مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16، ص‌ص 67-75

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

برشکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده و بهینه‌سازی مشخصه‌های هندسه شکاف برش

حسین امیرآبادی[1*]، ابوالفضل فورگی نژاد[2]، میلاد احمدی مجاوری[3]

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند
3- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، hamirabadi @birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 مرداد 1393
پذیرش: 08 مهر 1393
ارائه در سایت: 06 آبان 1393

کلید واژگان:
آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V
برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده
روش تاگوچی
تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی
بهینه‌سازی

چکیده

فرآیند برش جت آب همراه با ذرات ساینده، شکاف برشی با لبه‌های زاویه دار و هندسه‌ای خاص بر روی قطعه کار تحت برش ایجاد می‌نماید. این موضوع باعث بروز محدودیت‌هایی در کاربردهای برش جت آب شده و یا نیاز به ماشینکاری لبه‌ها را در برخی موارد به وجود می‌آورد. در این مقاله نتایج تحقیقات انجام شده بر روی هندسه شکاف برش آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در فرآیند برش جت آب همراه با ذرات ساینده ارائه گردیده است. بدین منظور از روش ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی برای بهینه سازی همزمان مشخصه‌های هندسه شکاف برش در فرآیند برش آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با جت آب همراه با ذرات ساینده که فرآیندی چند متغیره غیر خطی است، استفاده گردید. پارامترهای ورودی فرآیند برش جت آب همراه با ذرات ساینده، بر روی نرخ براده‌برداری و خصوصیات سطح برشکاری شده تأثیر می‌گذارند. پارامترهای ورودی فرآیند شامل فشار جت آب، سرعت پیشروی، نرخ ریزش ذرات ساینده و فاصله نازل تا سطح قطعه کار پارامترهای مورد مطالعه این تحقیق می‌باشند. انتخاب مناسب پارامترهای ورودی این فرآیند منجر به حداقل نمودن مشخصه‌های پهنای بالای شکاف برش، شیب شکاف برش و انحراف شکاف برش می‌شود لذا انتخاب مناسب پارامترهای ورودی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. نتایج به دست آمده از این روش نشان می‌دهد که روش ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی یک راه حل مناسب برای بهینه‌سازی فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده است.

Cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy using abrasive water jet and multiobjective optimization of geometry features

Hossein Amirabadi[1*], Abolfazl Foorginejad[2], Milad Ahmadi Mojaveri[3]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2-Departmant of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology , Birjand, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/615, hamirabadi @birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 August 2014
Accepted 30 September 2014
Available Online 28 October 2014

Keywords:
Ti-6Al-4V Titanium alloy
Abrasive water jet cutting
Taguchi method
Principal component analysis
Optimization

ABSTRACT

Abrasive water jet cutting process can produce tapered edges on cutting kerf. This problem can limit the applications of abrasive water jet cutting process and in some cases another edge preparation process is necessary. In this paper, an experimental investigation of kerf characteristics of Ti-6Al-4V titanium alloy under abrasive water jet cutting is presented. In this regard, it is shown how to use the hybrid approach of Taguchi method and principal component analysis to optimize abrasive water jet cutting is used in this paper. The abrasive water jet cutting process input parameters affect the material removal rate and the characteristics of the surface. Considerable effort was put into understanding the influence of the system operational process parameters such as water jet pressure, traverse speed, abrasive flow rate, and standoff distance. Appropriately selecting abrasive water jet cutting process parameters leads to optimization of kerf characteristics including top kerf width, kerf tapper and kerf deviation, therefore it is important to select appropriate input parameters. The obtained results from this method show that the hybrid approach of Taguchi method and principal component analysis is a suitable solution for optimization of abrasive water jet cutting process.

1- مقدمه

برش با جت آب همراه با ذرات ساینده فرآیندی نوین در برشکاری محسوب می‌شود. این فرآیند از آب دارای فشار بالا برای تولید جریان با سرعت بالا استفاده می‌نماید، جت آب به وجود آمده هنگامی‌که با ذرات ساینده مخلوط شود قابلیت برش گستره وسیعی از مواد دارای سختی‌های متفاوت را پیدا می‌نماید[1]. فرآیند برش با جت آب همراه با ذرات ساینده دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که باعث رشد روز افزون آن شده است. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از: عدم تنش یا تغییر شکل حرارتی در قطعه‌کار، سرعت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. Amirabadi, A. Foorginejad, M. Ahmadi Mojaveri, Cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy using abrasive water jet and multiobjective optimization of geometry features, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 67-75, 2015 (In Persian)

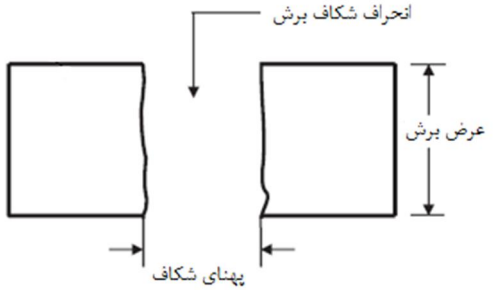
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]

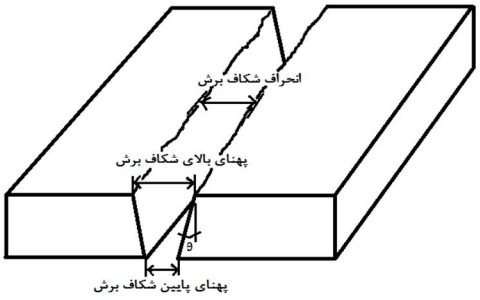
بالای برشکاری، امکان برش محدوده وسیعی از ضخامت‌ها با تلرانس قابل قبول، کنترل راحت، قابل تبدیل به سیستم خودکار، برنامه‌ریزی و تنظیم فوق العاده سریع دستگاه و عدم نیاز به گیره‌بندی حین برشکاری[3،۲].

کیفیت سطح در بسیاری از فرآیندهای ماشینکاری و برشکاری به عنوان یکی از مشخصه‌های بارز فرآیند در نظر گرفته می‌شود. در برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده چندین پارامتر اثرگذار بر روی کیفیت سطح وجود دارد، که از این میان فشار جت آب، سرعت پیشروی، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و نرخ ریزش ذرات ساینده جزو پارامترهای قابل کنترل محسوب گشته که امکان کنترل دقیق آن‌ها وجود دارد. سایر پارامترها از قبیل اندازه اریفیس[1] و قطر نازل بدلیل اینکه دائماً در معرض خوردگی قرار دارند قابل کنترل نمی‌باشند[1و4].

