



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۲-۱۰ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

مقاله کامل شفاهی

مقاله کامل شفاهی

مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای ماشین کاری وایرکات فولاد سردکار ۲۶۰۱ با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه

محمد صادقی اول شهر^{۱*}، امین اسماعیل زاده^۲، فرهاد کلاهان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، H.Sadeghi@ymail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این تحقیق به بررسی نحوه اثرگذاری پارامترهای ماشین کاری وایرکات بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری حجمی پرداخته شده است. به این منظور با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات (DOE) و مدل سازی ریاضی ارتباط بین پارامترهای تنظیمی و مشخصه های خروجی فرآیند، بررسی می شود. پارامترهای ورودی بررسی شده شامل شدت جریان، زمان خاموشی پالس، ولتاژ مدار باز و ولتاژ گپ است؛ که تاثیر آنها بر روی دو خروجی مذکور، توسط انواع مدل های میانجی و آنالیز واریانس (ANOVA) ارزیابی شده است. مدل های برازش شده قادرند نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح را به ترتیب با خطای قابل قبول ۶/۳٪ و ۳٪ پیش بینی نمایند. برای تعیین سطوح بهینه هر یک از خروجی ها از الگوریتم جستجوگر ممنوعه (Tabu Search)، مدل های مناسب بدست آمده و روش مینیمم - ماکزیم استفاده شده است. نتایج بهینه سازی نشان می دهند که رویکرد پیشنهادی از کارایی بسیار بالایی در حل مسئله مورد نظر برخوردار می باشد.

واژه های کلیدی: ماشین کاری وایرکات - صافی سطح - نرخ براده برداری - مدل سازی - الگوریتم جستجوگر ممنوعه



مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای ماشین کاری وایرکات فولاد سردکار ۲۶۰۱ با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه

محمد صادقی اول شهر^{۱*}، امین اسماعیل زاده^۲، فرهاد کلاهان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، H.Sadeghi@ymail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این تحقیق به بررسی نحوه اثرگذاری پارامترهای ماشین کاری وایرکات بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری حجمی پرداخته شده است. به این منظور با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات (DOE) و مدل سازی ریاضی ارتباط بین پارامترهای تنظیمی و مشخصه های خروجی فرآیند، بررسی می شود. پارامترهای ورودی بررسی شده شامل شدت جریان، زمان خاموشی پالس، ولتاژ مدار باز و ولتاژ گپ است؛ که تاثیر آنها بر روی دو خروجی مذکور، توسط انواع مدل های میانجی و آنالیز واریانس (ANOVA) ارزیابی شده است. مدل های برازش شده قادرند نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح را به ترتیب با خطای قابل قبول ۶/۳٪ و ۳٪ پیش بینی نمایند. برای تعیین سطوح بهینه هر یک از خروجی ها از الگوریتم جستجوگر ممنوعه (Tabu Search)، مدل های مناسب بدست آمده و روش مینیم - ماکزیم استفاده شده است. نتایج بهینه سازی نشان می دهند که رویکرد پیشنهادی از کارایی بسیار بالایی در حل مسئله مورد نظر برخوردار می باشد.

واژه های کلیدی: ماشینکاری وایرکات - صافی سطح - نرخ براده برداری - مدل سازی - الگوریتم جستجوگر ممنوعه.

۱- مقدمه

با پیشرفت صنعت و ظهور و بکارگیری مواد جدید، لزوم استفاده از روش های شکل دهی و ماشینکاری مدرن بیشتر می شود. در این میان روش های ماشینکاری مبتنی بر تخلیه قوس الکتریکی^۱ (EDM) از اهمیت و کاربرد روز افزونی برخوردارند. فرآیند وایرکات یکی از روش های ماشینکاری EDM است که با ایجاد جرقه های متناوب بین ابزار (سیم) و قطعه کار عمل براده برداری را انجام می دهد (شکل ۱). از آنجا که این فرآیند برای ماشینکاری مواد با سختی و استحکام بالا محدودیتی ندارد، به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله هوا و فضا، قالب سازی و دفاعی بکار گرفته می شود [۱]. روش وایرکات از جمله روش های پرهزینه ماشینکاری است. همچنین نرخ براده برداری در آن نسبتاً پایین است. استفاده از این روش تنها هنگامی مقرون بصرفه است که بکارگیری سایر روش های معمول ماشینکاری مقدور نباشد. مانند سایر روش های ماشینکاری در وایرکات نیز پارامترهای تنظیمی تاثیر زیادی بر کیفیت و سرعت ماشینکاری دارند. انتخاب نامناسب پارامترها باعث بروز مشکلاتی چون اتصال کوتاه، کیفیت نامطلوب سطح ماشین کاری شده، کاهش نرخ براده برداری و پایین آمدن بهره وری می شود. مهمترین

