



## Sensitivity Analysis of AWJM on RHA



### ARTICLE INFO

#### Authors

Mandizadeh Z.<sup>1</sup>,  
Ramezani F.<sup>1</sup>,  
Khalili M.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

#### \* Correspondence

Address: Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran  
m-khalili@araku.ac.ir

#### How to cite this article

Mandizadeh Z., Ramezani F., Khalili M. Sensitivity analysis of AWJM on RHA. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):183-187.

### ABSTRACT

Achieving optimal parameters in production processes is crucial in the military industry, as the products are highly complicated and resistant. Because there is no heat generation in the cutting area, abrasive water jet machining is a particularly popular procedure. This study looked into how input variables affected the abrasive water jet machining of rolled homogenous armour steel. The material removal rate, surface roughness, and Kerf angle regression equations were analyzed using the E-fast method of statistical sensitivity analysis. The findings demonstrated that the standoff distance, with a 74% impact, is the most effective parameter on the kerf angle, and the jet traversal speed, with a 95% and 50% impact on the material removal rate and surface roughness, respectively. In addition, pressure had the least effect on three variables of material removal rate, surface roughness and kerf angle.

**Keywords** Abrasive Water Jet Machining, Armor Steel, Material Removal Rate, Surface Roughness, Kerf Angle.

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۸۳-۱۸۷



## تحلیل حساسیت ماشین‌کاری جت آب ساینده بر روی فولاد زرهی همگن نورد شده



### چکیده

در صنایع دفاعی که محصولات از پیچیدگی و مقاومت بالایی برخوردارند، دستیابی به پارامترهای ایده‌آل در فرایندهای تولید دارای اهمیت بسیار زیادی است. ماشین‌کاری جت آب ساینده فرایندی بسیار پرکاربرد به دلیل عدم تولید گرما در ناحیه برش است. در این پژوهش به بررسی اثرگذاری متغیرهای ورودی بر فرایند ماشین‌کاری جت آب ساینده بر روی فولاد زرهی همگن نورد شده پرداخته شده است. در این راستا، با کمک معادله رگرسیون ارائه شده برای نرخ حذف مواد، زبری سطح و زاویه کرف با استفاده از آنالیز حساسیت آماری به روش ای-فست، مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که اثرگذارترین پارامتر بر روی نرخ حذف مواد و زبری سطح، سرعت تراورس جت با به ترتیب ۹۵ درصد و ۵۰ درصد تأثیر بوده و مؤثرترین پارامتر بر روی زاویه کرف، فاصله ایستادن با ۷۴ درصد تأثیر است. همچنین، فشار کمترین تأثیر را در مجموع بر سه متغیر نرخ حذف مواد، زبری سطح و زاویه کرف داشته است.

### مشخصات مقاله

#### نویسنده‌ها

زینب ماندی زاده<sup>۱</sup>

فاطمه رهمانی<sup>۱</sup>

محمد خلیلی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده فنی مهندسی،

دانشگاه اراک، اراک، ایران

m-khalili@araku.ac.ir

**کلیدواژه‌ها** ماشین‌کاری جت آب ساینده، فولاد زرهی، نرخ حذف مواد، زبری سطح، زاویه کرف

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، نیاز صنایع دفاعی به افزایش سطح دفاعی روزبه‌روز افزایش یافته است و همان‌طور که پیچیدگی محصولات این صنعت افزایش می‌یابد نیازشان به محصولات و مواد مقاوم و محافظ بیشتر می‌شود.

فولاد زرهی همگن نورد شده یکی از موادی است که به دلیل استحکام کششی، چقرمگی و سختی بالا در برابر ضربه، در صنایع دفاعی مثل تولید ماشین‌های جنگی، تانک‌ها و... استفاده می‌شود. این فولاد قادر به تحمل ضربه‌های خارجی در یک محدوده سرعت مشخص است [۱]. فرایند ماشین‌کاری جت آب ساینده یک فرایند برش است که با استفاده از یک جریان سرعت بالای دارای ذرات ساینده که ناشی از آب پرفشار است، عمل برش را انجام می‌دهد [۲]. ماشین‌کاری جت آب ساینده، کاربرد وسیعی در صنعت دارد به دلیل اینکه در ناحیه برش، گرما تولید نمی‌کند. پارامترهای ماشین‌کاری در این فرایند عبارت‌اند از: نرخ حذف مواد، زبری سطح، زاویه کرف و... [۳]. برای رسیدن به نتیجه و کیفیت مطلوب، دستیابی به پارامترهای ایده‌آل ضروری است.

