

بکارگیری الگوریتم تبرید تدریجی در تحلیل و طراحی بهین فرآیند جت آب در برش کاری فولادهای آلیاژی

نقی فتحی خراسانی^۱، مرتضی کریمی علی آباد^۲، فرهاد کلاهان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

فولادهای آلیاژی به دلیل سختی زیاد از جمله موادی هستند که با روش های سنتی قابل ماشینکاری نیستند. از طرف دیگر زمان ماشینکاری و کیفیت سطح قطعات از پارامترهای مهم در کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری تولید می باشد. فرآیند برش با آب یا جت آب، بدلیل ویژگی های منحصر بفرد، برای برشکاری مواد سخت با کیفیت سطح بالا بسیار مناسب است. هدف اصلی این پروژه، تحلیل و طراحی بهین فرآیند جت آب در برشکاری مواد سخت از جمله فولادهای آلیاژی است. در این راستا با استفاده از دو روش تاگوچی و ماتریس بهینه، طراحی آزمایشات صورت گرفت. پارامترهای نرخ ذرات ساینده، فشار، سرعت پیشروی و فاصله نازل تا قطعه کار به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند و زبری سطح برش و هزینه نهایی به عنوان مشخصه های کیفی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور با استفاده از الگوریتم SA، با قید زبری سطح ۶ میکرون متر، پارامترهای تنظیمی برای کمترین هزینه، تعیین شدند.

واژگان کلیدی: واترجت، فولادهای آلیاژی، الگوریتم تبرید تدریجی

مقدمه

تغییرات چشمگیری در دنیای تولید در حال شکل گیری است. این تغییرات تأثیر بسزایی در زندگی بشر و جامعه صنعتی خواهد داشت. در صنعت امروزی کاربردهای مواد ویژه و آلیاژهای نامتعارف رو به گسترش است. مواد، دیگر در شکل طبیعی و تغییر شکل اندک کاربرد چندانی ندارند. از آنجا که تنوع و پیچیدگی های محصولات ساخت بشر رو به افزایش است، بنابراین نیاز به دستگاه ها و تجهیزاتی که بتواند جوابگوی این نیازها باشد رو به افزایش است. در ۴۰ سال گذشته فرآیندها نیز همانند مواد رشد و توسعه یافتند. مواد جدید با کمک فرآیندهای اخیر با کارایی بهتر و ضایعات کمتری مورد استفاده قرار می گیرند.

برای بالا بردن کیفیت تولید و کاهش هزینه ها بطور همزمان می بایست فرآیندها در حین تولید بهینه سازی شوند. بطور خاص در روش های ماشین کاری، هدف اصلی را می توان تنظیم صحیح و دقیق مقادیر هر یک از پارامترهای ورودی جهت نیل به محصول با کیفیت و کمیت مطلوب دانست. در رویکردهای سنتی، تنظیم مناسب مقادیر پارامتر و عوامل تولیدی عموماً بصورت تجربی و بر اساس روش های مبتنی بر سعی و خطا انجام می گرفته است. اما اینگونه روش ها عمدتاً بسیار پرهزینه و غیردقیق بوده و باعث افت کیفیت و کاهش راندمان تجهیزات می شوند. بنابراین لازم است با بکارگیری روش های علمی، رابطه ی دقیق بین ورودی ها و خروجی های فرآیند تولیدی مورد نظر را بخوبی تبیین نمود. پس از تعیین نوع و میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی، امکان تعیین سطوح بهینه آنها برای نیل به محصول خروجی مورد نظر فراهم می شود. موضوع پروژه حاضر نیز در راستای همین نیاز عمومی تعریف و اجرا شده است.

برشکاری جت آب ساینده^۱ به طور گسترده ای در صنایع مختلف به کار برده می شود. از جمله مزایای فرآیند جت آب ساینده، عدم ایجاد تنش های حرارتی، تطبیق پذیری و انعطاف پذیری بالا، نیروی برش بسیار کم و سرعت برش بسیار بالا، برای ماشین کاری مواد سخت می باشد که در اکثر شرکت ها استفاده می شود. از طرف دیگر زمان ماشین کاری و کیفیت سطح قطعات از پارامترهای مهم در کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری تولید می باشد. بنابراین در این تحقیق به بررسی فرآیند جت آب ساینده به منظور افزایش کیفیت سطح و کاهش هزینه، پرداخته شده است.