استحکام ، سبکی ، مقاومت بسیار زیاد در برابر فرسودگی، توانایی تحمل درجه حرارت‌های بسیار بالا و مقاومت به سایش زیاد از جمله خواصی است که باعث افزایش استفاده از آلیاژهای تیتانیوم در کاربردهای مختلف گردیده است. از طرف دیگر ماشینکاری آلیاژهای تیتانیوم با توجه به خصوصیات خاص آن با مشکلاتی نظیر سایش ابزار و شکست ابزار همراه است. تیتانیوم جزو مواد سخت برش محسوب گردیده و از برش جت آب همراه با ذرات ساینده برای برشکاری و ماشینکاری بر روی آن می‌توان استفاده نمود[5]. در پژوهش حاضر در راستای بهبود مشخصات هندسه شکاف برش و کاهش ماشینکاری ثانویه در فرآیند برش آب همراه با ذرات ساینده ماده سخت برش تیتانیوم مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، مشخصه‌های هندسه شکاف، شامل عرض بالای شکاف برش، شیب شکاف برش و انحراف شکاف برش؛ نشان داده شده در شکل 1 و 2 به عنوان عوامل تعیین کننده در کیفیت برش در فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین فشار آب، سرعت پیشروی، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و نرخ ریزش ذرات ساینده به عنوان پارامترهای قابل کنترل مؤثر بر روی مشخصه‌های هندسه شکاف در فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده در نظر گرفته شده‌اند.



شکل 1 انحراف شکاف برش از نمای بالا[6]



شکل 2 پهنای بالا، پایین و انحراف شکاف برش در نمای سه بعدی

1- Orifice

در سال‌های اخیر مطالعاتی به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده صورت گرفته است. سرینواسو و رامش[7] برای طراحی آزمایش‌ها از روش تاگوچی و سپس برای دستیابی به راندمان ایده‌آل برش از آنالیز واریانس برای تعیین کارآیی سیستم استفاده نمودند. آن‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده اقدام به ارائه مدل تجربی نموده و با استفاده از یک استراتژی هیبریدی معادلات پاسخ مدل تجربی را با مدل فازی ترکیب کرده و بدین‌وسیله پارامترهای ورودی بهینه‌کننده این فرآیند را به دست آورند. چاکراواتی و بابو[8] با استفاده از روش منطق فازی توانستند عمق برش را در فرآیند برشکاری توسط جت آب پیش‌بینی نمایند. دیتریش و همکاران[9] برش مواد ترد را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش تلاش نمودند تا مقادیر بهینه‌ای را برای صافی سطح و نرخ براده‌برداری ارائه دهند. رامول و آرولا[10] عمق برش را با استفاده از مدل رگرسیون در فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده پیش‌بینی نمودند. امیرآبادی و همکاران[11] زبری سطح در فرآیند برشکاری شیشه توسط جت آب به همراه ذرات ساینده را با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک مدل‌سازی و بهینه‌سازی نمودند. آن‌ها در پژوهشی دیگر فرآیند برش شیشه با جت آب همراه با ذرات ساینده را توسط شبکه عصبی مدل‌سازی و با الگوریتم کرم شب‌تاب پارامتر زبری سطح را بهینه‌سازی نمودند[12]. در پژوهشی دیگر کایداس و هسکالیک[13] مقادیر زبری سطح را از آزمایش‌های طراحی شده به روش تاگوچی جمع آوری نمودند. آنها با استفاده از شبکه عصبی باز انتشار خطا و مدل رگرسیون زبری سطح فرآیند را پیش‌بینی نمودند و با استفاده از آنالیز واریانس مؤثرترین پارامترهای تأثیرگذار بر زبری سطح را مشخص نمودند. این بررسی‌های آماری نشان داد که فشار جت آب بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح خواهد گذاشت. اگرچه مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده انجام گرفته است، اما کمتر به هندسه شکاف برش در فرآیند برش جت آب پرداخته شده است. محققان در مطالعات تجربی خود به این نتیجه رسیدند که مشخصه‌های شکاف مانند پهنای بالای شکاف، انحراف شکاف و شیب شکاف را می‌توان با کنترل مناسب پارامترهای فرآیند به حالت بهینه درآورد[6].

به منظور تبیین چگونگی شکل‌گیری شیب شکاف، شکل 3 مدلی از سطح مقطع باز شدن جت و منطقه مؤثر جت را نشان می‌دهد. خطوط بیرونی در شکل مناطقی را که در آن‌ها سرعت جت از مقدار معینی تجاوز کرده است نشان می‌دهد. سرعت منطقه مرکزی بسیار بیشتر از منطقه بیرونی است. وقتی مواد سخت مورد برشکاری قرار می‌گیرند فقط منطقه مرکزی جت مؤثر است که البته باعث به وجود آمدن شیب شکاف برش می‌گردد. در برش مواد نرم بخش بیشتری از جت آب مؤثر است که حتی باعث واگرا شدن دیواره شکاف برش می‌گردد[14]. در این پژوهش روشی ساده اما کارآمد برای به دست آوردن شرایط بهینه برشکاری جهت رسیدن به هندسه شکاف برش مطلوب در فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده ارائه شده است.

2- مواد و روش انجام آزمایش

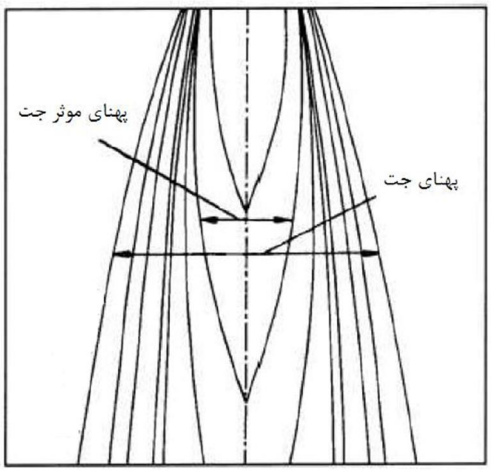
2-1- جنس قطعه‌کار

آلیاژهای تیتانیوم به علت دارا بودن خواص مکانیکی و متالوژیکی خاص از قبیل هدایت حرارتی کم، تمایل شدید برای واکنش شیمیایی با ابزار برش و مدول الاستیسیته پایین، به سختی به روش سنتی ماشینکاری می‌شوند. در زمان ماشینکاری این آلیاژها مشکلاتی از قبیل مشکلات تلرانسی، تخریب