راموهان و همکاران، یک رویکرد SPH-DEA-FEM مرتبط را برای پیش‌بینی پارامترهای برش ماشین‌کاری جت آب ساینده در طیف وسیعی از پارامترهای فرایند پیشنهاد کرده است که در مقایسه با روش‌های قبلی، رویکرد شبیه‌سازی جدید، شبیه‌سازی‌های بلندمدت برش جت آب را افزایش می‌دهد [۴].

هرقلگیو و همکاران، به تجزیه و تحلیل سه فناوری غیرمتعارف - جت آب ساینده (AWJ)، پلاسما و لیزر - برای پردازش فولادهای زرهی پرداخت. باتوجه به این موضوع، دو ماده (Ramor 400 و Ramor 550) برای انجام آزمایش‌های تجربی انتخاب شدند. از نظر کیفیت برش و تأثیرات زیست‌محیطی، بهترین نتایج توسط فناوری جت آب ساینده به دست آمد. با این حال، کمترین بهره‌وری را در مقابل دو فناوری دیگر داشت [۵].

ایلاتار و همکاران، به بررسی پارامترهای برش جت آب ساینده (AWJ) مواد برش سخت (صفحه فولادی محافظ آرموکس با ضخامت ۷/۶ میلی‌متر) پرداختند. آزمایش‌هایی در ماشین‌کاری آرموکس به منظور بررسی امکان استفاده از فرایند AWJ برای فرایند ماشین‌کاری انجام شد. پارامترهای فرایند برش مانند پروفایل سطوح ماشین‌ی، هندسه کرف و میزان حذف مواد مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج تجربی نشان داد که سرعت پیمایش یک پارامتر مهم در زبری سطح است. علاوه بر این، آن را نشان داد که زبری سطح و میزان حذف مواد به طور گسترده‌ای تحت تأثیر نرخ جریان ساینده قرار داشتند. افزایش سرعت جریان ساینده باعث حذف مواد می‌شود سرعت اما زبری سطح را کاهش می‌دهد [۶].

تا کنون از روش‌های آماری تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی اثرگذاری پارامترهای مختلف بر فرایند ماشین‌کاری جت آب ساینده روی فولاد زرهی نورد شده، استفاده نشده است. در این مقاله با استفاده از روش آماری تحلیل حساسیت ای-فست تأثیر ورودی‌های مختلف بر سه پارامتر نرخ حذف مواد، زبری سطح و زاویه کرف را در فرایند ماشین‌کاری جت آب ساینده روی فولاد زرهی پیش‌بینی شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت آماری نشان می‌دهد که اثرگذارترین پارامتر روی نرخ حذف مواد و زبری سطح، سرعت تراورس جت است و مؤثرترین پارامتر روی زاویه کرف، فاصله ایستادن است.

## ۲- روش آنالیز حساسیت و مدل‌سازی

در این مقاله از روش آنالیز حساسیت ای-فست استفاده شده و در نهایت تأثیر کمی هر یک از پارامترهای ماشین‌کاری استخراج گردیده است.

## ۲-۱- روش آنالیز حساسیت ای-فست:

آنالیز حساسیت توضیح می‌دهد که چگونه عدم قطعیت در خروجی یک مدل می‌تواند به منابع مختلف عدم قطعیت در ورودی مدل نسبت داده شود [۷].

تحلیل حساسیت به منظور بررسی تأثیر تغییر دادن متغیرهای مستقل باهدف بهینه‌سازی مسائل موجود و حذف پارامترهای غیرضروری است. آنالیز حساسیت دارای روش‌ها و مدل‌های مختلفی است. روش‌های آماری هم‌زمان اثر پارامترهای ورودی را بررسی می‌کند و نیز اثرات کیفی و کمی پارامترها را به طور هم‌زمان، مشخص می‌کنند. از پرکاربردترین و مهم‌ترین روش‌های آماری نیز، روش‌های سوپل و ای-فست هستند.

