به‌کارگیری روش تاگوچی در مدلسازی کیفیت سطح و سایش ابزار در تراشکاری فولادهای میکرو آلیاژی

احسان خاتمی[۱]، حسن محققیان[۲]، فرهاد کلاهان[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران Ehsan.Khatamii@gmail.com
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران Hassan.id1778@gmail.com
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد kolahan@um.ac.ir

چکیده

فرایند تراشکاری یکی از پر کاربردترین روش ها در تولید قطعات فلزی است واز طرفی امروزه فولادهای میکرو آلیاژی در صنایع مختلف به صورت گسترده‌ای کاربرد دارند. به منظور افزایش کیفیت قطعات و کاهش هزینه‌های تولیدی، تعیین سطوح بهینه پارامترهای برشی و هندسه ابزار از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این تحقیق، به مدل‌سازی دو مشخصه مهم کیفیت سطح و میزان سایش ابزار در فرآیند تراشکاری فولادهای میکروآلیاژی 30SMV6 پرداخته شده است. پارامترهای تنظیمی فرآیند شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش، زاویه آزاد و شعاع ابزارمی باشند. به منظور گردآوری داده های تجربی ،آزمایشات بر اساس رویکرد طراحی آزمایشات[۱] تاگوچی[۲]، صورت پذیرفته است. سپس، انواع توابع رگرسیونی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است. کیفیت مدل‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری بررسی گردیده و مدل اصلح انتخاب گردیده است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که مدل خطی برای کیفیت سطح و مدل لگاریتمی برای سایش ابزار بهترین برازش را بر فرآیند واقعی دارند. به منظور صحه گذاری مدل‌های انتخابی آزمایشات مجدد صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های پیشنهادی از دقت مناسبی در پیش بینی فرآیند واقعی برخوردارند.

کلمات کلیدی: مدل رگرسیونی -فولاد میکرو آلیاژی - طراحی آزمایشات- تاگوچی- پارامترهای ماشینکاری.

مقدمه

امروزه تولیدکنندگان به دنبال بهبود کیفیت محصولات و کاهش قیمت تمام شده آن‌ها هستند. ماشینکاری و برش فلزات یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تولید قطعات فلزی است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. کیفیت قطعه کار و هزینه‌های تولیدی در ماشینکاری مستقیماً تحت تاثیر هندسه ابزار و پارامترهای برشی قرار دارند [۱]. تحقیقات متعددی در خصوص مدل‌سازی فرآیندهای تراشکاری انجام شده است. به طور مثال نوری[۳] و همکاران در زمینه مدل‌سازی فرآیند تراشکاری آلیاژهای آلومینیوم بدون مایع خنک کننده تحقیقاتی انجام داده‌اند [۲]. چادوری[۴] و همکاران مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی عمر ابزار در فرآیند تراشکاری فولادها با استحکام تسلیم بالا به کمک روش طراحی آزمایشات انجام داده‌اند [۳]. کُپک[۵] و همکاران مقادیر بهینه پارامترهای ماشینکاری (سرعت برشی، عمق برشی، جنس ابزار و جنس قطعه کار) برای دستیابی به صافی سطح دلخواه در عملیات تراشکاری قطعات فولادی کار سرد شده را به کمک روش تاگوچی بدست آورده‌اند [۴].

با این حال، این تحقیقات موردی بوده و نتایج آن‌ها تنها برای شرایط آزمایش‌های معین و ماده مشخصی معتبر می‌باشند. همچنین در گذشته تاثیر پارامترهای برشی بر کیفیت سطح و عمر ابزار و همچنین تاثیر هندسه ابزار در فولادهای مختلف به صورت مجزا بررسی شده است. اما در این تحقیق تاثیر همزمان این پارامترها بررسی شده است. از طرفی با توجه به استفاده روزافزون فولادهای میکرو آلیاژی، وجود راهکاری مناسب در تعیین سطوح متغیرهای ماشینکاری که در نهایت منجر به بهترین خروجی ممکن شود، الزامی است.

