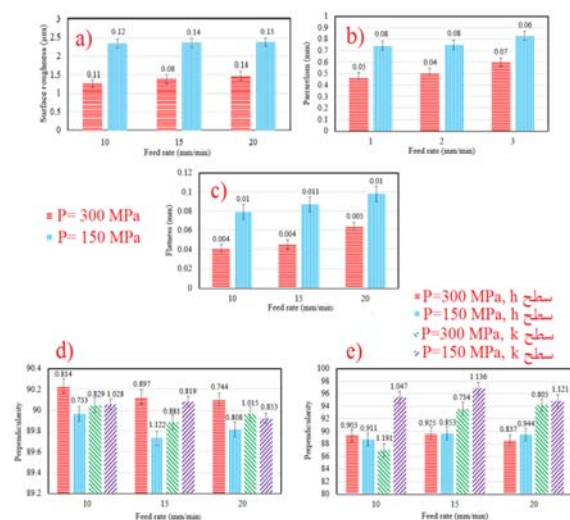
شایان ذکر است که کلیه تست‌های تجربی، ۳ مرتبه تکرار شدند تا قابلیت تکرارپذیری آزمایش‌ها مشخص شود. میزان خطای اندازه‌گیری‌ها توسط نوار خطا در شکل‌های مربوطه مشخص شده است. محدوده خطای نسبی آزمون‌ها در اکثر حالات کمتر از ۱۰٪ است که بیانگر تکرارپذیری بالای نتایج به‌دست‌آمده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌ای که با سرعت پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه ماشین‌کاری شده است، تختی و زبری سطح مطلوب‌تری نسبت به دو نمونه دیگر دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، مقادیر تلرانس‌های توازی، تختی و زبری سطح افزایش می‌یابند.

مرحله دوم از فاز اول تست‌های تجربی با هدف بررسی تاثیر فاصله نازل صورت پذیرفت. در این راستا، فشار آب برابر ۳۰۰ مگاپاسکال، سرعت پیشروی برابر ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه، درصد وزنی ذرات ساینده برابر ۲۵٪ و فاصله نازل از سطح قطعه‌کار برابر ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

خلاصه نتایج حاصل از این مرحله از تست‌های صورت‌گرفته در نمودار ۲ و شکل ۶ نشان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ای که با فاصله نازل با قطعه‌کار ۱ میلی‌متر ماشین‌کاری شده است، توازی، تختی و زبری سطح مطلوب‌تری نسبت به دو نمونه دیگر دارد.

در مرحله سوم از فاز اول تست‌های تجربی، به بررسی تاثیر درصد وزنی ذرات ساینده پرداخته شد. در این راستا، فشار آب برابر ۳۰۰ مگاپاسکال، سرعت پیشروی برابر ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، فاصله نازل از سطح قطعه‌کار برابر ۱ میلی‌متر و درصد وزنی ذرات ساینده برابر ۱۵، ۲۰ و ۳۰٪ در نظر گرفته شد. خلاصه نتایج حاصل از این مرحله از تست‌های صورت‌گرفته در نمودار ۳ و شکل ۷ نشان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ای که با درصد وزنی ساینده ۳۰٪ ماشین‌کاری شده است، توازی، تختی و زبری سطح مطلوب‌تری نسبت به دو نمونه دیگر دارد.



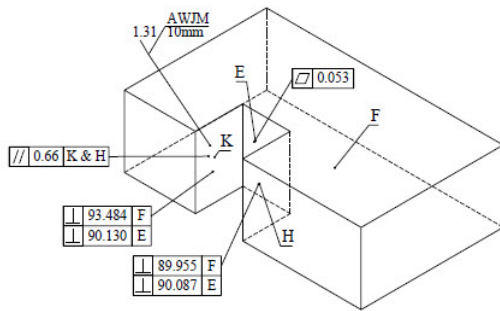
نمودار ۱) تاثیر سرعت پیشروی بر (a) زبری سطح، (b) توازی، (c) تختی، (d) تعامد نسبت به سطح E و (e) تعامد نسبت به سطح F

متغیرهای ورودی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند، شامل فشار جت آب، درصد وزنی ذرات ساینده، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و سرعت پیشروی است. مقادیر این پارامترها با توجه به محدودیت‌های دستگاه و اثرجت و همچنین مطالعه مقالات مشابه [14-22] و انجام تست‌های اولیه انتخاب شد.