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]

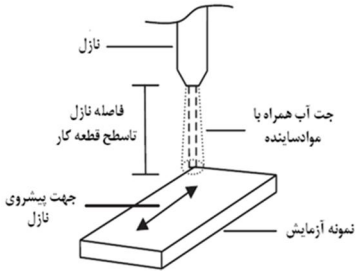
سریع ابزار بدلیل تمایل به جوش‌خوردگی در سطح آن و وقوع پدیده چتر در قطعات بلند، بوجود می‌آید[15]. فرآیند ماشینکاری با جت آب به همراه ذرات ساینده از جمله فرآیندهای پیشرفته ماشینکاری است که به دلیل دارا بودن مزایای بسیاری از قبیل اعمال نیروی ماشینکاری بسیار کم و عدم تماس مکانیکی قطعه و ماشین، عدم ایجاد هر گونه تنش حرارتی، دقت هندسی بالا و عدم حساسیت به مشخصات هندسی و جنس قطعه‌کار می‌توان از آن در ماشینکاری آلیاژهای تیتانیوم استفاده نمود و لذا بهینه‌سازی مشخصه‌های هندسه شکاف برش در برشکاری با جت آب همراه با ذرات ساینده و مطالعه بر روی آن در آلیاژ Ti-6Al-4V از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به منظور انجام آزمایش نمونه آلیاژ تیتانیومی با ضخامت 9 میلیمتر با استفاده از فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده برشکاری گردید. جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم بکار گرفته شده را نشان می‌دهد. شکل 4 نحوه‌ی آماده‌سازی و متغیرهای آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل 3 محدوده قدرت نسبی درجت آب[14]

الف



ب

شکل4 (الف) آماده سازی آزمایش (ب) نمایش شماتیک متغیرهای آزمایش

جدول 1 درصد وزنی ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V برشکاری شده

Al	Fe	Sn	V	Ti
%6/22	%0/187	%0/56	%3/35	%89/6

2-2- طراحی آزمایش و رویه انجام آن

برای انجام آزمایش از دستگاه برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده KMT-SLV50 استفاده شده است. پارامترهای فرآیند در نظر گرفته شده در آزمایش شامل: فشار جت آب، سرعت پیشروی، فاصله نازل تا سطح قطعه کار و نرخ ریزش ذرات ساینده می‌باشد. به علت محدودیت پمپ به کار گرفته شده در آزمایش، برای فشار جت آب دو سطح و برای سایر پارامترها چهار سطح در نظر گرفته شده است. ذرات ساینده نوع گارنت مش 80 به عنوان ذرات ساینده در آزمایش به کار رفته است. قطر اوریفیس و نازل به کار گرفته شده به ترتیب 0/33mm و 0/9mm می‌باشد. جریان جت آب همراه با ذرات ساینده عمود بر نمونه ها تنظیم شد.

به منظور تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش، عرض برش در بالا و پایین شیار، زاویه مخروط شدگی شیار (شیب شیار) و انحراف شیار اندازه‌گیری شد. ابتدا نمونه‌ها همانگونه که در شکل 5 نشان داده شده است بدون جدا شدن دو قسمت از یکدیگر بریده می‌شود تا اندازه‌گیری عرض برش قبل از جدا شدن قطعات از یکدیگر میسر گردد. اندازه‌گیری عرض برش در پایین شیار توسط کولیس دیجیتال با دقت 0/01 میلیمتر صورت گرفت. دو قسمت بریده شده به منظور اندازه‌گیری شیب شیار از یکدیگر جدا شده و شیب شیار برش نیز توسط یک زاویه‌سنج اونیورسال با دقت 5 دقیقه اندازه‌گیری شد. به دلیل گرد شدن لبه‌های بالای شکاف برش در فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده، اندازه‌گیری عرض برش در بالای شیار با کولیس با دقت کافی مقدور نیست. به همین دلیل ابتدا اندازه‌گیری عرض برش در پایین شیار و شیب شیار صورت گرفت سپس با استفاده از روابط (1) و (2) عرض برش در بالای شیار و انحراف شیار به دست می‌آید.

جدول 2 تمام متغیرهای بررسی شده در آزمایش و همچنین سایر مقادیر ثابت را نشان می‌دهد.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{W_t - W_b}{2t_n}\right) \quad (1)$$

که دررابطه (1) W_t پهنای بالای شکاف برش، W_b پهنای پایین شکاف برش و t_n ضخامت ماده برش خورده به صورت کامل و θ شیب شیار است.

$$K_d = \max(W_t) - \min(W_t) \quad (2)$$

که K_d انحراف شیار می‌باشد.

در حالت فاکتوریل کامل، برای انجام یک آزمایش با سه متغیر چهار سطحی و یک متغیر دو سطحی، چنانچه تمام حالت‌های موجود بررسی شود باید 128 آزمایش انجام گیرد. به منظور کاهش هزینه و زمان از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای تعیین چیدمان‌ها در آزمایش بکار رفته است. به این منظور از روش چیدمان متعامد L32 تاگوچی استفاده شده است.

جدول 2 پارامترهای آزمایش جهت برشکاری نمونه‌هایی از جنس آلیاژ تیتانیوم

پارامترهای فرآیند	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
فشار جت آب p (bar)	2400	3600	-----	-----
سرعت پیشروی v (mm/min)	100	150	200	300
نرخ ریزش ذرات ساینده m (gr/min)	250	350	450	550
فاصله نازل تا سطح قطعه کار d (mm)	2	3	4	5

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]

طول نازل 75 mm ، طول مخزن مخلوط کننده 55 mm می‌باشد.

جدول 3 چیدمان متعامد L32 و پهنای بالای شکاف برش، شیب شکاف برش و انحراف شکاف برش اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در این پژوهش جهت طراحی آزمایش تاگوچی از نرم‌افزار مینی‌تب[1] استفاده گردید.