طراحی آزمایشات

بدون شک یکی از بهترین روش‌های مدل‌سازی و تحلیل اثرات فاکتورها در هر سیستمی، استفاده از داده‌های تجربی همان سیستم است. . گاهی اوقات برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و چند متغیره، تفسیر تمام ویژگی‌ها توسط انجام آزمایشاتی با کلیه حالت‌های ممکن، به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد. در چنین مواقعی روش‌های طراحی آزمایش‌ها جهت انتخاب بهترین و اثربخش‌ترین داده‌ها اهمیت می‌یابد. طراحی آزمایش‌ها عبارت است از انجام یک سری عملیات سیستماتیک و دقیق برای تعیین مشخصات یک یا چند آزمایش از آزمایش‌های ممکن، که به طور آگاهانه در متغیرهای

[۱] Design of Experiments
[۲] Taguchi
[۳] Nouari
[۴] Choudhury
[۵] Kopac

ورودی فرآیند تغییراتی ایجاد می‌کند تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود [۵].

ورودی و خروجی‌های فرآیند تراشکاری فولادهای میکرو آلیاژی 30SMV6 مطابق شکل ۱ می‌باشد.

طراحی آزمایشات روش‌های گوناگونی دارد در این تحقیق از رویکرد تاگوچی استفاده شده است. سطوح در نظر گرفته برای متغیرهای ورودی مطابق جدول ۱ می‌باشد.

شکل ۱- ورودی وخروجیهای فرآیند

جدول ۱- سطوح در نظر گرفته شده برای متغیرهای ورودی فرآیند

	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
دور اسپندل/سرعت برشی (r/m)	۲۵۰	۳۵۵	۵۰۰	۷۱۰
پیشروی (mm/rev)	۰،۰۰۸	۰،۰۱۲	۰،۰۱۶	۰،۰۲
عمق تراش (mm)	۰،۰۵	۱	۱،۰۵	۲
شعاع ابزار (mm)	۰،۰۸	۱،۰۲	-	-
زاویه آزاد (deg)	۵	۷	-	-

همان‌طور که مشاهده می‌شود از بین پارامترهای هندسی با توجه به محدودیت‌های موجود فقط پارامترهای شعاع ابزار و زاویه آزاد در نظر گرفته شده است و همچنین پارامترهای برشی در چهار سطح و پارامترهای هندسی در دو سطح قابل تغییر می‌باشند. ماتریس پیشنهادی طرح تاگوچی L16 می‌باشد که در جدول۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ماتریس پیشنهادی طرح تاگوچی L16

شماره آزمایش	سرعت برشی	پیشروی	عمق تراش	شعاع ابزار	زاویه آزاد
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۱	۱
۳	۱	۳	۳	۲	۲
۴	۱	۴	۴	۲	۲
۵	۲	۱	۲	۲	۲
۶	۲	۲	۱	۲	۲
۷	۲	۳	۴	۱	۱
۸	۲	۴	۳	۱	۱
۹	۳	۱	۳	۱	۲
۱۰	۳	۲	۴	۱	۲
۱۱	۳	۳	۱	۲	۱
۱۲	۳	۴	۲	۲	۱
۱۳	۴	۱	۴	۲	۱
۱۴	۴	۲	۳	۲	۱
۱۵	۴	۳	۲	۱	۲
۱۶	۴	۴	۱	۱	۲

شکل ۲ – نمونه آزمایش

انجام آزمایشات

جهت انجام هر یک از آزمایش‌ها، در ابتدا پارامترهای برشی مطابق ماتریس طراحی آزمایش‌ها روی دستگاه تراش (تبریز مدلTN50BR) تنظیم می‌شود. قطعه کار (میل‌گرد با قطر ۳۸میلی متر) روی دستگاه بسته شده و به مدت ۱ دقیقه ماشینکاری ماشینکاری می‌گردد. سپس با استفاده از دستگاه زبری سنج، (مدل Perthometer) کیفیت سطح در سه نقطه اندازه گیری و ثبت می‌شود (شکل۲).