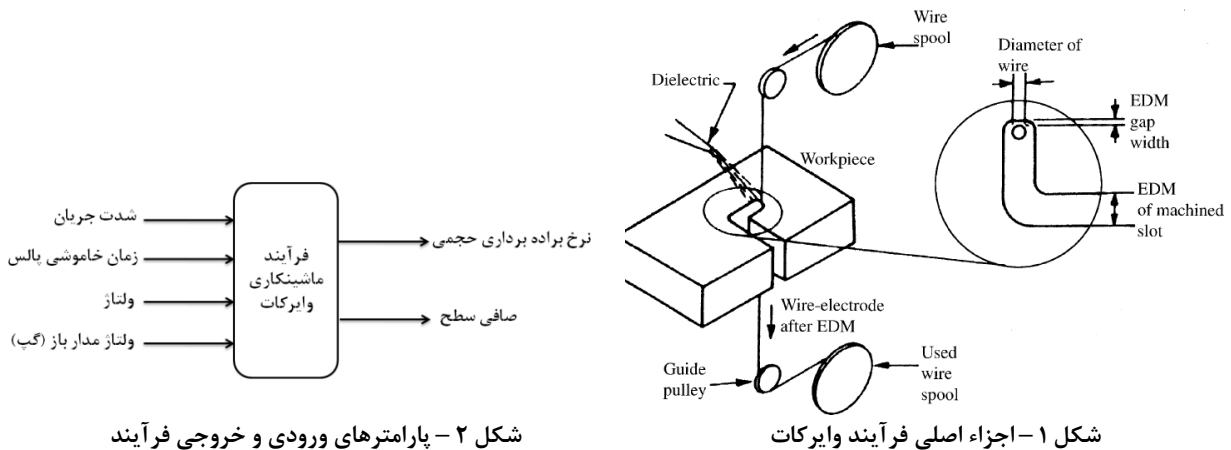
^۱. Electrical Discharge Machining (EDM)



شاخصه‌های خروجی روش وایرکات نرخ براده برداری و صافی سطح تمام شده است [۲]. این ویژگی‌ها بشدت تحت تاثیر پارامترهای تنظیمی فرآیند، شامل شدت جریان، زمان خاموشی پالس، ولتاژ مدار باز و ولتاژ گپ، قرار دارند. علی رغم انجام مطالعات گسترده توسط محققین [۳-۷]، برای بهبود این متغیرها، هنوز مسئله انتخاب پارامترهای بهینه ماشینکاری به طور کامل حل نشده است.

در سال‌های اخیر روش‌های مختلف تئوری و تجربی بمنظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند وایرکات مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا، کلاهان و همکاران [۳]، به بررسی تاثیر پارامترهای مهم فرآیند وایرکات آلیاژ تیتانیوم بر روی نرخ پیشروی و زبری سطح پرداخته‌اند. آنها با استفاده از روش مدل‌سازی رگرسیونی، مدل‌های درجه دوم و لگاریتمی را برای هر یک از خروجی‌ها استخراج نموده و سپس با استفاده از روش آنالیز واریانس، پارامترهای تاثیر گذار بر روی خروجی‌ها را مشخص نمودند. اسکات و همکاران [۴] با استفاده از روش شمارش صریح مبتنی بر تکنیک سیگنال به نویز^۱ اقدام به بهینه‌سازی صافی سطح و نرخ براده برداری نمودند. پارامتر صافی سطح و نرخ براده برداری همچنین توسط ترانگ و همکاران [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. آنان با استفاده از یک روش وزن دهی ساده، این دو متغیر را به عنوان یک تابع هدف در نظر گرفته و با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی سطوح بهینه فرآیند را معرفی کردند. اسپدینگ و همکاران [۶] در تحقیقی با استفاده از شبکه عصبی اقدام به مدل‌سازی فرآیند نمودند. آن‌ها زبری سطح، میزان موجی بودن سطح و سرعت براده برداری را به عنوان خروجی مورد توجه قرار دادند. توسان و همکاران [۷] از یک مدل آماری برای مشخص کردن پارامترهای بهینه به منظور حداقل کردن حفره‌های ایجاد شده بر روی سیم در حین کار استفاده کردند.