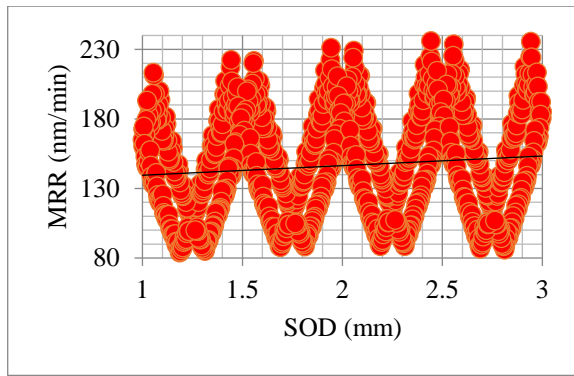
که در این مقاله به دلیل سرعت بالاتری که روش آماری ای-فست دارد، از این روش استفاده شد.

## ۲-۲- مدل‌سازی:

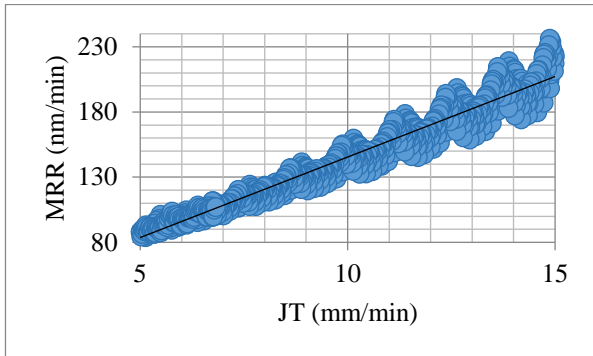
سه پارامتر خروجی بسیار مهم ماشین‌کاری جت آب ساینده شامل نرخ حذف مواد، زبری سطح و زاویه کرف هستند. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده توسط راموهان و همکاران، مدل نرخ حذف مواد، زبری سطح و زاویه کرف برحسب متغیرهای ورودی ماشین‌کاری به صورت روابط (۱)، (۲) و (۳) است [۸].

$$MRR = 1039 + 38.0 SOD - 19.8 JT - 7.9 P - 5.69 SOD \times SOD + 0.285 JT \times JT + 0.0154 P \times P + 0.91 SOD \times JT - 0.074 SOD \times P + 0.1027 JT \times P \quad (1)$$

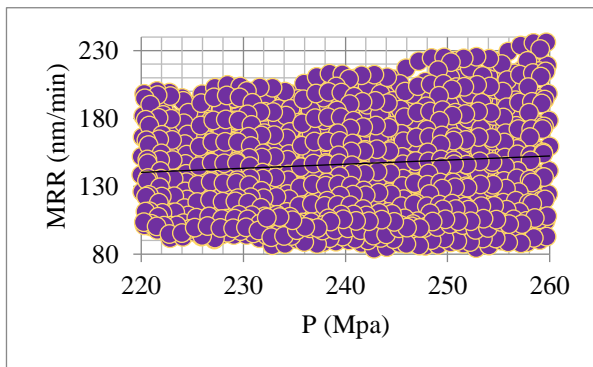
$$(2)$$



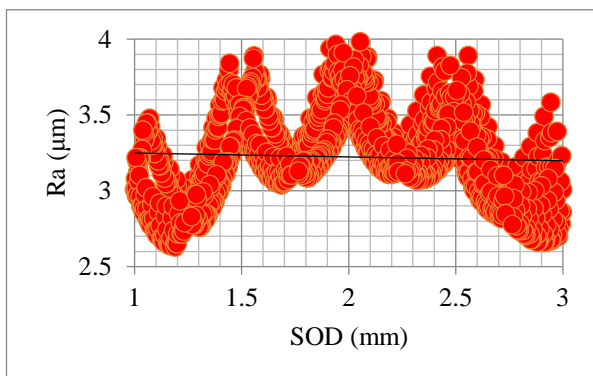
شکل ۱) تأثیر فاصله ایستادن بر روی نرخ حذف مواد