قطعات مورد استفاده در این پروژه، مربوط به پره ی پمپ های پره ای می باشد. این قطعات که تا کنون در فرآیندهای سنتی براده برداری می شده اند، فرآیند طولانی و هزینه بری را طی می کردند تا به مرحله ظهور برسند. بدین صورت که ابتدا تسمه ها سوراخ کاری می شدند سپس با فرزکاری اولیه اندازه می گشتند و در نهایت تعداد ۱۰۰ عدد قطعه به صورت مشکل و زمان بر باید روی قیدوبند بسته می شدند تا با گیره بندی زمان بر این کار انجام شود که اگر یک تسمه اشتباه بسته می شد، باید کل پیچ ها را باز کرد و دوباره بعد از تمیزکاری آنها را بست. همان طور که در ملاحظه می شود، تک تک تسمه ها را باید درون قیدوبند قرار داد و قبل از آن باید از هرگونه براده پاکیزه گردد - زیرا هرگونه وجود براده زیر قطعات باعث قیدبندی نامناسب می شود- که خود همین امر زمان بر است. از این رو برای کاهش زمان ماشین کاری انجام این امر ضروری است.

¹ Abrasive Water jet

اما این فرآیندها را می توان با یک مرحله برش کاری با جت آب ساینده، علاوه بر کاهش هزینه ها، زمان از دست رفته را نیز جبران کرد. ضرورت این تحقیق در یافتن سطوح مناسب عوامل موثر در برش کاری برای ایجاد کیفیت سطح مطلوب و کاهش هزینه برش کاری می باشد. هدف از این تحقیق یافتن سطوح مناسب عوامل مؤثر در برش کاری برای ایجاد کیفیت سطح مطلوب و کاهش هزینه برش کاری می باشد. همچنین بدست آوردن رابطه ای بین پارامترهای ورودی و خروجی های مورد نظر ماست.



شکل ۱: کاتریج و پره پمپ مورد نظر

مروری بر تحقیقات انجام شده

لئو و همکارانش (Leo,1998) برای فرآیند پوشش زدایی با جت آب یک مدل سازی ریاضی انجام دادند و آن ها ادعای خود را با انجام آزمایش های تجربی تأیید نمودند. آن ها در این فرآیند جت آب را ساکن و عمود بر سطح قطعه کار در نظر گرفتند. آن ها یک مدل تحلیلی برای عرض پوشش زدایی ارائه نمودند و همچنین عرض پوشش زدایی را تابعی از فاصله نازل تا قطعه کار، فشار جت آب و شعاع نازل در نظر گرفتند. سپس یک رابطه بهینه ای را بین مقدار بحرانی فاصله نازل تا قطعه کار و مقدار بیسینه ی عرض پوشش زدایی بدست آوردند.

آکورت و همکارانش (Akkurt,2004) برای فلزات مختلفی از جمله آلومینیوم خالص، آلیاژ آلومینیوم (AL-6061)، برنج، فولاد (AISI-1030) و فولاد زنگ نزن (AISI-304) زبری سطح را در ضخامت های ۵ و ۲۰ میلیمتر بررسی نمودند. آن ها دریافتند که فشار جت، با کاهش ضخامت قطعه، تأثیر منفی بر روی کیفیت سطح می گذارد و نتیجه گرفتند برنج و فولاد کیفیت پایین تری نسبت به آلومینیوم در ضخامت های پایین دارند. همچنین دریافتند که کاهش سرعت باعث کاهش کیفیت سطح در قطعات فولاد زنگ نزن با ضخامت ۲۰ میلیمتر در مقایسه با دیگر نمونه ها با همین ضخامت گردید.

کواسویک و فانک (Kovacevic,1994) از چهار پارامتر به عنوان ورودی، که شامل فشار جت آب، سرعت حرکت جت، دبی ذرات ساییده و قطر داخلی نازل می باشد. برای مدل نمودن فرآیند جت آب ساییده، با رویکرد منطق فازی استفاده کردند.

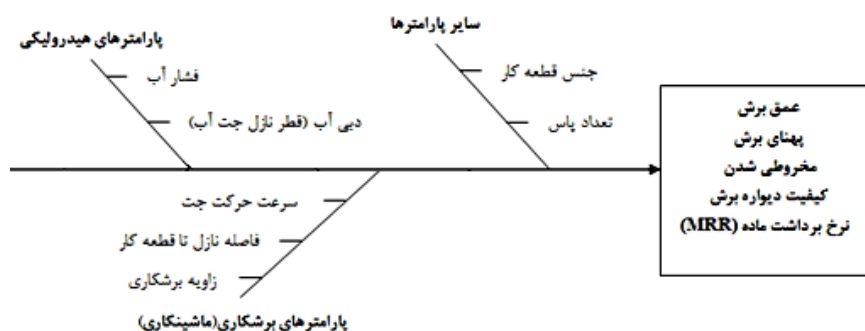
چاکراواری و بابو (Chakravarthy,1999) برای فرآیند جت آب ساییده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و منطق فازی برای انتخاب بهینه سه پارامتر فشار جت آب، سرعت حرکت جت و دبی ذرات ساییده استفاده نمودند. از الگوریتم ژنتیک برای تولید یک مجموعه از رشته (کروموزوم) جواب های اولیه استفاده گردید. نقش منطق فازی، پیش بینی پارامتری عکس برش بر اساس جواهرای اولیه تولید شده بوده است. سپس عمق برشی را بر اساس عمق برش مطلوب و یک خطای ممکن پیش بینی نمودند.