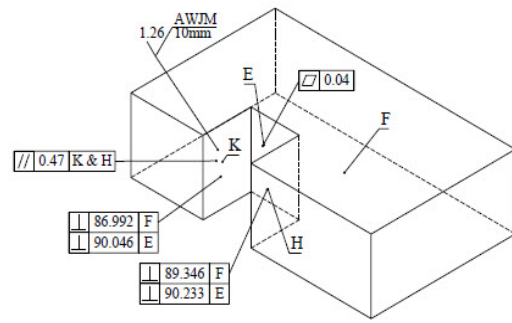
در مورد جنس ذرات ساینده نیز باید اشاره نمود که با انجام تست‌های اولیه توسط ذرات ساینده گارنت و همچنین آلومینیوم اکسید، مشاهده شد که کیفیت سطح قطعات ماشین‌کاری‌شده با این ذرات مطلوب نیست. لذا در این تحقیق از ذرات ساینده کاربیدسیلیسیم استفاده شد تا کارایی این ذرات نیز در ماشین‌کاری با جت آب و ساینده روی فولاد هاردوکس ۴۰۰ مورد ارزیابی قرار گیرد.

### ۳- نتایج

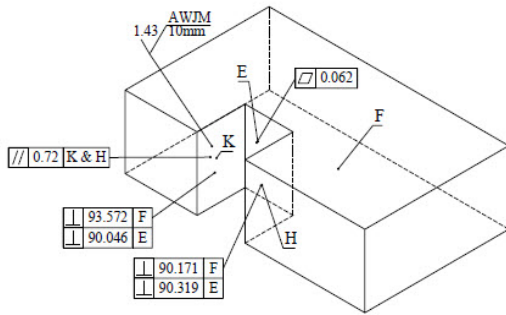
با توجه به اهمیت فشار جت آب، تست‌های تجربی در دو فاز به‌ازای مقادیر مختلف فشار (۳۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال) انجام پذیرفت. مرحله اول این تست‌ها در فشار ۳۰۰ مگاپاسکال و با هدف بررسی تاثیر سرعت پیشروی صورت پذیرفت. در این مرحله، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار برابر ۱ میلی‌متر، درصد وزنی ذرات ساینده برابر ۲۵٪ و سرعت پیشروی به‌ترتیب برابر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. پس از انجام تست‌های ماشین‌کاری، تلرانس‌های هندسی قطعات که شامل توازی، تختی و تعامد است، توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات و زبری سطح توسط دستگاه زبری‌سنج تماسی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از مرحله اول تست‌های تجربی که تاثیر سرعت پیشروی را بر صافی سطح و تلرانس‌های هندسی نشان می‌دهد، در نمودار ۱ به تصویر کشیده شده است. همچنین مقادیر زبری سطح و تلرانس‌های هندسی در سطوح مختلف قطعه‌کار در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.