در تحقیقات انجام شده شرایط بهینه معرفی شده متأثر از جنس قطعه و شرایط ماشینکاری است و نمی‌توان آنها را برای سایر مواد و یا شرایط تولید مختلف مورد استفاده قرار داد. در این تحقیق برای یکی از انواع پرکاربرد فولادهای صنعتی (سردکار ۲۶۰۱)، شرایط بهینه ماشین کاری وایرکات برای رسیدن به نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح مطلوب معرفی شده است.



^۱. Signal to noise



۲- طراحی آزمایشات و اخذ داده‌های اولیه

بمنظور گردآوری داده‌های مورد نیاز، تعدادی تست بر اساس روش تاگوچی^۱ در طراحی آزمایشات^۲ در قالب یک آرایه متعامد اصلاح شده ۱۶ سطری، مطابق جدول ۱، طراحی و انجام شده است [۸]. در این روند پارامترهای جریان، زمان خاموشی پالس، ولتاژ و ولتاژ مدار باز (گپ) به عنوان ورودی و صافی سطح و نرخ براده برداری حجمی به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۲). آزمایشات بوسیله ماشین وایرکات ۵ محوره بر روی قطعه ای از جنس فولاد ابزار سردکار ۲۶۰۱ با ترکیب شیمیایی $XI6CrMoV12$ و ضخامت ۳۰ میلیمتر انجام شده است. برای ماشین کاری از سیم برنجی بدون پوشش با قطر ۰/۲۵ میلیمتر و استحکام کششی ۹۰۰ نیوتن بر میلیمتر مربع استفاده شده است. سطوح پارامترهای تنظیمی در هر آزمایش به همراه نتایج آزمایشات در جدول ۱ مشاهده می شود.

جدول ۱- سطوح پارامترهای تنظیمی و نتایج آزمایشات تجربی

پارامترها	شدت جریان	زمان خاموشی	ولتاژ	ولتاژ مدار باز	صافی سطح	نرخ براده برداری حجمی
علامت اختصاری	I	T_{off}	V	S	R_a	$VMRR$
واحد	A	μs	V	V	μm	mm^3/min
۱	۱۱	۱۴	۱۴۰	۲۸	۳/۱۶۹	۱۲/۵۵۵
۲	۱۱	۱۰	۱۳۰	۳۲	۳/۴۱۰	۱۳/۷۸۵
۳	۱۱	۸	۱۱۰	۳۰	۳/۲۲۹	۱۲/۶۴۵
۴	۱۱	۲۲	۱۲۰	۲۶	۲/۷۰۷	۷/۹۹۵
۵	۱۰	۱۴	۱۳۰	۳۰	۳/۰۱۸	۱۱/۱۰۸
۶	۱۰	۱۰	۱۴۰	۲۶	۳/۰۳۵	۱۲/۲۵۵
۷	۱۰	۸	۱۲۰	۲۸	۳/۰۴۶	۱۰/۹۱۳
۸	۱۰	۲۲	۱۱۰	۳۲	۲/۷۵۴	۶/۶۹۸
۹	۹	۱۴	۱۱۰	۲۶	۲/۴۲۱	۷/۷۲۵
۱۰	۹	۱۰	۱۲۰	۳۰	۲/۸۴۵	۸/۲۰۵
۱۱	۹	۸	۱۴۰	۳۲	۳/۲۷۰	۹/۵۹۳
۱۲	۹	۲۲	۱۳۰	۲۸	۲/۵۷۵	۶/۰۰۰
۱۳	۱۲	۱۴	۱۲۰	۳۲	۳/۴۶۲	۱۱/۰۳۳
۱۴	۱۲	۱۰	۱۱۰	۲۸	۳/۲۹۳	۱۲/۴۳۵
۱۵	۱۲	۸	۱۳۰	۲۶	۳/۵۲۸	۱۴/۲۸۸
۱۶	۱۲	۲۲	۱۴۰	۳۰	۳/۴۰۸	۸/۲۵۰