3- روش آنالیز ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی

هدف آنالیز ترکیبی تاگوچی[2] و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی[3]، حل مسائل پیچیده می‌باشد. در هر فرآیند فاکتورهایی هستند که بر نتیجه فرآیند اثر می‌گذارند. تاگوچی فاکتورها را به فاکتورهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم کرده است. جهت تعیین اثر فاکتورهای غیر قابل کنترل بر پارامترهای بهینه، از نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود. این نسبت نشان‌دهنده‌ی حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به فاکتورهای خارجی اثرگذار و غیر قابل کنترل در یک فرآیند کنترل شده می‌باشد. نسبت سیگنال به نویز هر چه بیشتر باشد اثر فاکتورهای قابل کنترل در فرآیند بیشتر خواهد بود[6]. فانگ و چن از روش ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی به منظور بهینه‌سازی چند پارامتر به صورت همزمان در طول فرآیند تزریق پلاستیک استفاده نمودند[16]. پراسانا و همکاران از روش تلفیقی تاگوچی به همراه تحلیل منطق خاکستری به منظور تحلیل و بررسی کیفیت سوراخ‌های کوچک توسط سوراخکاری خشک در آلیاژ Ti-6Al-4V بهره بردند[17].

3-1- روش تاگوچی

روش تاگوچی روش مناسبی برای طراحی آزمایش می‌باشد. مطالعات قبلی نشان داده که تاگوچی یکی از مؤثرترین روش‌ها برای تولید محصول با کیفیت بالا و هزینه کم می‌باشد. هدف روش تاگوچی تعیین مقدار بهینه پارامترهای فرآیند می‌باشد. در این روش پارامترهای اصلی فرآیند که تأثیر به‌سزایی در نتیجه فرآیند دارند را به عنوان پارامترهای ورودی معرفی می‌کنند. در پژوهش حاضر علاوه بر تقلیل تعداد آزمایش‌ها از دیگر مزایای این روش مانند تحلیل جواب‌ها و ارزیابی شرایط بهینه نیز استفاده گردیده است. در این روش ابتدا مقدار سیگنال به نویز[4] با توجه به رابطه (3) محاسبه می‌شود. که در آن y_i داده‌ی حاصل از اندازه‌گیری در i امین آزمایش و n تعداد دفعات تکرار آزمایش است که به دلیل محدودیت در تعداد دفعات تکرار آزمایش n=1 در نظر گرفته شده است[6].

$$\frac{S}{N} = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right] \quad (3)$$

در این پژوهش نسبت سیگنال به نویز برای پهنای بالای شکاف، انحراف شکاف و شیب شکاف برش با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده مورد محاسبه قرار می‌گیرد. میزان تأثیر هر یک از فاکتورهای کنترل در هر سطح، از طریق میانگین نسبت سیگنال به نویزهای به دست آمده در همان سطح، مشخص می‌گردد. سطوح پارامتر بهینه سطوحی هستند که مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز در آن بیشتر می‌باشد[6].

3-2- روش تجزیه و تحلیل اجزای اصلی

روش تجزیه و تحلیل اجزای اصلی، یک روش آماری کارآمد برای بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد. کاربرد این روش در کارهای فشرده‌سازی و کاهش بعد است و خطای میانگین مربعات حاصل از فشرده‌سازی را کمینه می کند.

1- Minitab
2- Taguchi method
3- Principal component analysis
4- S/N

تجزیه و تحلیل در این روش شامل تجزیه مقدارهای ویژه ماتریس کواریانس می‌باشد. در این روش مقادیر سیگنال به نویز به دست آمده با استفاده از روش تاگوچی با توجه به رابطه (4) نرمالیزه می‌شود.

$$x_i^*(j) = \frac{x_i(j) - x(j)^-}{x(j)^+ - x(j)^-} \quad (4)$$

که در آن $x_i^*(j)$ مقدار نرمالیزه شده نسبت سیگنال به نویز برای j مین مشخصه کیفی در i امین آزمایش می‌باشد. $x_i(j)$ نسبت سیگنال به نویز برای j امین مشخصه کیفی در i مین آزمایش می‌باشد و $x(j)^-$ و $x(j)^+$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای j مین مشخصه کیفی در تمامی آزمایش‌ها می‌باشد. مقادیر نرمالیزه شده نسبت سیگنال به نویز برای هر مشخصه کیفی محاسبه گردید.

3-3- روش محاسبه اجزای اصلی و شاخص تمام اجزای اصلی

اجزای اصلی طبق رابطه (5)که در آن $P_i(k)$، k مین PC از i مین آزمایش و $V_k(j)$، j مین عضو از k مین بردار ویژه ماتریس ضرایب همبستگی X^* می‌باشد، محاسبه می‌شود.

$$p_i(k) = \sum_{j=1}^{m} x_i^*(j) \times v_k(j) \quad (5)$$

شاخص تمام اجزای اصلی[5] مربوط به i مین آزمایش (p_i) طبق رابطه (6) محاسبه می‌شود که در آن eig(k)، k مین مقدار ویژه ماتریس ضرایب همبستگی می‌باشد. برای هر آزمایش به منظور مشخص کردن تاثیر متوسط هر عامل در هر سطح، شاخص تمام اجزای اصلی محاسبه می‌شود.

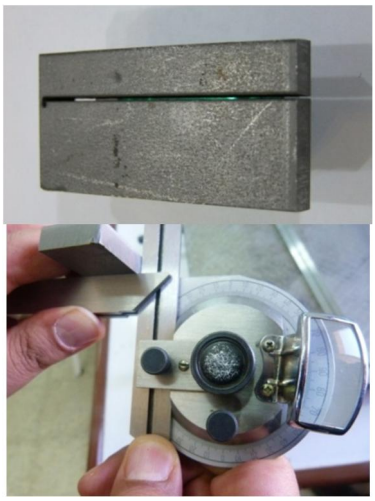
$$p_i = \sum_{k=1}^{m} p_i(k) \times e(k) \quad (6)$$

که

$$e(k) = \frac{\mathrm{eig}(k)}{\sum_{k=1}^{m} \mathrm{eig}(k)}$$

مقادیر ویژه ماتریس ضرایب همبستگی برابر با 0/6506، 0/9732 و 1/3762 و بردارهای ویژه ماتریس ضرایب همبستگی برابر با

[0/7040 0/2028 -0/6806]،
[-0/7097 0/1636 -0/6853]
[-0/0277 0/9654 0/2591]



شکل 5 نحوه برش قطعه و اندازه‌گیری شیب شیار برش

5- Total principal component index

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]