پس از اندازه گیری کیفیت سطح، مجدداً عملیات ماشینکاری با همان شرایط پیشین به مدت ۱۹ دقیقه صورت می‌گیرد که در مجموع زمان ماشینکاری ۲۰ دقیقه می‌شود. بعد از اتمام هر آزمایش با استفاده از میکروسکوپ، میزان فرسایش روی سطح آزاد لبه ابزار اندازه گیری و ثبت می‌گردد. قابل توجه است که ترتیب انجام آزمایش‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده است. نتایج بدست آمده مطابق جدول ۳ می‌باشد.

(f:پیشروی، a:عمق تراش، r:شعاع ابزار، γ:زاویه آزاد، v_c:سرعت برشی، R_a:زبری سطح، wear:سایش ابزار).

جدول ۳- نتایج آزمایشات

NO.	f	a	r	γ	V_C	R_a	Wear
۱	۰،۰۰۸	۰،۰۵	۰،۸	۵	۰،۴۹۷	۲،۲۶	۰،۰۰۴
۲	۰،۰۱۲	۱	۰،۸	۵	۰،۴۹۷	۲،۶۲	۰،۰۱
۳	۰،۰۱۶	۱،۰۵	۱،۰۲	۷	۰،۴۹۷	۲،۶۹	۰،۰۴۲
۴	۰،۰۲	۲	۱،۰۲	۷	۰،۴۹۷	۳،۱۱	۰،۰۵۷
۵	۰،۰۰۸	۱	۱،۰۲	۷	۰،۷۰۵	۲،۰۵	۰،۰۰۹
۶	۰،۰۱۲	۰،۰۵	۱،۰۲	۷	۰،۷۰۵	۲،۳۹	۰،۰۱
۷	۰،۰۱۶	۲	۰،۸	۵	۰،۷۰۵	۳،۰۲	۰،۰۲۷
۸	۰،۰۲	۱،۰۵	۰،۸	۵	۰،۷۰۵	۳،۴۴	۰،۰۲۳
۹	۰،۰۰۸	۱،۰۵	۰،۸	۷	۰،۹۹۴	۲،۲۵	۰،۰۳۵
۱۰	۰،۰۱۲	۲	۰،۸	۷	۰،۹۹۴	۲،۶	۰،۰۴۶
۱۱	۰،۰۱۶	۰،۰۵	۱،۰۲	۵	۰،۹۹۴	۲،۶۶	۰،۰۱۳
۱۲	۰،۰۲	۱	۱،۰۲	۵	۰،۹۹۴	۳،۰۶	۰،۰۳۱
۱۳	۰،۰۰۸	۲	۱،۰۲	۵	۱،۴۱۱	۱،۹۹	۰،۰۴۳
۱۴	۰،۰۱۲	۱،۰۵	۱،۰۲	۵	۱،۴۱۱	۲،۲۹	۰،۰۲۸
۱۵	۰،۰۱۶	۱	۰،۸	۷	۱،۴۱۱	۳،۰۲	۰،۰۴۳
۱۶	۰،۰۲	۰،۰۵	۰،۸	۷	۱،۴۱۱	۳،۴۶	۰،۰۳

قابل ذکر است دور اسپیندل با توجه به قطر قطعه کار به سرعت برشی تبدیل شده است.

مدل سازی فرآیند

در این تحقیق از روش رگرسیون برای تعیین روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند استفاده شده است. برای مدل‌سازی فرآیند در محیط نرم افزار Minitab انواع توابع رگرسیونی، خطی، درجه دوم و لگاریتمی بر نتایج حاصل از آزمایشات برازش داده شده‌اند. در نهایت با سطح اطمینان ۹۵٪، ضرایب معادلات برای کیفیت سطح و میزان فرسایش سطح آزاد استخراج گردیده‌اند. (جدول ۴)