لیو و همکارانش (Liu,2014) در رابطه با مدل سازی و بهینه سازی فرایند تراشکاری با جت آب، مطالعه نموده اند. در این مقاله سرعت پیشروی، فشار مایع، فاصله نازل تا قطعه، زاویه پاشش، سرعت سطح و نرخ ورود ماده ساییده به عنوان ورودی و کیفیت سطح و عمق نفوذ به عنوان خروجی ها مدنظر قرار گرفته اند. در این مقاله از روش Box- Behnken جهت طراحی آزمایش ها استفاده شده است و همچنین از رویه پاسخ برای بهینه سازی استفاده شده است. در پایان این تحقیق نتایج بدین گونه بیان شده اند که سرعت سطح در عمق نفوذ تقریباً بی اثر است؛ اما همین عامل، تاثیر گذارترین فاکتور در کیفیت سطح ماشین کاری شده است.

پارامترهای ورودی

پارامترهای بسیاری در ماشین کاری به کمک فرآیند جت آب تأثیرگذار می باشد. شرایط کار، تنظیمات دستگاه و جنس قطعه کار عواملی هستند که در انتخاب این پارامترها مؤثر می باشد. در بررسی اثرگذاری فاکتورها در فرآیند، با افزایش تعداد پارامترهای ورودی بازه وسیع تری از تأثیر متغیرهای مختلف بر خروجی های ماشین کاری قابل بررسی خواهد بود. اما با افزایش تعداد سطوح تغییرات هر پارامتر، تعداد حالت های ترکیب شده آن افزایش یافته و نیاز به انجام آزمایش بیشتری می باشد. همانطور که در ملاحظه می شود پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند را می توان به سه گروه اصلی تقسیم نمود که عبارتند از:

- ۱) پارامترهای ساییده: دبی ذرات ساییده، شکل و جنس ذرات ساییده و اندازه ذرات ساییده.
- ۲) پارامترهای برش کاری (ماشین کاری): سرعت حرکت نازل، فاصله ی نازل تا قطعه کار و زاویه ی برشکاری.
- ۳) پارامترهای هیدرولیکی: فشار و دبی آب.
- ۴) پارامترهای لوله متمرکز کننده: قطر و لوله ی متمرکز کننده.
- ۵) سایر پارامترهای مؤثر: تعداد پاس کاری و جنس قطعه کار.



شکل ۲: پارامترهای تأثیرگذار در ماشینکاری با استفاده از فرآیند جت آب

از بین پارامترهای ورودی توضیح داده شده، پارامترهای نرخ ذرات ساینده، فشار جت آب، سرعت پیشروی و ارتفاع نازل به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. علت انتخاب این پارامترها، محدودیت های موجود در دستگاه جت آب ساینده است.

پارامترهای خروجی

در فرآیند ماشین کاری با جت آب و جت آب ساینده پارامترهای عمق برش، هندسه برش (عرض شیار برش و شیب دار شدن شیار)، کیفیت دیواره برش و نرخ برداشت ماده (MRR) به عنوان مهمترین مشخصه های عملکردی فرآیند (خروجی ها) می باشند. از این رو کیفیت فرآیند را می توان بوسیله ی این کمیت ها مورد سنجش و ارزیابی قرار داد. با تنظیم دقیق پارامترهای ورودی و تأثیرگذار، می توان بهترین عملکرد را از فرآیند انتظار داشت. خروجی هایی که مورد نیاز ما است، زبری سطح و هزینه نهایی است. زبری سطح از آن نظر مورد توجه ما است که این قطعات بعد از برش-کاری، به مقدار کمی سنگ کاری می شوند و چنانچه زبری از مقدار ۶ میکرون متر بی شتر باشد، بعد از عملیات سنگ-کاری، مقدار زبری روی سطح خواهد ماند. از طرفی ما نیاز به زبری سطح کمتر هم نداریم. از این رو با بهینه سازی هزینه با قید گذاری زبری سطح می توان این قضیه را حل نمود.

طراحی آزمایش ها

طرح های آزمایش الگوهای ابداع شده ای هستند که برای انجام آزمایش های مقایسه ای مورد استفاده قرار می گیرند. آشنایی با این طرح ها و آشنایی با قوانین آماری دو شرط اساسی برای موفقیت در اجرای یک آزمایش می باشند. بنابراین علم طراحی آزمایش ها، علم طرح ریزی، اجرا، تجزیه و تحلیل آماری و نتیجه گیری در مورد آزمایش ها می باشد. بنابراین با انتخاب درست و بجای یک طرح آزمایشی، می توان بهترین پیش بینی را با کمترین هزینه انجام داد. ۴ پارامتر ورودی

داریم، که سه پارامتر در سه سطح و یکی از پارامترها (نرخ برش)، در دو سطح قابل تنظیم است، از طرح تاگوچی $L18$ استفاده می کنیم. در جدول جدول ۱ پارامترهای ورودی و سطوح آنها را مشاهده می کنید.