جدول 3 طراحی آزمایش با استفاده از چیدمان L32 و نتایج آزمایش

شماره آزمایش	چیدمان L32				پهنای بالای شکاف (mm)	شیب شکاف (degree)	انحراف شکاف (mm)
	p (bar)	*v* (mm/min)	*m* (gr/min)	*d* (mm)			
1	1	1	1	1	1/24	1/21	0/06
2	1	1	2	2	1/30	1/11	0/08
3	1	1	3	3	1/36	1/87	0/08
4	1	1	4	4	1/38	1/14	0/09
5	1	2	1	1	1/13	0/66	0/17
6	1	2	2	2	1/30	1/36	0/01
7	1	2	3	3	1/42	1/49	0/17
8	1	2	4	4	1/43	1/05	0/06
9	1	3	1	2	1/26	1/30	0/09
10	1	3	2	1	1/29	1/56	0/04
11	1	3	3	4	1/35	1/81	0/08
12	1	3	4	3	1/32	1/65	0/09
13	1	4	1	2	1/28	1/43	0/12
14	1	4	2	1	1/24	1/62	0/15
15	1	4	3	4	1/30	1/65	0/13
16	1	4	4	3	1/27	1/33	0/17
17	2	1	1	4	1/32	0/98	0/14
18	2	1	2	3	1/38	1/21	0/15
19	2	1	3	2	1/34	0/89	0/07
20	2	1	4	1	1/26	0/89	0/12
21	2	2	1	4	1/27	0/98	0/13
22	2	2	2	3	1/33	1/24	0/06
23	2	2	3	2	1/37	1/30	0/18
24	2	2	4	1	1/35	1/27	0/16
25	2	3	1	3	1/31	2/38	0/08
26	2	3	2	4	1/30	1/49	0/06
27	2	3	3	1	1/35	1/36	0/08
28	2	3	4	2	1/30	1/27	0/18
29	2	4	1	3	1/36	2/13	0/07
30	2	4	2	4	1/30	2/32	0/13
31	2	4	3	1	1/37	2/57	0/15
32	2	4	4	2	1/35	1/94	0/08

و

$$X^* = \begin{bmatrix} x_1^*(1) & x_1^*(2) & \dots & \dots & x_1^*(m) \\ x_2^*(1) & x_2^*(2) & \dots & \dots & x_2^*(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n^*(1) & x_n^*(2) & \dots & \dots & x_n^*(m) \end{bmatrix}$$

می‌باشندکه ماتریس ضرایب همبستگی در زیر محاسبه گردیده است.

$$\text{ماتریس ضرایب همبستگی } X^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.34914 & -0.0648 \\ 0.34914 & 1 & -0.0779 \\ -0.648 & -0.0779 & 1 \end{bmatrix}$$

4- بحث و نتایج

4-1- نتایج بهینه‌سازی

در این پژوهش، از فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده برای برشکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده و مشخصه‌های هندسه شکاف برش به عنوان پارامتر هدف بهینه گردید. از روش ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی برای کمینه نمودن پهنای بالای شکاف برش، شیب شکاف برش و انحراف شکاف برش استفاده شده است. پارامترهای ورودی مورد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]

مطالعه در این فرآیند شامل: فشار جت آب، سرعت پیشروی، نرخ ریزش ذرات ساینده و فاصله نازل تا سطح قطعه کار می‌باشد. برای جمع آوری داده‌ها تجربی از روش طراحی آزمایش تاگوچی L-32 استفاده شده است.

با استفاده از روش تاگوچی نسبت سیگنال به نویز برای پهنای بالای شکاف، انحراف شکاف و شیب شکاف برش با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده محاسبه شده است. و در جدول 4 گزارش شده است. میزان تأثیر هر یک از فاکتورهای کنترل در هر سطح از طریق میانگین نسبت سیگنال به نویز-های به دست آمده در همان سطح مشخص می‌گردد. تأثیر هر یک از فاکتور-ها در سطوح مختلف بر روی عرض برش در بالای شکاف، شیب شکاف و انحراف شکاف در جدول 4 نشان داده شده است. مقادیر نرمالیزه شده نسبت سیگنال به نویز برای هر مشخصه کیفی محاسبه شده است. شاخص تمام اجزای اصلی برای هر آزمایش به منظور مشخص کردن تأثیر متوسط هر عامل در هر سطح می‌باشد. مقادیر Pc_1، Pc_2 و Pc_3 و شاخص تمام اجزای اصلی برای هر آزمایش محاسبه شده است. میزان تأثیر هر عامل از طریق میانگین شاخص تمام اجزای اصلی‌های به دست آمده محاسبه می‌گردد و در جدول 5 نشان داده شده است.

سطوح پارامتر بهینه سطوحی هستند که مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز در آن بیشتر می‌باشد. بنابراین مقادیر بهینه برای کمترین مقدار عرض برش در بالای شکاف، شیب شکاف و انحراف شکاف به ترتیب A1B4C1D1، A1B1C4D2 و A1B3C2D2 می‌باشند. سطوح بهینه هر پارامتر با توجه به بیشترین میانگین شاخص تمام اجزای اصلی‌ها، A2B4C4D1 به دست آمد. به عبارت دیگر در این سطوح، بر اساس مقادیر مندرج در جدول 2 بهینه فشار آب در سطح 2 و برابر با 3600 bar، سرعت پیشروی در سطح 4 و برابر با 300 mm/min، نرخ ریزش ذرات ساینده در سطح 4 و برابر با 550 gr/min و فاصله نازل تا سطح قطعه در سطح 1 و برابر با 2 mm می‌باشد. با توجه به پارامترهای ورودی بهینه پیشنهاد شده توسط الگوریتم ترکیبی که نتایج آن در جدول 3 ذکر گردیده، آزمایش جدیدی صورت پذیرفت. مقادیر به دست آمده برای پهنای بالای شکاف برش، شیب شکاف برش و انحراف شکاف به ترتیب 1/14mm، 0/683° و 0/013mm می‌باشد. بهبود حاصل شده در نتایج آزمایش، صحت و اعتبار کاربرد بهینه‌سازی به روش ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل اجزای اصلی در این فرآیند را نشان می‌دهد.

4-2- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این پژوهش از تحلیل واریانس برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی، بر روی خروجی فرآیند برشکاری با جت آب به همراه ذرات ساینده استفاده شده است. جدول 6 نتایج تحلیل واریانس پارامترهای ورودی فشار آب، سرعت پیشروی، فاصله نازل تا سطح قطعه و نرخ ریزش ذرات ساینده را بر روی عرض برش در بالای شیار، شیب شیار و انحراف شیار نشان می‌دهد. هرچه مقدار به دست آمده در آزمون F بیشتر باشد از آن می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر ورودی مربوطه بر روی خروجی آزمایش تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته است[18].