^۱ . Taguchi method^۲ . Design of experiments



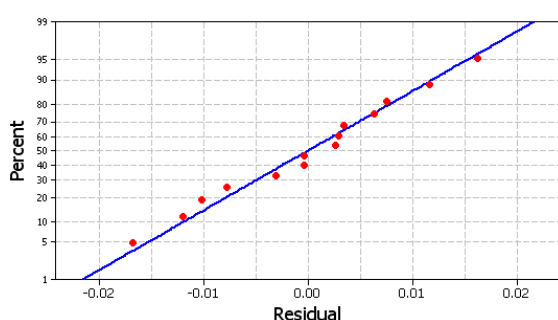
۳- مدل سازی فرآیند و آنالیز واریانس^۱

در این تحقیق از روش رگرسیون برای تعیین روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند وایرکات فولاد سردکار ۲۶۰۱ استفاده شده است. برای مدل سازی فرآیند انواع توابع ریاضی چند جمله ای درجه دوم و نمایی، بر ۱۴ مجموعه از داده های حاصل از آزمایشات برازش داده شد. این مدل ها سپس توسط روش آماری حذف گام به گام^۲ در محیط نرم افزار Minitab[®] و با سطح اطمینان^۳ ۹۵٪ اصلاح گردید. در نهایت ضرایب معادلات برای نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح استخراج شد. یکی از معیارهای انتخاب مدل ضریب همبستگی^۴ می باشد که برای هر یک از معادلات محاسبه شده است. در این میان مدل چند جمله ای دوم برای نرخ براده برداری حجمی و مدل نمایی مربوط به صافی سطح دارای ضریب همبستگی ۹۹/۹۹ درصد هستند که نشان دهنده برازش بسیار خوب این مدل ها بر داده های تجربی می باشد (جدول ۲).

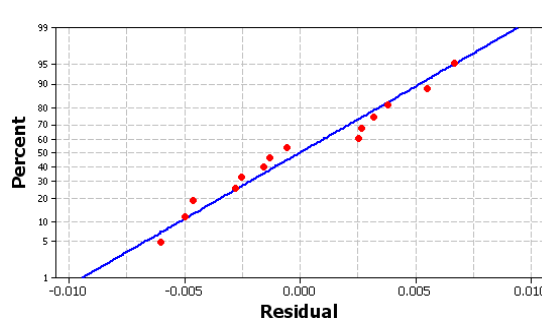
معیار دیگری که می توان برای تشخیص صحت مدل بکار گرفت، نمودار احتمال نرمال بودن داده ها و هیستوگرام باقیمانده ها است. مطابق نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده می شود که برای هر دو خروجی معادلات برازش شده، دارای توزیع نرمال مقادیر در امتداد خط راست و پراکندگی کم هستند که مؤید کیفیت خوب مدل های برازش شده می باشد.

جدول ۲- معادلات برازش شده

متغیر پاسخ	نوع مدل	معادله برازش شده	درصد همبستگی
نرخ براده برداری حجمی	چند جمله ای درجه دوم	$VMRR = 15.8 + 22.9I - 9.19S - 0.742I^2 - 0.0319T_{off}^2 + 0.19S^2 - 0.1IT_{off} - 0.00599IV - 0.143IS + 0.0132T_{off}V + 0.00188T_{off}S - 0.00220VS$	۹۹/۹۹
کیفیت سطح	نمایی	$R_a = \exp(2.22 - 0.120T_{off} + 0.523I - 0.259S - 0.00519I^2 + 0.00602S^2 - 0.000677IV - 0.00949IS + 0.000606T_{off}V + 0.00125T_{off}S + 0.000078VS)$	۹۹/۹۹



نمودار ۲- احتمال نرمال برای صافی سطح



نمودار ۱- احتمال نرمال برای نرخ براده برداری

¹. Analysis of Variance (ANOVA)