شکل ۲) تأثیر میزان اثرگذاری سرعت تراورس جت بر روی نرخ حذف مواد



شکل ۳) تأثیر تأثیر فشار بر روی نرخ حذف مواد



شکل ۴) تأثیر تأثیر فاصله ایستادن بر روی زبری سطح

$$Ra = 25.8 + 0.46 SOD - 0.198 JT - 0.189 P - 0.616 SOD \times SOD + 0.00635 JT \times JT + 0.000348 P \times P - 0.0167 SOD \times JT + 0.00893 SOD \times P + 0.00074 JT \times P$$

$$Ka = 2.87 + 0.091 SOD - 0.0203 JT - 0.0187 P + 0.0084 SOD \times SOD + 0.000554 JT \times JT + 0.000041 P \times P - 0.00036 SOD \times JT - 0.000342 SOD \times P + 0.000028 JT \times P \quad (3)$$

### ۳- تحلیل حساسیت

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرایند AWJM مثل فاصله ایستادن، سرعت تراورس جت و فشار روی سه پارامتر خروجی زاویه کرف، نرخ حذف مواد و زبری سطح پرداخته شده است.

#### ۳-۱- بررسی تأثیر متغیرهای ورودی سه پارامتر نرخ حذف مواد، زبری سطح و زاویه کرف

شکل ۱ تأثیر فاصله ایستادن را بر روی نرخ حذف مواد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله ایستادن، نرخ حذف مواد نیز افزایش می‌یابد.

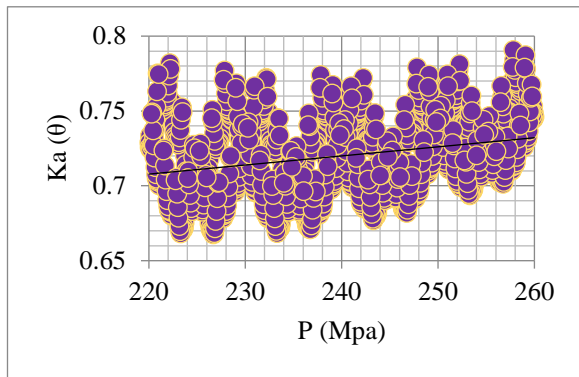
شکل ۲ میزان اثرگذاری سرعت تراورس جت را بر روی نرخ حذف مواد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت تراورس جت، نرخ حذف مواد افزایش چشمگیری دارد.

شکل ۳ تأثیر فشار را بر روی نرخ حذف مواد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، نرخ حذف مواد نیز افزایش می‌یابد.

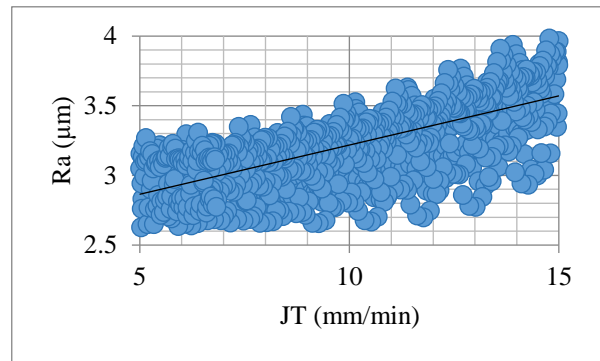
میزان تأثیر فاصله ایستادن بر روی زبری سطح در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، با افزایش فاصله ایستادن، زبری سطح کاهش ناچیزی می‌یابد.

شکل ۵ میزان تأثیر سرعت تراورس جت را بر روی زبری سطح نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت تراورس جت، زبری سطح نیز افزایش می‌یابد.

تأثیر فشار بر روی زبری سطح در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، زبری سطح نیز افزایش می‌یابد.