جدول ۱: پارامترها ورودی و سطوح تنظیمی

پارامترهای ورودی	واحد	سطوح تنظیمی		
		۱	۲	۳
فاصله نازل تا قطعه کار (D)	mm	۱	۲	۳
سرعت حرکت نازل (F)	mm/min	۶۰	۱۲۰	۱۸۰
فشار جت آب (p)	Psi	۲۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۴۰۰۰۰
نرخ ذرات ساینده (N)	Kg/min	۰/۰۷	۰/۱۴	---

انجام آزمایش ها و اخذ نتایج

با توجه به اهمیت انجام دقیق آزمایش ها و تأثیر آن در نتایج مقاله به منظور ایجاد ارتباط معنی دار و دقیق بین پارامترهای ورودی با متغیرهای پاسخ در فرآیند جت آب، به یک پایگاه داده تجربی از فرآیند نیاز می باشد. بنابراین لازم دانستیم در این بخش، نحوه انجام آزمایش ها و اخذ نتایج مورد بررسی قرار گرفته شود.

معرفی دستگاه جت آب بکار رفته جهت انجام آزمایش ها

دستگاه بکار رفته در این پروژه، یک دستگاه واتر جت مدل Flow 60000، ساخت شرکت Flow می باشد، که یکی از شرکت های تولید کننده دستگاه های جت آب دوبعدی و سه بعدی صاحب نام در کشور آمریکا می باشد. این دستگاه مجهز به سیستم CNC بوده و توانایی برش اشکال پیچیده را دارد. محدودی حرکتی محورهای دستگاه جت آب مورد استفاده در این پروژه در **Error! Reference source not found.** آورده شده است.

جدول ۲: محدودی حرکتی محورهای دستگاه جت آب مورد استفاده

نوع	محور X (mm)	محور Y (mm)	محور Z (mm)	زاویه دوران نازل
Flow 6000	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰	۰

قطعه کار مورد آزمایش (نمونه ها)

هدف از این پروژه، بررسی تأثیر پارامترهای دستگاه جت آب در برش قطعات فولاد آلیاژی تندبر^۲ با ضخامت ۴ میلیمتر جهت تولید پره پمپ های پره ای می باشد. از آنجا که این پره ها به مقدار انبوه مورد نیاز می باشند، بنابراین اهمیت بسیار زیادی برای شرکت مزبور دارد. بر این اساس نمونه های آزمایشی مورد نیاز به ابعاد ۲۰×۱۵۰ میلیمتر (تسمه فولادی) جهت انجام آزمایش ها، آماده گردید. شکل ۳ قطعه قبل از آزمایش و شکل ۴ قطعه آماده برای انجام آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۳: قطعه کار قبل از انجام آزمایش



شکل ۴: قطعه کار در هنگام آزمایش

² HSS

تجهیزات مورد استفاده برای اندازه گیری خروجی

پس از اتمام آزمایشات برش به کمک دستگاه جت آب، که شامل ۳۱ آزمایش می باشد، مرحله بعد اندازه گیری میزان کیفیت سطح مطلوب هر یک از این نمونه ها است. برای این کار از دستگاه ها و تجهیزاتی استفاده گردید که در ادامه بیان می شوند.

زبری سنج

زبری سنج استفاده شده برای اندازه گیری کیفیت سطح قطعات، از نوع دیجیتال با دقت 0.2 میکرون متر می باشد که در دانشکده منتظری موجود می باشد. با استفاده از مگنت پایه یک ساعت اندازه گیری غیر قابل استفاده، قطعات موقعیت دهی شدند و زبری آنها اندازه گیری می شد.

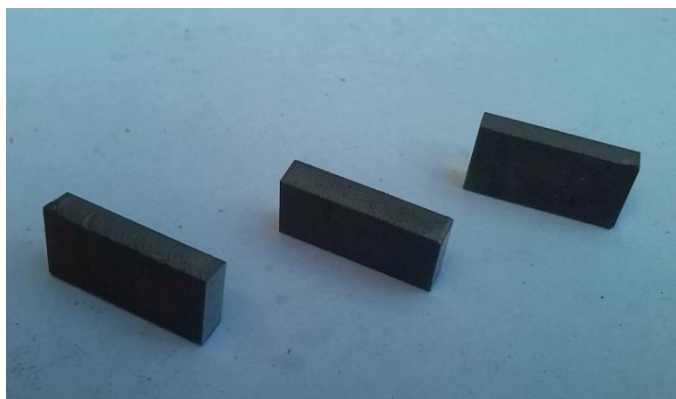


شکل ۵: اندازه گیری زبری سطح

چگونگی انجام آزمایشات

پس از انجام چندین آزمایش اولیه برای بدست آوردن سطوح پارامترهای تنظیمی، حداقل و حداکثر سطح های پارامترها بدقت تعیین شدند. سپس آزمایش ها بر اساس ماتریس طرح بدست آمده در فصل قبل انجام گردید. برای بررسی خروجی در نظر گرفته شده در این پروژه، نمونه ها با استفاده از دستگاه جت آب به فاصله ی ۱۲ میلیمتری از هم برش داده شدند (شکل ۶).