². Stepwise elimination

³. Confidence level

⁴. Correlation Coefficient



انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

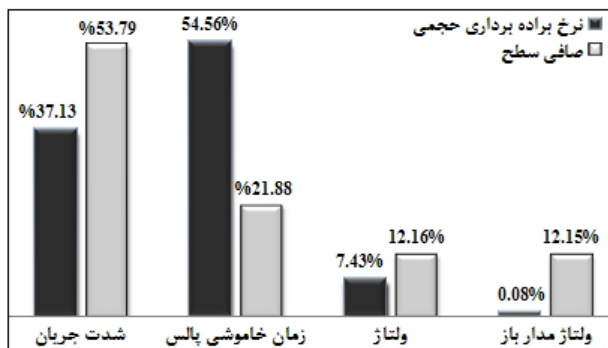
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



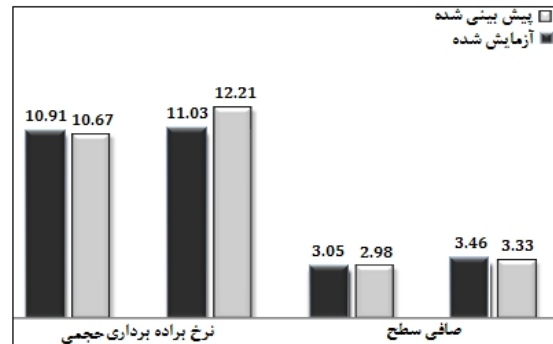
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

بمنظور صحت‌گذاری و بررسی توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی فرآیند، از نتایج آزمایشات ۷ و ۱۳ استفاده گردید (نمودار ۳). در مقایسه با آزمایشات عملی برای نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح، متوسط خطای پیش‌بینی بترتیب ۶/۳٪ و ۳٪ محاسبه گردید. با توجه به قابل قبول بودن مقدار خطا می‌توان این مدل‌ها را به عنوان مدل‌های برتر انتخاب و در مرحله بهینه‌سازی بکار گرفت.

پس از استخراج مدل‌های مناسب برای بررسی میزان تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر روی خروجی‌ها، با استفاده از روش آنالیز واریانس، درصد توزیع^۱ برای هر کدام از پارامترها مطابق نمودار ۴ محاسبه گردید. طبق این نمودار، جریان و زمان خاموشی پالس، مهمترین عوامل موثر بر روی دو خروجی هستند و از نظر آماری پارامتر ولتاژ مدار باز، با کمتر از ۱٪ مشارکت، بر روی نرخ براده برداری بی‌اثر است.

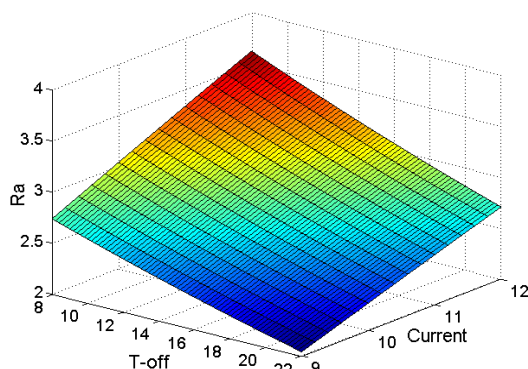


نمودار ۴ - درصد توزیع پارامترهای اصلی وایرکات

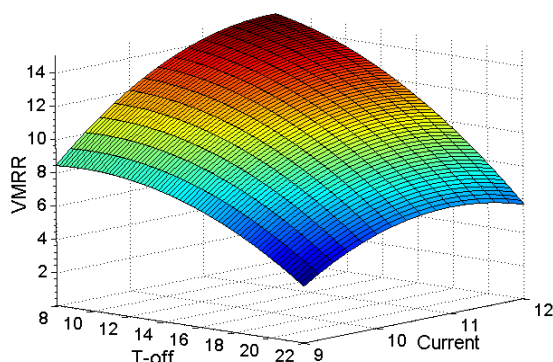


نمودار ۳ - پیش‌بینی خروجی با استفاده از مدل‌ها

با بکارگیری مدل‌های برازش شده، می‌توان اثرات متقابل پارامترهای تنظیمی مهم را بر روی خروجی‌های فرآیند تعیین نمود. به عنوان مثال، شکل‌های ۳ و ۴ بترتیب تاثیر همزمان دو پارامتر جریان و زمان خاموشی پالس را بر روی نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح، نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش جریان و کاهش زمان خاموشی پالس، نرخ براده برداری حجمی افزایش یافته و با کاهش جریان و افزایش زمان خاموشی، مقدار صافی سطح کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۴ - تخمین صافی سطح نسبت به تغییرات دو پارامتر جریان و زمان خاموشی