با توجه به مقادیر حاصل از آزمون F می‌توان نتیجه گرفت که نرخ ریزش ذرات ساینده بیشترین تأثیر را بر روی عرض برش در بالای شیار دارد. افزایش نرخ ریزش ذرات ساینده می‌تواند با افزایش تعداد ذرات ساینده، باعث افزایش پهنای شکاف برش گردد. همچنین افزایش نرخ ریزش ذرات ساینده یک مقدار بحرانی دارد که با افزایش بیش از حد ریزش ذرات ساینده اثر آن بر روی پهنای شکاف برش معکوس می‌گردد. نتایج حاصل بر روی آلیاژ تیتانیوم در این پژوهش با نتایج بدست آمده در پژوهش انجام شده بر روی نرخ ریزش ذرات توسط چانگ و گسکینگ مطابقت دارد[19].

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد با افزایش فاصله نازل تا سطح قطعه کار عرض بالای شکاف برش نیز افزایش می‌یابد که دلیل وقوع آن را می‌توان واگرایی جت آب دانست. همچنین سرعت جابجایی نازل با پهنای شکاف برش رابطه عکس دارد به این علت که هرچه سرعت عبور نازل کاهش یابد ذرات بیشتری با سطح قطعه کار برخورد نموده و در نتیجه پهنای شکاف می‌تواند حداکثر به اندازه پهنای جت افزایش یابد. افزایش فشار و نرخ ریزش ذرات نیز تأثیر مشابهی داشته وافزایش آن‌ها باعث بیشتر شدن پهنای شکاف برش می‌گردد.

K_w، K_t و K_d به ترتیب پهنای بالا، شیب و انحراف شکاف می‌باشند.

جدول 4 تأثیر نسبت سیگنال به نویز بر روی عرض برش در بالای شکاف(K_w)، شیب شکاف(K_t) و انحراف شکاف(K_d)

علامت اختصاری	فاکتور های کنترل	مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز			
		سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
K_w					
A	*p*	-2/29463	-2/46581	0/00000	0/0000
B	*v*	-2/42175	-2/42350	-2/34337	-2/3322
C	*m*	-2/07300	-2/30887	-2/65250	-2/4865
D	*d*	-2/12063	-2/35888	-2/56188	-2/4795
K_t					
A	*p*	-2/64669	-3/09316	0/0000	0/0000
B	*v*	-1/09988	-1/16463	-3/95060	-5/2645
C	*m*	-2/18763	-3/26075	-3/84825	-2/1830
D	*d*	-2/28375	-2/28370	-4/19250	-2/7197
K_d					
A	*p*	21/11019	19/22175	0/0000	0/0000
B	*v*	20/25225	20/80188	21/46200	18/1477
C	*m*	19/54000	23/32713	18/93638	18/8630
D	*d*	19/31488	21/73975	19/74050	18/6187

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]

جدول 5 میزان تأثیر هر عامل از طریق میانگین شاخص تمام اجزای اصلی ها

علامت اختصاری	فاکتورهای کنترل	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
A	p (bar)	-0/1093	0/4364	0	0
B	v (mm/min)	-0/0824	0/06441	0/26943	0/36661
C	m (gr/min)	0/18725	0/17493	0/21948	0/24096
D	d (mm)	0/24061	0/22545	0/13457	0/15347

افزایش فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار، باعث افزایش پهنای بالای شکاف برش می‌گردد. این امر می‌تواند به دو دلیل باشد :اولاً، جت آب واگرا است و افزایش فاصله نازل تا سطح، باعث افزایش پهنای شکاف برش گردد. دوماً، افزایش فاصله نازل تا سطح، باعث می‌شود تا ذرات ساینده‌ای که در جریان جت آب قرار می‌گیرند پس از آنکه از نازل خارج شدند فرصت کافی داشته باشند تا به سرعت و شتاب مناسب، در هنگام برخورد با ماده هدف برسند و هنگام برخورد با ماده هدف از انرژی جنبشی بیشتری برخوردارند که این امر باعث می شود تا برداشت ماده بیشتری صورت گیرد.

افزایش پهنای مؤثر جت آب باعث افزایش پهنای شکاف برش می‌شود و زمانی که کل پهنای جت به پهنای مؤثر تبدیل می‌شود، افزایش فشار تأثیر کمتری بر روی پهنای بالای شکاف برش می‌گذارد. به همین علت با افزایش فشار آب، پهنای بالای شکاف برش به آرامی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل واریانس و مقدار به دست آمده در آزمون F می‌توان دریافت که سرعت پیشروی کمترین اثر را بر روی عرض برش در بالای شیار دارد. با افزایش سرعت پیشروی عرض برش به آرامی کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل می‌باشد که با افزایش سرعت پیشروی ذرات ساینده با سرعت بالاتری عبور داده شده و ذرات کمتری به قطعه‌کار برخورد می‌کنند و در نتیجه شکاف باریکتری ایجاد می‌شود.

نتایج حاصل از آزمون F نشان می‌دهد که سرعت پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی شیب شیار برش دارد. با افزایش سرعت پیشروی، شیب دیواره شکاف برش نیز افزایش می‌یابد. در صورتی که برای بریدن ضخامت مشخصی از قطعه نیاز به انتقال انرژی به قطعه توسط ذرات، در فرآیند برش آب همراه با ذرات ساینده باشد، با افزایش سرعت پیشروی در حقیقت انرژی بر واحد طول کاهش یافته و ذرات برخورد کرده بیشتر از قسمت‌های نزدیک به سطح قطعه، براده‌برداری می‌نمایند که در نتیجه آن شیب شکاف برش افزایش خواهد یافت.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که سرعت پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی انحراف شیار دارد اما تأثیر آن سمت و سوی مشخصی را بر روی انحراف شیار نشان نمی‌دهد. این امر را می‌توان با دلایل ارائه شده توسط هوچنگ و چانگ توجیه نمود. با افزایش عمق برش تأثیر سرعت پیشروی افزایش می‌یابد اما زمانی که عمق برش از حد معینی بیشتر شود فشار جت، سرعت پیشروی و اندازه ذرات ساینده تأثیر یکسانی بر روی انحراف برش خواهند داشت[20]. با افزایش فشار آب انحراف شیار نیز افزایش پیدا می‌کند. در این حالت، عرض بالای شکاف برش افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش انحراف شیار نیز می‌شود. دلیل این امر این است که افزایش فشار منجر به افزایش پهنای موثر جت آب می‌شود که سبب گردیده عرض بالای شکاف برش افزایش یابد.