سپس با استفاده دستگاه زبری سنج، خروجی مورد نظر اندازه گرفته شد. تمام تلاش انجام گرفته در این فصل جهت بدست آوردن داده های آزمایشگاهی برای خروجی زبری سطح مطلوب، در قالب ماتریس طرح آزمایش ها بوده است. در واقع مقادیر بدست آمده در Error! Reference source not found. طراحی آزمایشات، نتایج خام و نسبت سیگنال به نویز را مشاهده می کنید. این نتایج می تواند مجموعه مناسبی برای تجزیه و تحلیل میزان اثرگذاری پارامترها در اجرای فرآیند ماشینکاری به کمک جت آب را فراهم آورد.



شکل ۶: قطعات برش خورده

جدول ۳: طراحی آزمایشات طرح تاگوچی $L18$ و نتایج بدست آمده

مقادیر نسبت S/N	پارامترهای ورودی					ردیف
	خروجی زبری سطح (میکرون متر)	ارتفاع نازل (میلیمتر)	سرعت حرکت (میلیمتر بر دقیقه)	فشار (Psi)	نرخ ذرات (گرم بر دقیقه)	
-۱۴,۶۴۷	۵,۴۰	۱	۶۰	۲۰۰۰۰	۷۰	۱
-۱۸,۳۸۱	۸,۳۰	۲	۱۲۰	۲۰۰۰۰	۷۰	۲
-۲۱,۲۱۴	۱۱,۵۰	۳	۱۸۰	۲۰۰۰۰	۷۰	۳
-۱۱,۵۹۵	۳,۸۰	۱	۶۰	۳۰۰۰۰	۷۰	۴
-۱۷,۳۸۴	۷,۴۰	۲	۱۲۰	۳۰۰۰۰	۷۰	۵
-۲۰,۹۰۶	۱۱,۱۰	۳	۱۸۰	۳۰۰۰۰	۷۰	۶
-۱۲,۴۶۵	۴,۲۰	۲	۶۰	۴۰۰۰۰	۷۰	۷
-۱۷,۷۲۹	۷,۷۰	۳	۱۲۰	۴۰۰۰۰	۷۰	۸
-۲۰,۳۴۰	۱۰,۴۰	۱	۱۸۰	۴۰۰۰۰	۷۰	۹
-۱۴,۸۰۷	۵,۵۰	۳	۶۰	۲۰۰۰۰	۱۴۰	۱۰
-۱۸,۴۸۵	۸,۴۰	۱	۱۲۰	۲۰۰۰۰	۱۴۰	۱۱
-۱۷,۰۲۵	۷,۱۰	۲	۱۸۰	۲۰۰۰۰	۱۴۰	۱۲
-۱۳,۸۰۳	۴,۹۰	۲	۶۰	۳۰۰۰۰	۱۴۰	۱۳
-۱۴,۴۸۵	۵,۳۰	۳	۱۲۰	۳۰۰۰۰	۱۴۰	۱۴
-۲۱,۸۶۸	۱۲,۴۰	۱	۱۸۰	۳۰۰۰۰	۱۴۰	۱۵
-۱۳,۹۷۹	۵,۰۰	۳	۶۰	۴۰۰۰۰	۱۴۰	۱۶
-۱۶,۹۰۲	۷,۰۰	۱	۱۲۰	۴۰۰۰۰	۱۴۰	۱۷
-۱۵,۴۱۷	۵,۹۰	۲	۱۸۰	۴۰۰۰۰	۱۴۰	۱۸

آنالیز واریانس

بررسی و شناخت میزان تاثیر پارامترهای ماشین کاری بر زبری سطوح، دارای اهمیت بالایی است. با دانستن میزان تاثیر گذاری پارامترهای ماشین کاری بر نتایج می توان با تغییر عوامل تاثیر گذار، نتیجه یا خروجی را کنترل کرده و از تغییر سطوح پارامترهای کم تاثیر جلوگیری به عمل آورد.