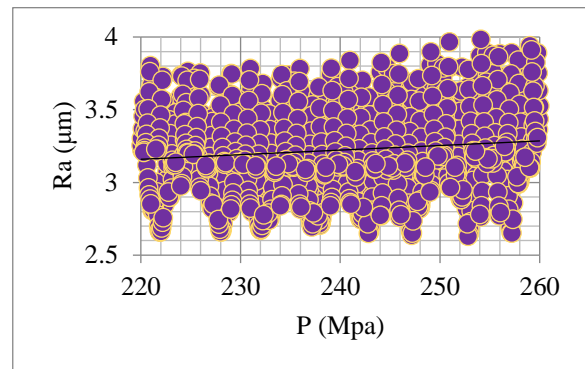


شکل ۹) تأثیر تأثیر فشار بر روی زاویه کرف



شکل ۵) تأثیر تأثیر سرعت تراورس جت بر روی زبری سطح

شکل ۷ تأثیر فاصله ایستادن را بر روی زاویه کرف نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله ایستادن، زاویه کرف نیز افزایش می‌یابد. شکل ۸ میزان اثرگذاری سرعت تراورس جت را بر روی زاویه کرف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت تراورس جت، زاویه کرف کاهش می‌یابد. همان‌طور که نشان داده شده است، با افزایش فشار، زاویه کرف هم افزایش می‌یابد.



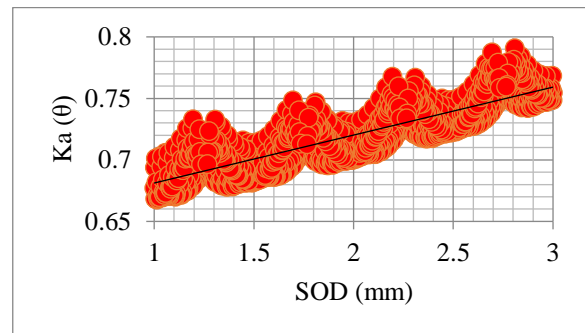
شکل ۶) تأثیر تأثیر فشار بر روی زبری سطح

### ۲-۳- بررسی تأثیر کمی متغیرهای ورودی بر روی خروجی‌ها

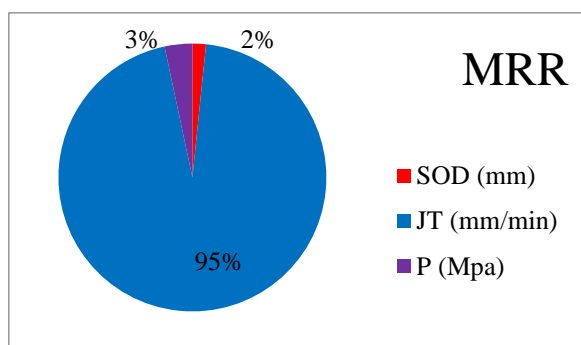
شکل ۱۰ نشان‌دهنده میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر روی نرخ حذف مواد است. پارامترهای تأثیرگذار بر روی نرخ حذف مواد را می‌توان به ترتیب سرعت تراورس جت با ۹۵ درصد، فشار با ۳ درصد و فاصله ایستادن با ۲ درصد تأثیر نام برد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، بیشترین پارامتر تأثیرگذار بر روی زبری سطح، سرعت تراورس جت با ۵۰ درصد است و بعد از آن به ترتیب فاصله ایستادن با ۴۲ درصد و فشار با ۴ درصد پارامترهای تأثیرگذار هستند.

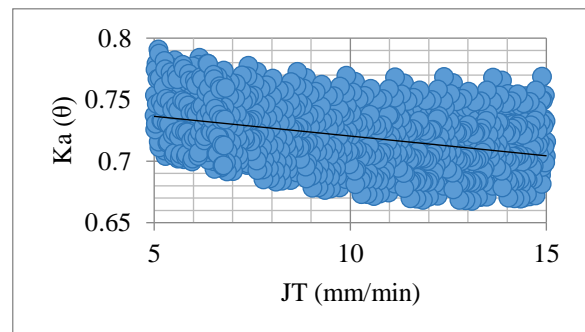
در شکل ۱۲ میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر روی زاویه کرف نشان داده شده است. به ترتیب پارامتر فاصله ایستادن با ۷۴ درصد، سرعت تراورس جت با ۱۵ درصد و فشار با ۱۱ درصد روی زاویه کرف تأثیر داشته‌اند.