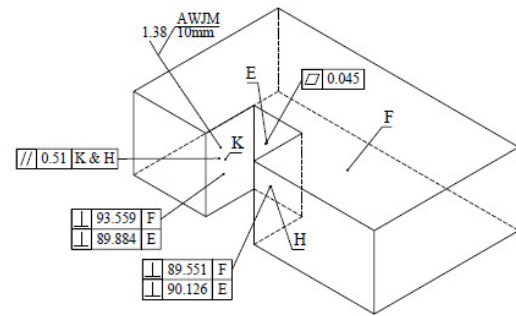
الف



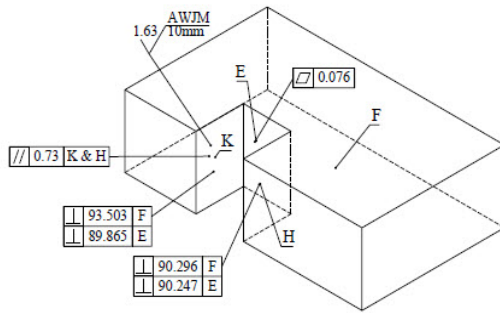
الف



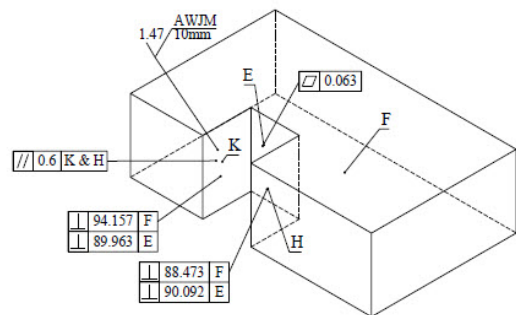
ب



ب



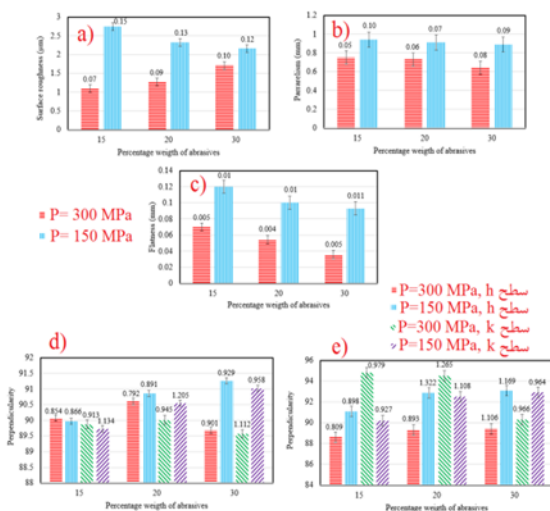
ج



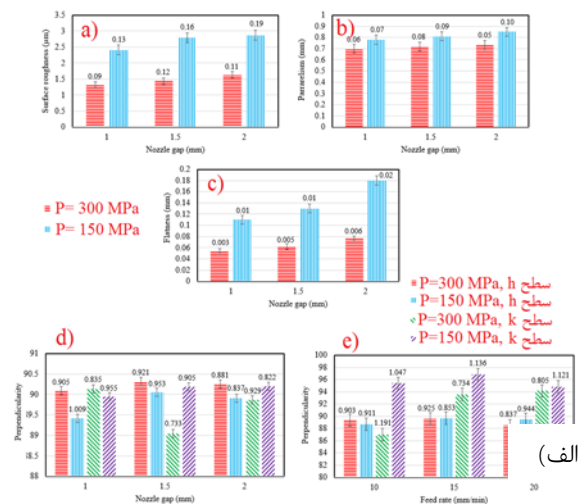
ج

شکل ۶) قطعه کار ماشینکاری شده در فشار ۳۰۰ مگاپاسکال و فاصله نازل ۱ (الف)، ۱/۵ (ب) و ۲ (ج) میلی متر

شکل ۵) قطعه کار ماشینکاری شده در فشار ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت پیشروی ۱۰ (الف)، ۱۵ (ب) و ۲۵ (ج) میلی متر بر دقیقه