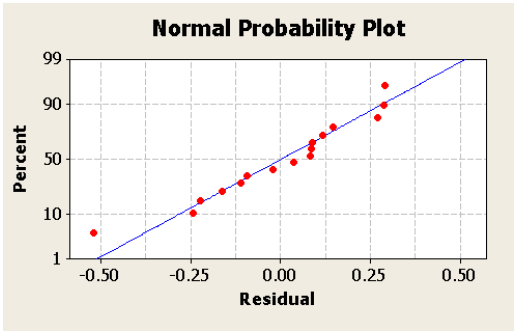
یکی از معیارهای انتخاب مدل مناسب، ضریب همبستگی $\left(R^2, R^2_{adj}\right)$ می‌باشد که برای هر یک از معادلات محاسبه شده است. با توجه به این معیار، مدل خطی برای کیفیت سطح و مدل لگاریتمی مربوط به میزان فرسایش روی سطح آزاد ابزار به ترتیب دارای ضریب همبستگی ۹۹،۳٪ و ۹۱،۶٪ هستند که نشان دهنده برازش بسیار خوب این مدل‌ها بر داده‌های تجربی می‌باشد.

معیار دیگری که می‌توان برای تشخیص مدل اصلح به کار گرفت، نمودار احتمال نرمال بودن داده‌ها و هیستوگرام باقی‌مانده‌ها است. [۶] مطابق نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که هر دو مدل ذکر شده دارای توزیع نرمال مقادیر در امتداد خط راست و پراکندگی کم هستند که مؤید کیفیت

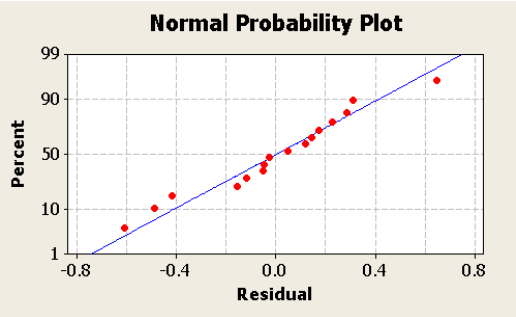
خوب مدل‌های برازش شده می‌باشد.

جدول ۴- مدل‌های ایجاد شده

متغیر پاسخ	نوع مدل	مدل برازش شده	R^2٪	R_{adj}^2٪
کیفیت سطح	خطی	R_a= - 0.759r + 2.06 + 9.41f + 0.0115a - 0.0067Vc - 0.0144γ	99.3	98.9
	درجه دو	R_a = 2.35 + 5.79 f – 0.072 a – 0.763 r + 0.0148 γ – 0.098 Vc +12.9 f^2+ 0.175a^2 + 0.054Vc^2– 0.09Vc*f + 0.004Vc*a + 0.08f*a	99.5	97.2
	لگاریتمی	Ln R_a = 1.83 + 0.458 lnf – 0.006 lnr +0.0348 lnγ–0.0133 ln Vc	98.9	97.9
فرسایش ابزار	خطی	Wear = -0.634 +1.13f +0.191a +0.0469r + 0.0581γ + 0.136Vc	84.8	77.2
	درجه دو	Wear = - 0.392 + 1.86f + 0.023a – 0.011r + 0.0733γ – 0.454 Vc + 5.1f*f + 0.023 a^2 + 0.274V c^2 – 1.18Vc*f + 0.162Vc*a – 0.43 f*a	۸۹	۵۸،۸
	لگاریتمی	Ln(wear) = - 2.03 + 0.887lnf + 0.96lna + 0.218lnr + 1.34lnγ + 0.777 ln Vc	۹۷،۳	۹۶،۴



نمودار ۱- نمودار احتمال نرمال مدل خطی کیفیت سطح



نمودار ۲- نمودار احتمال نرمال مدل لگاریتمی سایش

به منظور صحه گذاری و بررسی توانایی مدل‌ها در پیش بینی فرآیند، تعداد پنج آزمایش مجدداً انجام شد و مقدار انحراف مدل‌ها نصب به مقادیر بدست آمده از آزمایش با استفاده رابطه ۱محاسبه گردید. نتایج در جدول۵ ارائه شده‌اند.

$$\%E = \frac{A-P}{P} \times 100 \qquad (۱)$$

(E: در صد خطا، A: مقدار واقعی، P: مقدار پیش بینی شده)

جدول شماره ۵ – میانگین درصد خطای مدل‌های اصلح

متغیر پاسخ	نوع مدل	میانگین درصد خطا
کیفیت سطح	خطی	۱،۴
فرسایش ابزار	لگاریتمی	۵،۲

همان‌طور که مشاهده می‌شود این مدل‌ها با خطای قابل قبل قادر به پیش بینی فرآیند هستند.