تحلیل نتایج آزمایش نشان می‌دهد که پارامترهای ورودی دیگر همچون فاصله نازل تا سطح قطعه و نرخ ریزش ذرات ساینده تاثیر قابل توجهی بر روی انحراف شیار برش نداشته‌اند. اثرات پارامترها بر روی مشخصه‌های هندسه شکاف برش در شکل 6 نشان داده شده است.

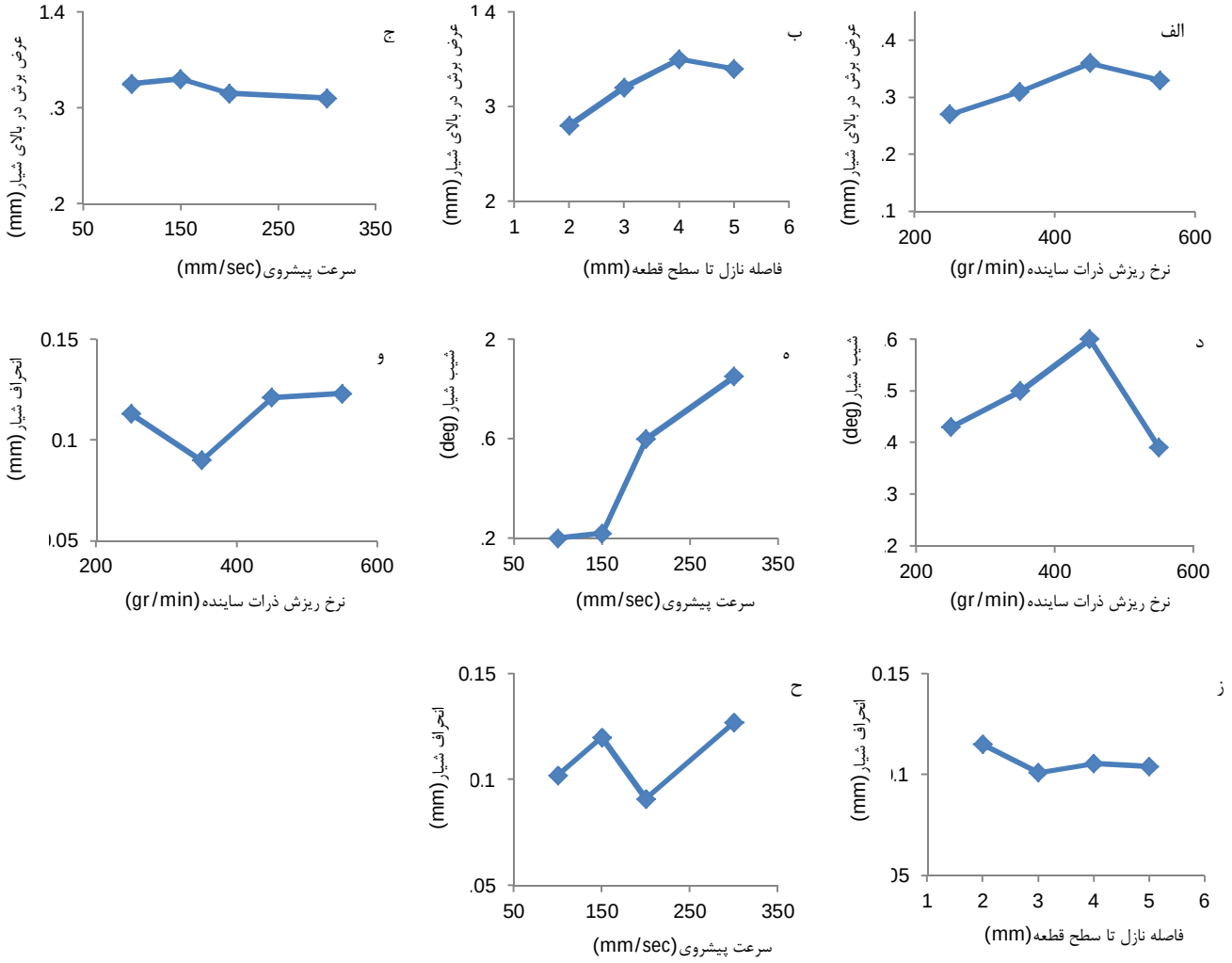
5- نتیجه‌گیری

از آنجا که ماشینکاری ماده‌ای مانند تیتانیوم با مشکلاتی همراه است و تیتانیوم از زمره مواد سخت‌برش محسوب می‌گردد، به منظور بهبود مشخصات هندسه شکاف برش و کاهش ماشینکاری ثانویه در فرآیند برش آب همراه با ذرات ساینده آزمایش‌هایی طراحی و انجام گردید. در این پژوهش، به منظور دستیابی به مشخصه‌های هندسه شکاف برش مطلوب، برشکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V توسط فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده با استفاده از روش ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی بهینه‌سازی گردید. بهینه سازی بر اساس به حداقل رساندن پهنای بالا شکاف برش، شیب شکاف برش و انحراف شکاف برش با توجه به پارامترهای فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده انجام گرفت. پارامترهای فشار جت آب، سرعت پیشروی، نرخ ریزش ذرات ساینده و فاصله نازل تا سطح قطعه کار به عنوان

جدول 6 آنالیز واریانس داده‌های هندسه شکاف برش

	پارامتر	m (gr/min)	d (mm)	p (bar)	v (mm/min)
بالای شیار	آنالیز واریانس داده‌های عرض برش در				
	درجه آزادی	3	3	1	3
	میانگین مربعات (MS)	0/01098	0/00640	0/00475	0/00056
	مجموع مربعات (SS)	0/03293	0/01921	0/00475	0/00168
	آزمون F	4/13	2/03	1/39	0/15
شیب شیار	آنالیز واریانس داده‌های				
	میانگین مربعات (MS)	0/139	0/173	0/122	0/973
	مجموع مربعات (SS)	0/416	0/519	0/122	2/918
	آزمون F	0/65	0/83	0/58	7/185
انحراف شیار	آنالیز واریانس داده‌های				
	میانگین مربعات (MS)	0/00202	0/00037	0/00157	0/00226
	مجموع مربعات (SS)	0/00606	0/00110	0/00157	0/00679
	آزمون F	0/99	0/17	0/76	1/13

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]



شکل 6 الف- اثر نرخ ریزش ذرات ساینده بر روی عرض برش در بالای شیار ب- اثر فاصله نازل تا سطح قطعه بر روی عرض برش در بالای شیار ج- اثر سرعت پیشروی بر روی عرض برش در بالای شیار د- اثر نرخ ریزش ذرات ساینده بر روی شیب شیار ه- اثر سرعت پیشروی بر روی شیب شیار و- اثر نرخ ریزش ذرات ساینده بر روی انحراف شیار ز- اثر فاصله نازل تا سطح قطعه بر روی انحراف شیار ح- اثر سرعت پیشروی بر روی انحراف شیار