شکل ۳ - تخمین نرخ براده برداری نسبت به تغییرات دو پارامتر جریان و زمان خاموشی

^۱. Contribution Parentage



۴- بهینه سازی فرآیند

هدف اصلی در بسیاری از کاربردهای مهندسی تعیین مقادیر پارامترهای تنظیمی بمنظور کسب یک خروجی مطلوب است. در مورد ماشینکاری وایرکات، سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی می‌بایست بگونه‌ای تعیین شوند که نرخ براده‌برداری یا صافی سطح مشخصی بدست آید. این امر مستلزم حل مدل‌های ارائه شده در این تحقیق برای مقادیر مشخصی از خروجی‌ها است. حل معکوس و همزمان این توابع توسط روش‌های عددی و یا الگوریتم‌های ابتکاری امکانپذیر است. در تحقیق حاضر از الگوریتم فرا ابتکاری جستجوگر ممنوعه^۱ برای این منظور استفاده شده است.

الگوریتم جستجوگر ممنوعه (TS) اولین بار توسط گلوور در اواسط دهه ۸۰ میلادی ارائه گردید [۹]. مبنای این الگوریتم جستجوی گام به گام فضای جواب‌ها از طریق ایجاد و ارزیابی مرحله‌ای - همسایگی جواب فعلی است. در این جا منظور از همسایگی، کلیه جواب‌هایی است که با اعمال کوچکترین تغییر ممکن در مقادیر متغیرهای جواب فعلی، بدست می‌آیند. در هر تکرار، پس از تشکیل چند همسایگی مقادیر توابع هدف آنها محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در این مرحله حرکت به بهترین جواب غیر ممنوعه در میان همسایگی‌های جواب فعلی انجام می‌گیرد. این روند تا ارضا شدن شرط توقف (زمان محاسباتی، تعداد تکرار ها و...) ادامه می‌یابد. پس از انجام هر حرکت، جواب قبلی در لیست ممنوعه^۲ قرار می‌گیرد. لیست ممنوعه مشخصه بارز روش TS است که متشکل از تعداد مشخصی از جواب‌های پذیرفته شده قبلی می‌باشد که حرکت به آن‌ها در تکرار فعلی مقدور نمی‌باشد. امکان پذیرش جواب‌های غیر بهبود دهنده و وجود لیست ممنوعه، تا حد زیادی از ایجاد سیکل بسته و همگرا شدن الگوریتم به بهینه‌های محلی جلوگیری و امکان جستجو در فضای بیشتری را فراهم می‌کند. اندازه لیست ممنوعه وابسته به ماهیت و ابعاد مسئله بوده و معمولاً بصورت تجربی تعیین می‌شود. توضیحات مبسوط در مورد این روش و کاربردهای مختلف آن را می‌توان در مراجع مرتبط یافت [۱۰-۱۲].

در این تحقیق، الگوریتم پیشنهادی در محیط نرم افزار MATLAB[®] کد نویسی و برای بهینه سازی مسئله مورد نظر بکار گرفته شده است. لازم به ذکر است که دو خروجی فرآیند (صافی سطح و نرخ براده برداری) در جهت عکس یکدیگر بوده و بهبود یکی باعث تنزل دیگری خواهد شد. عبارت دیگر افزایش نرخ براده بردای موجب کاهش صافی سطح خواهد شد و بطور مشابه با بهبود صافی سطح، نرخ براده برداری را بشدت کاهش می‌یابد. از طرفی فرآیندهای ماشینکاری اغلب در دو یا سه مرحله خشنکاری، نیمه‌پرداخت و پرداختکاری انجام می‌شوند. مرحله خشنکاری معمولاً با هدف افزایش سرعت ماشینکاری انجام می‌گیرد و در آن صافی سطح اهمیتی ندارد. در مقابل، در مراحل نیمه پرداخت و پرداختکاری هدف افزایش کیفیت سطح و دقت ابعادی است. در این مراحل معمولاً نرخ براده‌برداری بسیار پایین است.