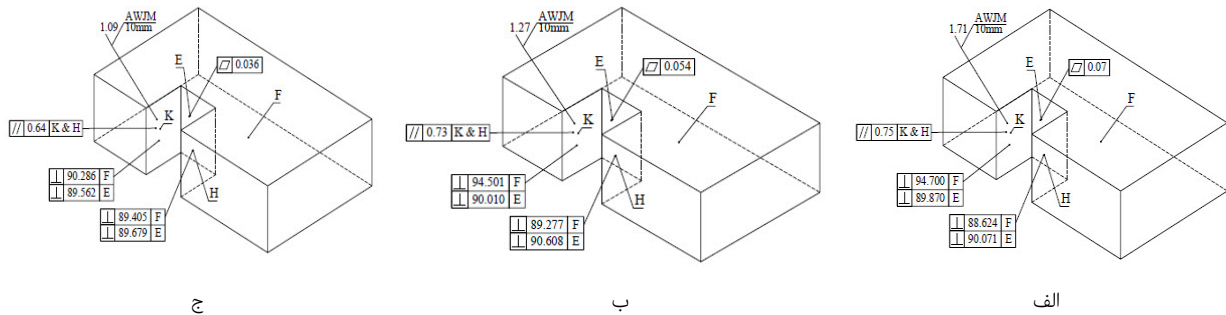
نمودار ۳) تاثیر درصد وزنی ذرات ساینده بر (a) زبری سطح، (b) تواری، (c) تختی، (d) تعامد نسبت به سطح E و (e) تعامد نسبت به سطح F



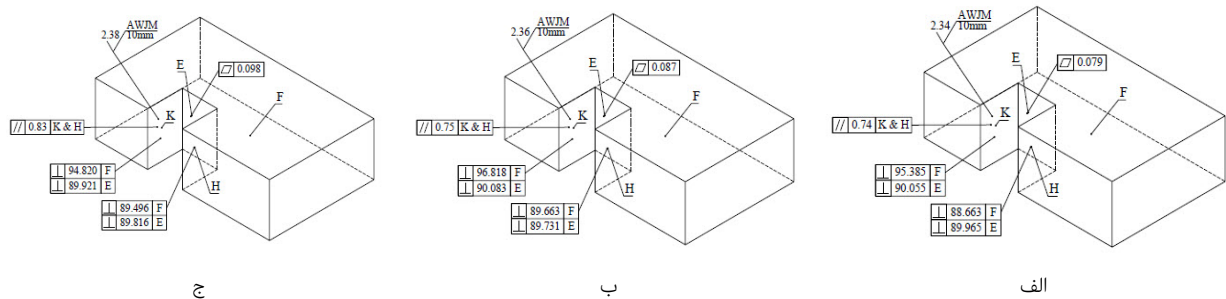
نمودار ۲) تاثیر فاصله نازل بر (a) زبری سطح، (b) تواری، (c) تختی، (d) تعامد نسبت به سطح E و (e) تعامد نسبت به سطح F

پرداخته شد. خلاصه نتایج به دست آمده از فاز دوم تست‌های ماشین‌کاری در نمودارهای ۱ تا ۳ قابل مشاهده است. همچنین مقادیر زبری سطح و ترانس‌های هندسی در سطوح مختلف قطعه‌کار در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به تصویر کشیده شده است.

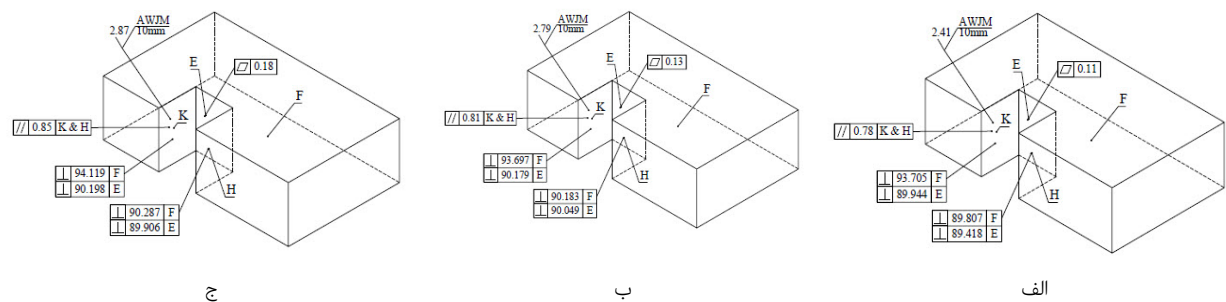
فاز دوم از تست‌های تجربی مشابه فاز اول و به‌ازای فشار ۱۵۰ مگاپاسکال انجام پذیرفت؛ در مرحله اول به بررسی تاثیر سرعت پیشروی، در مرحله دوم به بررسی تاثیر درصد وزنی ذرات ساینده و در مرحله سوم به بررسی تاثیر فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار



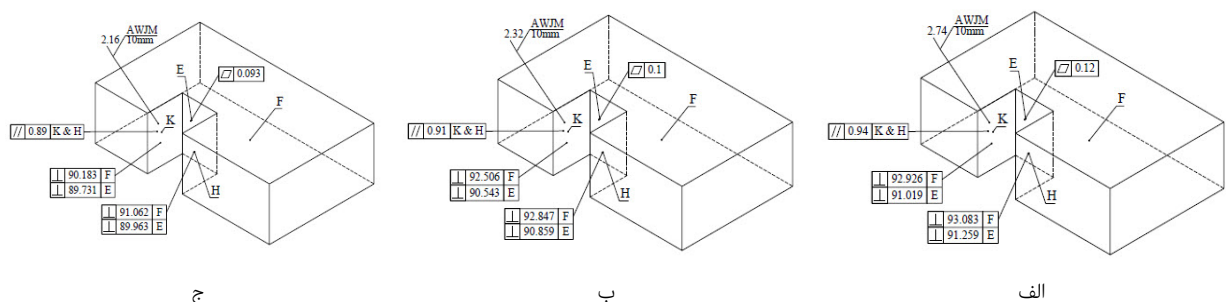
شکل ۷) قطعه‌کار ماشین‌کاری شده در فشار ۳۰۰ مگاپاسکال و درصد وزنی ذرات ساینده ۱۰ (الف)، ۲۰ (ب) و ۳۰ (ج)



شکل ۸) قطعه‌کار ماشین‌کاری شده در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال و سرعت پیشروی ۱۰ (الف)، ۱۰ (ب) و ۲۰ (ج) میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۹) قطعه‌کار ماشین‌کاری شده در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال و فاصله نازل ۱ (الف)، ۱/۵ (ب) و ۲ (ج) میلی‌متر



شکل ۱۰) قطعه‌کار ماشین‌کاری شده در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال و درصد وزنی ذرات ساینده ۱۰ (الف)، ۲۰ (ب) و ۳۰ (ج)

- کاهش فشار جت آب منجر به کاهش انرژی و سرعت ذرات ساییده می‌شود و اثربخشی و قدرت باربرداری ذرات ساییده را کمتر می‌کند. لذا ذرات ساییده نمی‌توانند به‌طور موثری ناهمواری‌های سطح قطعه‌کار را حذف کنند و در نتیجه کیفیت سطح مطلوبی حاصل نمی‌شود.

- با افزایش سرعت پیشروی، دفعات برخورد ذرات ساییده به قطعه‌کار در واحد زمان کمتر شده و نرخ باربرداری کمتر می‌شود. به‌عبارتی اثر بخشی ذرات ساییده کمتر می‌شود و ذرات ساییده قادر به حذف موثر ناهمواری‌های سطح نمی‌شود.

- با کاهش درصد وزنی ذرات ساییده تترانس‌های هندسی و زبری سطح افزایش می‌یابند؛ زیرا با کاهش درصد وزنی ذرات ساییده، نرخ باربرداری کاهش می‌یابد؛ چرا که عامل اصلی برداشت ماده در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساییده، ذرات ساییده هستند که با کاهش درصد وزنی ذرات، تعداد و شدت برخوردها به سطح قطعه‌کار کمتر می‌شود و ناهمواری‌های سطح به‌طور موثر برداشته نمی‌شود.