مدل‌های ارائه شده در این تحقیق می‌توانند با دقت بالایی خروجی‌های (صافی سطح قطعه و نرخ سایش ابزار) فرآیند تراشکاری فولاد میکرو آلیاژی 30SMV6 را به ازاء هر مجموعه از پارامترهای تنظیمی پیش‌بینی نمایند. بدین ترتیب نیاز به انجام آزمایشات عملی مرتفع خواهد شد. همچنین از این مدل‌ها می‌توان به منظور تعیین سطوح بهینه پارامترهای برشی و هندسه ابزار استفاده نمود.

نتیجه گیری

به دلیل تعدد پارامترهای دخیل در فرآیند تراشکاری، دسترسی به خروجی‌های مطلوب در گرو شناخت دقیق و نحوه تاثیر پارامترهای تنظیمی است. این امر مستلزم ایجاد مدل‌های مناسب جهت تعیین ارتباط دقیق بین پارامترهای تنظیمی و خروجی‌های فرآیند است. از این رو در این پژوهش با بررسی اصول تراشکاری و همچنین امکانات موجود، پارامترهای مهم برای انجام آزمایشات عملی و جمع آوری داده‌های مورد نیاز فراهم گردید.

به دلیل ارتباط مستقیم بین میزان فرسایش ابزار و هزینه ماشینکاری، و همچنین تاثیر زبری سطح در کیفیت نهایی و عملکرد محصول، از بین خروجی‌های مختلف دو پارامتر مهم میزان فرسایش ابزار و زبری سطح به عنوان معیارهای ارزیابی کیفیت فرآیند تراشکاری در نظر گرفته شد. در ادامه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و روش‌های ریاضی مدل‌ها مناسب برای پیش‌بینی

فرآیند ارائه گردید. در مرحله بعد، صحت و دقت مدل‌های پیشنهادی بر اساس آزمایشات تجربی و نتایج تحلیل‌های آماری مورد تایید قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های پیشنهادی می‌توانند با دقت بالایی صافی سطح قطعه و نرخ سایش ابزار را در فرآیند تراشکاری فولاد میکرو آلیاژی 30SMV6 پیش بینی نمایند. به کمک این مدل‌ها می‌توان مشخصههای خروجی را به ازاء مقادیر مختلف پارامترهای برشی و هندسه ابزار پیش‌بینی نمود و بنابراین نیازی به انجام آزمایشات عملی نخواهد بود. همچنین از این مدل‌ها می‌توان به منظور تعیین سطوح بهینه پارامترهای برشی و هندسه ابزار استفاده نمود.

منابع و مآخذ

[1] Mukherjee I ,Ray K.R ,*A review of optimization techniques in metal cutting processes* .Computers & Industrial Engineering, 2006 ;۵۰ .p. 15-34

[2] M.Nouari, G.List, F.Girot, D.Coupard,” Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys”, Journal ofWear 255 (2003) 1359-1368

[3] I.A.Choudhury, M.A. El-Baradie,” Tool-life prediction model by design of experiments for turninghigh strength steel (290 BHN)”, Journal of Materials Processing Technology 77 (1998) 319–326

[4] Kopac J, Bahor M, Sokovic M, Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold pre-formed steel workpieces. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002. 42: p. 707-716.

[۵] رانجیت. ر. روی، "آشنای با روش طراحی آزمایشات تاگوچی"، ترجمه:دکتر داوود مرادخانی، مهندس فرشید تقوی، انتشارات دانشگاه زنجان، چاپ اول،۱۳۸۶

[۶] سمپریت چترجی، "تحلیل رگرسیون با مثال" مترجم:حسین علی نیرومند، انتشارات دانشگاه فردوسی،۱۳۸۴