با توجه به مطالب فوق، فرآیند بهینه سازی نیز بگونه‌ای طراحی شده است که ملزومات هر مرحله را برآورد سازد. در این راستا ابتدا توابع هدف برای بهینه سازی دو مشخصه خروجی صافی سطح و نرخ براده‌برداری حجمی، بترتیب توسط روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند. در فرآیند بهینه سازی، هدف پیشینه‌سازی رابطه ۱ و کمینه‌سازی رابطه ۲ است. این روابط اختلاف (قدر مطلق) مقادیر مطلوب و مقادیر تخمینی (توسط مدل‌های ارائه شده در بخش ۳) را بیان می‌نمایند.

$$F_1^{sc} = \frac{|F_1^* - F_1(x)|}{F_1(x)} \quad (1)$$

^۱ . Tabu Search

^۲ . Tabu list



$$F_2^{sc} = \frac{|F_2(x) - F_2^*|}{F_2(x)} \quad (2)$$

در روابط فوق $F_1(x)$ مقدار متغیر خروجی (محاسبه شده توسط مدل)، F_1^* مقدار مطلوب متغیر خروجی (تعیین شده توسط کاربر) و F_1^{sc} نسبت اختلاف بین تابع هدف و مقدار مطلوب آن است. در فرآیند بهینه‌سازی بمنظور لحاظ کردن اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای خروجی در مراحل مختلف ماشینکاری، از مجموع وزن‌دهی شده روابط ۱ و ۲، که در قالب رابطه ۳ بیان شده است، استفاده می‌شود.

$$Z = \omega_1 F_1^{sc} + \omega_2 F_2^{sc} \quad (3)$$

در رابطه ۳، با تغییر وزن‌های نسبی ω_1 (ضریب نرخ براده برداری) و ω_2 (ضریب صافی سطح) حالات مطلوب خروجی‌ها قابل دستیابی است. الگوریتم جستجوگر ممنوعه برای ۳ حالت مختلف، خشنکاری، نیمه پرداخت و پرداخت، اجرا گردید. نتایج محاسباتی شامل مقادیر پارامترهای تنظیمی و خروجی‌های فرآیند برای هر یک از این مراحل در جدول ۳ ارائه شده است که در آن، ستون اول مربوط به پارامترهای تنظیمی در مرحله خشنکاری ($\omega_1 = 1, \omega_2 = 0$) است. همانطور که ملاحظه می‌شود حداکثر نرخ براده برداری $\frac{mm^3}{min}$ ۱۴/۸ بدست آمده است که نسبت به بهترین حالت در جدول آزمایشات (آزمایش شماره ۱۵) به مقدار ۳/۶۴٪ بهبود داشته است. در ستون میانی نتایج با وزن دهی برابر هر دو متغیر خروجی، یک حالت بینابین برای مرحله نیمه پرداخت ایجاد شده است. همچنین ستون آخر نیز مقادیر پارامترهای تنظیمی را در مرحله پرداخت ($\omega_1 = 0, \omega_2 = 1$) نشان می‌دهد که موجب ایجاد بهترین صافی سطح $2/05 \mu m$ شده است. در این مورد نیز ملاحظه می‌گردد که نسبت به بهترین حالت جدول (آزمایش شماره ۹) به مقدار $15/28\%$ صافی سطح بهبود یافته است. بدیهی است با تغییر مقادیر این وزن‌ها، می‌توان الگوریتم را برای هر مقدار مطلوب دیگری از متغیرهای خروجی اجرا نمود.

جدول ۳- نتایج بهینه سازی چندگانه

پارامترهای وایکات و خروجی ها	شرایط بهینه ماشینکاری		
	$\omega_1 = 1$ $\omega_2 = 0$	$\omega_1 = 0.5$ $\omega_2 = 0.5$	$\omega_1 = 0$ $\omega_2 = 1$
شدت جریان	۱۲	۱۱	۹
زمان خاموشی	۸	۱۴	۲۲
ولتاژ	۱۱۰	۱۴۰	۱۱۰
ولتاژ مدار باز	۲۶	۲۶	۲۶
کیفیت سطح پیش بینی شده	۳/۶۲	۳/۲۲	۲/۰۵*
نرخ براده برداری حجمی پیش بینی شده	۱۴/۸۰*	۱۴/۱۹	۳/۳۹