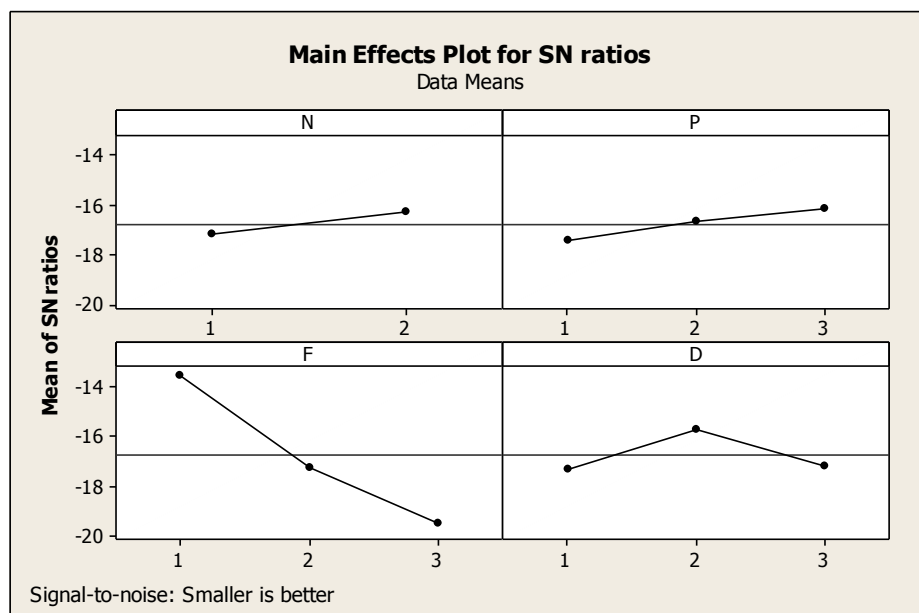
برای اطلاع از میزان تاثیر پارامترهای برش کاری بر زبری سطح، از ابزار سودمند آماری به نام آنالیز واریانس استفاده شده است. به کمک این روش می توان میزان تاثیر و یا بی اثر بودن پارامتر مورد آزمایش بر خروجی را تعیین کرد. صرف نظر از روابط پیچیده آماری، در تحلیل واریانس سطحی را برای معنی داری تعریف می کنند که مقدار آن در اکثر تحلیل های مهندسی برابر ۰/۰۵ می باشد. جدول آنالیز واریانس نیز پس از تحلیل نتایج به P-Value خواهد داد که شاخص برای تعیین اثر گذاری عوامل بر خروجی هاست. اگر مقدار p وارد شده در جدول تحلیل واریانس کوچکتر از سطح معنی داری تعیین شده (۰/۰۵) بدست آید، آن پارامتر بر روی خروجی مورد نظر تاثیر گذار خواهد بود. هم چنین اگر مقدار P بدست آمده از تحلیل واریانس بزرگتر از ۰/۰۵ باشد، آن پارامتر بر خروجی بی تاثیر یا با تاثیر قابل صرف نظر کردن خواهد بود. در ضمن با استفاده از آنالیز واریانس می توان تخمین خوبی از شدت تاثیر گذاری پارامترها بر خروجی بدست آورد. این کار با تقسیم F-Value هرمتغیر بر F-Value کل بدست می آید که نشان دهنده میزان مشارکت متغیر در پاسخ است. در آنالیز واریانس مربوط به آزمایش ها را مشاهده می کنید.

جدول ۴: آنالیز واریانس طرح تاگوچی

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
N	۱	۳/۴۶	۳/۴۶	۳/۴۶	۰/۹۸	۰/۳۴۶
P	۲	۵/۰۲۴	۵/۰۲۴	۲/۵۱۲	۰/۷۱	۰/۵۱۴
F	۲	۱۰۶/۹۴۶	۱۰۶/۹۴۶	۵۳/۴۷	۱۵/۱۳	۰/۰۰۱
D	۲	۹/۰۵۱	۹/۰۵۱	۴/۵۲۵	۱/۲۸	۰/۳۲
Residual Error	۱۰	۳۵/۳۳۲	۳۵/۳۳۲	۳/۵۳۳		
Total	۱۷	۱۵۹/۸۱۲				

تغییرات نسبت S/N برای زبری سطح

می توان خلاصه و چکیده تحلیل آزمایش را در نمودارهای شکل فلان مشاهده کرد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می شود که به ترتیب سرعت پیشروی، فشار، ارتفاع نازل و نرخ ذرات بیشترین تاثیر را بر زبری سطح دارند. نمودار نشان می دهد که ارتفاع نازل باید در سطح ۲ قرار گیرد تا بهترین کیفیت سطح داشته باشیم. همچنین پیشروی در کمترین سطح و فشار جت آب و نرخ ذرات ساینده در بیشترین سطح قرار داشته باشند.