- افزایش فاصله نازل تا قطعه‌کار باعث پراکنده شدن مقداری از ذرات ساییده در محل ماشینکاری می‌شود. همچنین با افزایش فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار، شدت و سرعت برخورد ذرات ساییده کمتر شده و قدرت باربرداری ذرات کمتر می‌شود. در نتیجه بهبود قابل توجهی در کیفیت سطح قطعه‌کار ایجاد نمی‌شود.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** فرزاد پشم‌فروش (نویسنده اول)، روش‌شناس/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ علی حسن‌پورباباجان (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ رامین بیرقی‌بارانلو (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪)

**منابع مالی:** منابع مالی توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

#### منابع

- 1- Dhanawade A, Upadhyai R, Rouniyar A, Kumar S. Experimental study on abrasive water jet machining of PZT ceramic. Journal of Physics: Conference Series. 2017;870:012019.
- 2- Yue Z, Huang C, Zhu H, Wang J, Yao P, Liu ZW. Optimization of machining parameters in the abrasive waterjet turning of alumina ceramic based on the response surface methodology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014;71:2107-2114.

با بررسی نتایج مربوط به تاثیر پیشروی (نمودار ۱ و شکل ۵)، مشخص می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، مقادیر تترانس‌های توازی، تختی و زبری سطح افزایش می‌یابند. علت این امر این است که با افزایش سرعت پیشروی، دفعات برخورد ذرات ساییده به قطعه‌کار در واحد زمان کمتر شده و نرخ باربرداری کمتر می‌شود. به‌عبارتی، اثربخشی ذرات ساییده کمتر می‌شود و ذرات ساییده قادر به حذف موثر ناهمواری‌های سطح نمی‌شوند. لذا در سرعت‌های پیشروی بالا، کیفیت سطح مطلوبی به‌دست نمی‌آید. همچنین بر اساس نتایج نشان‌داده‌شده در نمودار ۲ و شکل ۶، ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله نازل تا قطعه‌کار تترانس‌های توازی، تختی و زبری سطح افزایش می‌یابند؛ علت این امر این است که افزایش فاصله نازل تا قطعه‌کار باعث پراکنده شدن مقداری از ذرات ساییده در محل ماشینکاری می‌شود. همچنین با افزایش فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار، شدت و سرعت برخورد ذرات ساییده کمتر شده و قدرت باربرداری ذرات کمتر می‌شود؛ در نتیجه بهبود قابل توجهی در کیفیت سطح قطعه‌کار ایجاد نمی‌شود. در مورد تاثیر درصد وزنی ذرات ساییده نیز می‌توان گفت که با کاهش مقدار درصد وزنی ذرات ساییده، تترانس‌های توازی، تختی و زبری سطح افزایش می‌یابند (نمودار ۳ و شکل ۷). علت این امر این است که با کاهش درصد وزنی ذرات ساییده، نرخ باربرداری کاهش می‌یابد؛ زیرا عامل اصلی برداشت ماده در فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساییده، ذرات ساییده هستند که با کاهش درصد وزنی ذرات، تعداد و شدت برخوردها به سطح قطعه‌کار کمتر می‌شود و ناهمواری‌های سطح به‌طور موثر برداشته نمی‌شود. با مقایسه نتایج حاصل از فازهای اول و دوم تست‌های تجربی نیز ملاحظه می‌شود که در تمامی حالات، با کاهش فشار جت آب، مقادیر زبری سطح و تترانس‌های هندسی بیشتر می‌شود؛ زیرا کاهش فشار آب منجر به کاهش انرژی و سرعت ذرات ساییده می‌شود و اثر بخشی و قدرت باربرداری ذرات ساییده را کمتر می‌کند. لذا ذرات ساییده نمی‌توانند به‌طور موثری ناهمواری‌های سطح قطعه‌کار را حذف کنند و در نتیجه کیفیت سطح مطلوبی حاصل نمی‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی فرآیند ماشینکاری با جت آب و ساییده بر فولاد هاردوکس ۴۰۰ پرداخته شد. در این راستا، صافی سطح و تترانس‌های هندسی (تختی، توازی و تعامد) به‌عنوان خروجی‌های فرآیند و پارامترهای فشار جت آب، سرعت پیشروی، فاصله نازل تا سطح قطعه و درصد وزنی ذرات ساییده، به‌عنوان ورودی‌های فرآیند در نظر گرفته شدند. پس از انجام تست‌های ماشینکاری، تترانس‌های هندسی توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات و زبری سطح توسط دستگاه زبری‌سنج تماسی اندازه‌گیری شد. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:



- abrasive waterjet cutting. MATEC Web Conferences. 2017;94:1-8.
- 13- Löschner P, Jarosz K, Niesłony P. Investigation of the effect of cutting speed on surface quality in abrasive water jet cutting of 316L stainless steel. *Procedia Engineering*. 2016;149:276-282.
- 14- Sunkara JK, Charan Teja P, Eshwariaha B, Harshvardhan Reddy K. Experimental control of kerf width taper during abrasive water jet machining. *FME Transactions*. 2019;47:585-590.
- 15- Nguyen T, Wang J. A review on the erosion mechanisms in abrasive waterjet micromachining of brittle materials. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2019;1:012006.
- 16- Doreswamy D, Shivamurthy B, Anjaiah D, Sharma NY. An investigation of abrasive water jet machining on graphite/glass/epoxy composite. *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2015;2015:Article ID 627218.
- 17- Jiang S, Xia Y, Popescu R, Mihai C, Tan K. Cutting capability equation of abrasive suspension jet. *WJTA American Waterjet Conference*. Unknown Date, Unknown Location. Unknown Publisher; 2005.
- 18- Liu D, Huang C, Wang J, Zhu H, Yao P, Liu ZW. Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box-Behnken design. *Ceramics International*. 2014;40(6):7899-7908.
- 19- Nair A, Kumanan S. Multi-performance optimization of abrasive water jet machining of Inconel 617 using WPCA. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017;32(6):693-699.
- 20- Liu D, Zhu H, Huang C, Wang J, Yao P. Prediction model of depth of penetration for alumina ceramics turned by abrasive waterjet-finite element method and experimental study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87:2673-2682.
- 21- Haj Mohammad Jafar R, Spelt JK, Papini M. Numerical simulation of surface roughness and erosion rate of abrasive jet micro-machined channels. *Wear*. 2013;303(1-2):302-312.
- 3- Chithirai Pon Selvan M, Mohana Sundara Raju N. Abrasive waterjet cutting surfaces of ceramics – an experimental investigation. *International Journal of Advanced Scientific Engineering and Technologies Research*. 2012;1(3):52-59.
- 4- Xu S, Wang J. A study of abrasive waterjet cutting of alumina ceramics with controlled nozzle oscillation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005;27:693-702.
- 5- Murugan M, Gebremariam MA, Hamedon Z, Azhari A. Performance analysis of abrasive waterjet machining process at low pressure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;319:012051.
- 6- Nagendra Prasad K, John Basha D, Varaprasad KC. Experimental investigation and analysis of process parameters in abrasive jet machining of Ti-6Al-4V alloy using taguchi method. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(10):10894-10903.
- 7- Kumaran ST, Ko TJ, Uthayakumar M, Islam MM. Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;724:1037-1045.
- 8- Li H, Wang J. An experimental study of abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;81:361-369.
- 9- Amirabadi H, Foorginejad A, Ahmadi Mojaveri M. Cutting of Ti-6Al 4V titanium alloy using abrasive water jet and multiobjective optimization of geometry features. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(16):67-75. [Persian]
- 10- Bubo MN, Muthukrishnan N. Investigation on surface roughness in abrasive water-jet machining by response surface method. *Materials and Manufacturing Processes*. 2014;29(11-12):1422-1428.
- 11- Zohoor M, Zohourkari I, Cacciatore F, Annoni M. Influence of machining parameters on part geometrical error in abrasive waterjet offset-mode turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2015;229(12):2125-2133.
- 12- Filip AC, Vasiloni MA, Mihail LA. Experimental research on the machinability of Hardox steel by