۵- نتیجه گیری

در روش ماشینکاری تخلیه قوس الکتریکی، تاثیر سطوح پارامترهای تنظیمی فرآیند بر مشخص‌های خروجی آن بسیار مهم است. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و رویکرد مدل‌سازی رگرسیونی، مدل‌های ریاضی برای تعیین نوع و میزان اثر متغیرهای تنظیمی بر نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح فولاد ۲۶۰۱ سردکار استخراج گردید. تحلیل‌های



آماری انجام شده بر روی انواع مدل‌ها نشان داد که مدل مرتبه دوم برای نرخ براده برداری حجمی و مدل نمایی برای صافی سطح از کیفیت بیشتری برخوردارند. به کمک این مدل‌ها می‌توان نوع و شدت تاثیر هر یک از پارامترهای تنظیمی فرآیند را بر مشخصه‌های خروجی آن تعیین نمود. بررسی مدل‌ها نشان می‌دهد که از میان ۴ پارامتر تنظیمی، شدت جریان و زمان خاموشی پالس بیشترین تاثیر را بر نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح قطعه می‌گذارند؛ در حالیکه ولتاژ کاری و ولتاژ مدار باز تاثیر چندانی بر این دو مشخصه ندارند. در ادامه تحقیق با بکارگیری الگوریتم فرابتنکاری جستجوگر ممنوعه، روش بهینه‌سازی کارآمدی ارائه شد تا بتوان سطوح مناسب پارامترهای تنظیمی ماشینکاری را برای مراحل مختلف (خشکنکاری، نیمه پرداخت و پرداخت) و بر حسب خروجی‌های مطلوب هر مرحله، تعیین نمود. روش بهینه‌سازی پیشنهادی قادر است مقادیر پارامترهای تنظیمی فرآیند را بگونه‌ای تعیین نماید تا سطوح مشخصی از صافی سطح و سرعت براده برداری، در مراحل مختلف شکل گیری قطعه کار، تامین شوند. نتایج محاسباتی مبین کارایی خوب مدل‌ها و روش بهینه‌سازی پیشنهادی است.

مراجع

- 1- Barry J., Byrne G., Lennon D., "Observation on chip formation and acoustic emission in machining of Ti-6Al-4V alloy", *Int. J. Machine Tools Manuf.*, Vol. 41, pp. 1055-1070, 2001.
- 2- McGeough J.A., *Advanced Methods of Machining*, Chapman & Hall, (1988).
- ۳- کلاهان ف.، نیکروان ع.، بیرون رو م.، "تعیین تاثیرات پارامترهای تنظیمی در نرخ پیشروی و زبری سطح ماشینکاری وایرکات آلیاژ TI-6AL-4V بکمک مدل‌سازی ریاضی"، نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۳-۱۵ اسفند ۱۳۸۷.
- 4- Scott D., Boyna S., Rajurkar K.P., "Analysis and optimization of parameter combinations in WEDM", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 29, pp. 2189-2207, 1991.
- 5- Tarnq Y.S., Ma S.C., Chung L.K., "Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining", *Int. J. Machine Tools Manuf.*, Vol. 35, pp. 1693-1701, 1995.
- 6- Spedding T.A., Wang Z.O., "Parametric optimization and surface characterization of wire electrical discharge machining process", *Int. J. Precision Eng.*, Vol. 20, pp. 5-15, 1997.
- 7- Tosun N., Cogun C., Pihtili H., "The effect of cutting parameters on wire crater sizes in WEDM", *int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 21, pp. 857-865, 2003.
- ۸- رمضی ح.، نهضت ن.، تهرانی ع. ف.، "بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری وایرکات بر زبری سطح و نرخ براده برداری حجمی فولاد ابزار سردکار ۲۶۰۱"، چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، ۲۵-۲۷ اردیبهشت ۱۳۸۵.
- 9- Glover F., *Tabu search: Part I*, *ORSA J Comp*, (1989).
- 10- Hertz A., De Werra D., "The tabu search metaheuristic: how we used it", *Annual Mathematics in Artificial Intelligence*, Vol. 1, pp. 111-121, 1991.
- 11- Kolahan F., Liang M., "Optimization of hole-making operations: a tabu-search approach", *Euro. J. Operational Res.*, Vol. 109, pp. 142-159, 1998.
- 12- Kolahan F., Liang M., "An adaptive TS approach to JIT sequencing with variable processing times and sequence-dependent setups", *Int. J. Machine Tools Manuf.*, Vol. 40, pp. 1735-1753, 2000.