شکل ۷: نمودار تغییرات نسبت S/N برای زبری

مدل سازی

در این قسمت به منظور مدل سازی ریاضی فرآیند، توابع رگرسیونی بر داده های تجربی حاصل از آزمایش ها برازش داده شده اند. سپس با استفاده از تحلیل های آماری و آنالیز واریانس، مدل های اصلاح که انطباق بیشتری بر فرآیند واقعی دارند، انتخاب شده اند. مدل درجه دو بهترین برازش را نسبت به دیگر مدل ها دارا است. رابطه (۱)، مدل اصلاح رگرسیون زبری سطح را نشان می دهد. همچنین رابطه (۲) معادله هزینه را بیان می کند. با توجه به اینکه ارتفاع نازل در هزینه تأثیری ندارد،

از این رو در معادله ی زیری سطح، به جای پارامتر H عدد 2mm را قرار می دهیم. این بدان علت است که در تحلیل تاگوچی، مقدار بهینه برای ارتفاع نازل را سطح ۲ معرفی کرده بود.

$$Ra = 3.30867 + 0.0713603 F + 0.000137927 F * F - 0.029598 F * D - 4.58391e-009 P * P + 1.68912 D * D - 0.131621 N * F + 0.00170613 N * P - 33.1355 N * D \quad (1)$$

$$Cost = (400/F) * ((850 + (3 * ((P/10000) - 1) * 300) + (N * 1000)) \quad (2)$$

قید مسئله

با توجه به اینکه زبری سطح برای ما مهم است، از این رو باید مقدار دلخواه خودمان را به عنوان قید قرار دهیم تا نه هزینه را متقبل شویم و نه زبری نامطلوب بدست آوریم. با توجه به کاربرد ما زبری مطلوب، ۶ میکرون متر است.

بازه و گام تغییرات

با توجه به مقدار حساسیت قضیه و دستگاه به پارامترها، مقادیر گام انتخاب می شوند.

جدول ۵: بازه و گام پارامترها

نماد در فرمول	گام	بازه	پارامترها
F	۱	۱۸۰-۶۰	سرعت حرکت نازل
P	۵۰۰	۴۰۰۰۰-۲۰۰۰۰	فشار جت آب
N	۰,۰۱	۰,۱۴-۰,۰۷	نرخ ذرات ساینده

بهینه سازی

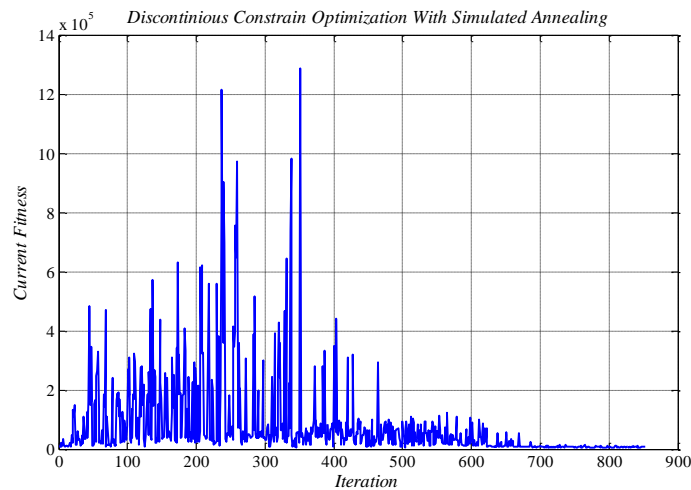
الگوریتم تبرید تدریجی یکی از بهترین الگوریتم های فراابتکاری است که جهت بهینه سازی توابع استفاده می شود. با استفاده از این الگوریتم و لحاظ کردن تابع قید (زبری سطح)، موفق به دستیابی به سطوح بهینه پارامترها برای نیل به کمترین هزینه با کیفیت سطح ۶ میکرون متر شده ایم. در جدول ۶ مقادیر بهینه پیشنهادی الگوریتم را مشاهده می کنید. این

الگوریتم در نرم افزار *MATLAB* ۲۰۱۰ انجام شد. با توجه به جدول ۶ متوجه می شویم کمترین هزینه ممکن برای انجام این فرآیند، مقدار ۴۹۴۱ تومان می باشد.

جدول ۶: تعیین مقدار مطلوب تابع هزینه (با قید زبری سطح) با الگوریتم تبرید تدریجی

پارامترهای فرآیند	ورودی ها			خروجی
	P (psi)	F (mm/min)	N (Kg/min)	Tc (toman)
مقادیر پیشنهادی الگوریتم	۲۰۰۰۰	۱۵۳	۰/۱۴	۴۹۴۱

همگرایی جواب ها به سمت مجموعه ای مشابه از مقادیر پارامترهای تنظیمی، مبین همگرایی الگوریتم به سمت بهترین جواب ممکن، برای داشتن کمترین هزینه است. نتایج بدست آمده برای هزینه ماشینکاری در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود الگوریتم بعد از ۸۵۲ تکرار همگرا شده است.