پارامترهای موثر بر روی مشخصه‌های هندسه شکاف برش در برشکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V توسط جت آب همراه با ذرات ساینده انتخاب شدند. سطوح بهینه هر پارامتر با توجه به بیشترین میانگین شاخص تمام اجزای اصلی‌ها، برای فشار آب 3600bar، سرعت پیشروی 300mm/min، نرخ ریزش ذرات ساینده 550gr/min و فاصله نازل تا سطح قطعه 2mm می‌باشد. با بکارگیری سطوح منتجه از الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی در فرآیند برشکاری با جت آب به همراه ذرات ساینده، مقادیر به دست آمده از آزمایش برای پهنای بالای شکاف برش، شیب شکاف برش و انحراف شکاف به ترتیب 1/14mm، 0/683° و 0/013mm می‌باشد.

- پارامتر نرخ ریزش ذرات ساینده بیشترین تأثیر را بر روی عرض بالای برش دارد و افزایش آن باعث افزایش پهنای شکاف برش می‌گردد.

- با توجه به نتایج آزمایش‌ها و تحلیل صورت گرفته سرعت پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی شیب شکاف برش داشته و افزایش آن باعث افزایش شیب شکاف برش خواهد گردید.

- بر اساس تحلیل صورت پذیرفته بر روی نتایج برای دستیابی به کیفیت مطلوب مشخصه‌های هندسه شکاف برش باید از فشار بالای جت آب استفاده نمود.

- همچنین تحلیل نتایج نشان می‌دهد که فاصله نازل تا سطح قطعه کار برای دستیابی به این مهم باید در کوتاه‌ترین فاصله ممکن(2mm) قرار داشته باشد.

بهبود حاصل شده در نتایج آزمایش نشان از صحت کاربرد بهینه‌سازی به روش ترکیبی تاگوچی و تجزیه و تحلیل اجزای اصلی در این فرآیند دارد. نتایج سطوح پیشنهاد شده برای دستیابی به مقادیر بهینه با تحلیل‌های صورت پذیرفته بر روی نتایج هم‌خوانی قابل قبولی دارد.

6- مراجع

[1] J. Rozario Jegaraj, N. Ramesh Babu, A soft computing approach for controlling the quality of cut with abrasive water jet cutting system experiencing orifice and focusing tube wear, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, No. 1, pp. 217–227, 2007.

[2] A. Kharagpur, Non conventional machining, lesson 37, water jet and abrasive water jet machining, *Available at works.bepress.com, 2012.*

[3] ASM Handbook, *ASM International*, vol. 14, pp. 745-755, 2005.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]

[4] M. Hashish, Optimization factors in abrasive water jet machining, *ASME J. Eng. Ind,* Vol. 113, No. 1, pp. 29–37, 1991.
[5] P.H. Shipway, G. Fowler, I.R. Pashby, Characteristics of the surface of titanium alloy following milling with abrasive waterjet, *wear,* Vol. 258, No. 4, pp. 123-132, 2005.
[6] A.K. Dubey, V. Yadava, Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based superalloy component analysis, *Optics and laser engineering,* Vol. 46, No. 2, pp. 124-132, 2008.
[7] D. S. Srinivasu, N. Ramesh Babu, A neuro-genetic approach for selection of process parameters in abrasive water jet cutting considering variation in diameter of focusing nozzle, *Applied Soft Computing,* Vol. 8, No. 1, pp. 809–819, 2008.
[8] P.S. Chakravarthy, N. Ramesh Babu, A hybrid approach for selection of optimal process parameters in abrasive waterjet cutting, *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 214, No. 9, pp. 781-791, 2000.
[9] M. Dittrich, M. Dixa, M. Kuhl, B. Palumbo, F. Tagliaferria, Process Analysis of Water Abrasive Fine Jet Structuring of Ceramic Surfaces via Design of Experiment, *6th CIRP International Conference on High Performance Cutting,* 2014.
[10] M. Ramulu, D. Arola, The influence of abrasive waterjet cutting conditions on the surface quality of graphite/epoxy laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 34, No. 3, pp.295-313, 1996.
[11] H. Amirabadi, J. Ashoori, F. Jafarian, Optimising the Abrasive Water Jet Cutting of Glass Using Artificial Neural Network and Genetic algorithm, *Semnan modeling journal,* Vol. 8, No. 23, pp. 25-35, 2011. (In persian)
[12] H. Amirabadi, K. Khalili, A. Foorginejad, J. Ashoori, Modeling of abrasive water-jet cutting of glass using artificial neural network and optimization of surface roughness using firefly algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, No. 8, pp. 123-134, 2013. (In persian)
[13] U. Caydas, A. Hascalık, A study on surface roughness in abrasive water jet machining process using artificial neural networks and regression analysis method, *journal of materials processing technology,* Vol. 202, No. 1, pp. 574–582, 2008.
[14] M. Hashish, M. Plessis, Prediction equation relation high velocity jet cutting performance to stand off distance and multipasses, *Journal of Engineering for industry,*Vol. 101,No.3, pp. 311-318, 1979.
[15] E. Ezugwu, Z. Wang, Titanium alloy and their machinability a review, *Journal of materials processing technology,* Vol. 68, No. 3, pp. 262-274, 1997.
[16] C.P. Fung, P.C. Chen, Multi response optimization in friction properties of PBT composite using taguchi method and principal component analysis, *Journal of materials processing technology,* Vol. 170, No 3, pp. 602-612, 2005.
[17] J. Prasanna, L. Karunamoorthy, M. Venkat Raman, Sai Prashanth, D. Raj Chordia, Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti–6Al–4V using Taguchi and grey relational analysis, *Measurement,* Vol. 48, No. 1, pp. 346–354, 2014.
[18] R. Lomax, *statistical concepts: a second course,* 2007.
[19] Y. Chung, E.S. Geskin, "Prediction of the geometry of kerf created in the course of abrasive waterjet machining of ductile materials", *International Conference on Jet Cutting Technology,* 1992, pp. 525-541.
[20] H. Hocheng, K.R. Chang, Material removal analysis in abrasive water jet cutting of ceramic plate, *Journal of Engineering for industry,* pp. 287-304, 1994.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.16.5]