شکل ۷) تأثیر تأثیر فاصله ایستادن بر روی زاویه کرف



شکل ۱۰) تأثیر تأثیر متغیرهای ورودی بر روی نرخ حذف مواد



شکل ۸) تأثیر تأثیر سرعت تراورس جت بر روی زاویه کرف

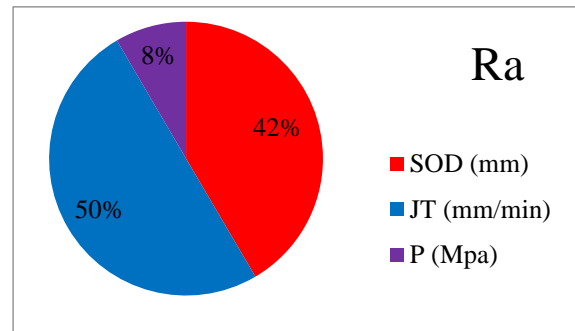
Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety. 2023 Dec;7(1):1.

5- Herghelegiu E, Schnakovszky C, Radu MC, Tampu NC, Zichil V. Comparative study on the processing of armour steels with various unconventional technologies. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2017 Aug 1 (Vol. 227, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.

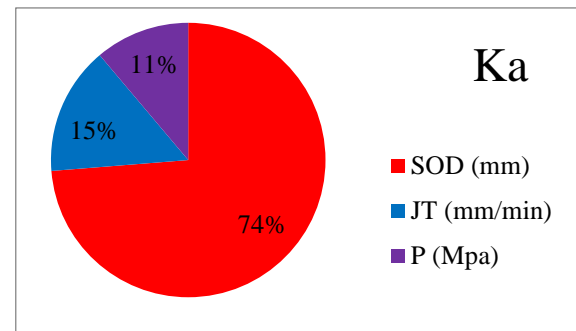
6- Elattar YM, Sonbol HA, Mahdy MA. Evaluation of Abrasive Water Jet Machining Process Parameters on Cutting High Strength Hard Material (Armox). In The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering 2018 Apr 1 (Vol. 18, No. 18th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering, pp. 1-12). Military Technical College.

7- Saltelli A, Chan K, Scott EM: sensitivity analysis. Wiley. 2000;79:80.

8- Rammohan S, Kumaran ST, Uthayakumar M, Korniejenko K, Nykiel M, Velayutham A. Prediction of abrasive waterjet machining parameters of military-grade armor steel by semi-empirical and regression models. Materials. 2022 Jun 20;15(12):4368.



شکل ۱۲: تأثیر متغیرهای ورودی بر روی زبری سطح



شکل ۱۳: تأثیر متغیرهای ورودی بر روی زاویه کرف

### جمع‌بندی

برای دسترسی به کیفیت مطلوب پارامترهای تأثیرگذار در فرایند تولید مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزارهای متلب و مینی‌تب داده‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. سرعت تراورس جت مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر روی نرخ حذف مواد و زبری سطح بود و مؤثرترین پارامتر بر روی زاویه کرف، فاصله ایستادن بود. همچنین فاصله ایستادن بر روی زبری سطح نیز تأثیر قابل‌توجهی داشت.

### مراجع

- 1- Saxena A, Dwivedi SP, Srivastava AK, Sharma S, Kotkunde N. A computational investigation on the influence of the 1/d ratio and strain rate on the deformation behavior of rolled and homogeneous armor steel in the split Hopkinson pressure bar test process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2022 Feb;236(1):138-48.
- 2- Kale A, Singh SK, Sateesh N, Subbiah R. A review on abrasive water jet machining process and its process parameters. Materials Today: Proceedings. 2020 Jan 1;26:1032-6.
- 3- Natarajan Y, Murugesan PK, Mohan M, Khan SA. Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. Journal of Manufacturing Processes. 2020 Jan 1;49:271-322.
- 4- Rammohan S, Thirumalai Kumaran S, Uthayakumar M, Velayutham A. Numerical Modeling of Kerf Generation in Abrasive Waterjet Machining of Military Grade Armor Steel.