شکل ۸: نمودار همگرایی تابع هزینه (با قید زبری سطح) در الگوریتم تبرید تدریجی

از آنجا که دقت جواب های حاصله در مسائل بهینه سازی، به پارامترهای الگوریتم SA وابسته می باشد، نتایج ارائه شده از فرآیند بهینه سازی، بر اساس بهترین مجموعه از پارامترهای تنظیمی الگوریتم می باشند. این مجموعه از پارامترها، که در طی چندین اجرای آزمایشی که بر اساس مراحل قبل بدست آمده اند، در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: پارامترهای تنظیمی الگوریتم SA

معیار توقف	دمای اولیه	ضریب تغییر پارامتر کنترل a
زمان	۱۰۰۰۰۰۰۰	۰/۹۹

آزمایش های تأییدی

لازم است جهت ارزیابی صحت مقدار پیش بینی شده زبری سطح توسط الگوریتم SA، یک آزمایش تأییدی انجام می-گیرد. براین اساس نمونه جدیدی آماده گردید و آزمایش دیگری مطابق با پارامترهای پیشنهادی الگوریتم، روی دستگاه جت آب ساینده، تنظیم گردید. نتایج حاصل از آزمایش های تأییدی در جدول ۸ آورده شده و مقادیر واقعی خروجی ها با مقادیر پیش بینی شده مقایسه گردیده است.

جدول ۸: مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم تبرید تدریجی و مقادیر واقعی

درصد خطا	مقادیر واقعی حاصل از آزمایش (زبری)	مقادیر پیش بینی شده (زبری)
۵/۲٪	۶/۲	۶/۰۰

جدول ۸ نشان می دهد روش پیشنهادی تا حد بسیار زیادی قادر به تخمین سطح مناسب پارامترها برای رسیدن به خروجی مورد نظر است. با توجه به نتایج حاصل و خطاهای بدست آمده، می توان الگوریتم تبرید تدریجی را الگوریتم مناسبی برای بهینه سازی مسائل مربوط به فرآیند جت آب ساینده و حتی جت آب دانست.

نتیجه گیری

بررسی پژوهش های مرتبط نشان می دهد علی رغم گستردگی تحقیقات در اغلب موارد به آن ها یک یا چند مورد از اشکالات زیر وارد است. در اغلب این تحقیقات به علت موردی بودن تحقیق، توجه به تأثیر تنها یک پارامتر بر خروجی مورد نظر و عدم بررسی تأثیر چند فاکتور به طور هم زمان بر مشخصه ی خروجی مورد تحقیق، عدم توجه به مدل سازی رگرسیونی با توجه به سرعت و دقت آن در پیش بینی خروجی ها، عدم مقایسه ی روش های مختلف مدل سازی و یا برآزش مدل های مختلف و مقایسه ی آن ها با سایر مدل ها، عدم وجود و یا کافی نبودن داده ای تجربی برای انجام تحلیل و پابین بودن دقت مدل ها، عدم توجه به بهینه سازی بعد از استخراج مدل، کافی نبودن اطلاعات موجود جهت ماشین کاری جنس مورد تحقیق و عدم دخالت هزینه تمام شده در بهینه سازی، اشکالاتی است که سعی شده در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن این موارد بهترین نتیجه حاصل گردد. با توجه به موارد ذکر شده و بررسی پژوهش های قبلی، در انجام این پایان نامه تلاش شده با نگاهی کاربردی و همزمان به مباحثی چون: شناخت، مدل سازی و بهینه سازی فرآیند ماشین کاری با جت-

آب ساینده، بر روی فولاد آلیاژی تندبر (HSS)، ضمن بومی سازی رویکرد، به جنبه ی کاربردی و عملی موضوع، پرداخته شود. زیرا این پروژه برای نویسندگان مقاله، جنبه ی بسیار کاربردی دارد.

در ادامه می توان این راه را ادامه داد. از جمله پیشنهادهایی که می توان داد، می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- کاربرد رویکر ارائه شده برای فولادهای دیگر (کاربردی)
- به کارگیری سایر پارامترهای فرآیند بر خروجی های ماشینکاری از قبیل: زاویه برخورد جت، جنس و اندازه ذرات ساینده، تعداد پاس کاری و...

منابع

- M.-C. Leu, P. Meng, E. Geskin, and L. Tismeneskiy, "Mathematical modeling and experimental verification of stationary waterjet cleaning process," *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 120, pp. 571-579, 1998.
- A. Akkurt, M. K. Kulekci, U. Seker, and F. Ercan, "Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 147, pp. 389-396, 2004.
- R. Kovacevic and M. Fang, "Modeling of the influence of the abrasive waterjet cutting parameters on the depth of cut based on fuzzy rules," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 34, pp. 55-72, 1994.
- P. Sitarama Chakravarthy and N. Ramesh Babu, "A new approach for selection of optimal process parameters in abrasive water jet cutting," *Materials and manufacturing processes*, vol. 14, pp. 581-600, 1999.
- J. J. R. Jegaraj and N. R. Babu, "A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, pp. 1443-1450, 2005
- D. Liu, C. Huang, J. Wang, H. Zhu, P. Yao, and Z. Liu, "Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box- Behnken design," *Ceramics International*, vol. 40, pp. 7899-7908, 2014