

**بهینه‌سازی همزمان پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار در عملیات تراشکاری فولاد AISI1045\***فرهاد کلاهان<sup>(۱)</sup>محسن منوچهری<sup>(۲)</sup>عباس حسینی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** فرآیند ماشین‌کاری یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تولید قطعات فازی است. از مهمترین مشخصه‌های قطعات تولیدی با این روش، کیفیت سطح قطعه می‌باشد. صافی سطح قطعات به‌نوبه‌ی خود تحت تأثیر پارامترهای تنظیمی فرآیند و هندسه‌ی ابزار قرار دارد. هدف اصلی در این تحقیق، بهینه‌سازی همزمان پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی، نرخ پیشروی) و زوایای ابزار (زاویه براده، زاویه تنظیم اصلی، زاویه تنظیم فرعی) در فرآیند تراشکاری فولاد AISI1045 می‌باشد. بهینه‌سازی همزمان پارامترهای برشی و زوایای ابزار، با استفاده از تحلیل‌های آماری بر روی داده‌های تجربی، انجام شده است. به منظور گردآوری داده‌های تجربی، از طرح تاگوچی در رویکرد طراحی آزمایش‌ها، استفاده شده است. سپس به کمک نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) و تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N)، سطوح بهینه پارامترها به منظور بیشینه کردن کیفیت سطح تعیین شده‌اند. نتایج بهینه‌سازی از انطباق مناسبی بر آزمایش‌ها تجربی برخوردارند.

**واژه‌های کلیدی** پارامترهای ماشین‌کاری، زوایای ابزار برش، طرح تاگوچی، بهینه‌سازی، تحلیل واریانس

## Simultaneous Optimization of Machining Parameters and Tool Geometry Specifications in Turning Operation of AISI1045 Steel

F. Kolahan

M. Manoochehri

A. Hosseini

**Abstract** Machining operation is one of the most applicable processes for the manufacturing of industrial parts. Usually, the quality of finished part in turning operation is measured in terms of surface roughness. In turn, surface quality is determined by machining parameters and tool geometry specifications. The main objective of this study is to model and optimize machining parameters and tool geometry in order to improve the surface roughness in turning operation of AISI1045 steel. Simultaneous optimization of machining parameters and tool geometry was performed using experimental data and statistical methods. A Taguchi approach is employed in order to gather experimental data and then, based on signal-to-noise (S/N) ratio, the best sets of cutting parameters and tool geometry specifications have been determined. Experimental results are provided to illustrate the effectiveness of the proposed approach.

**Key Words** Machining parameters, Tool geometry, Taguchi method, Optimization procedure, Analysis of variance

\* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۵/۲، اولین پذیرش آن در تاریخ ۹۱/۳/۲ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۱/۵/۲۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول: دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانش آموزته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانش آموزته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

امروزه، تولیدکنندگان به دنبال بهبود کیفیت محصولات و کاهش قیمت تمام شده‌ی آنها می‌باشند. ماشین‌کاری و برش فلزات یکی از مهمترین فرآیندهای تولید قطعات فلزی است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. کیفیت قطعه‌کار و هزینه‌های تولیدی در ماشین‌کاری مستقیماً تحت تأثیر هندسه‌ی ابزار و پارامترهای برشی قرار دارد. و در این رابطه، مطالعات انجام شده در ماشین‌کاری عمدتاً بر روی جنس، هندسه‌ی ابزار و تنظیمات پارامترهای ماشین‌کاری متمرکز بوده است [1]. از طرفی یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی کیفیت قطعات ماشین‌کاری شده، صافی سطح نهایی قطعات است. صافی سطح به عوامل متعددی وابسته است که از مهمترین آنها می‌توان به هندسه‌ی ابزار برش و پارامترهای برشی (عمق برش، سرعت برش، نرخ پیشروی) اشاره نمود [2]. بنابراین به منظور دستیابی به صافی سطح مطلوب می‌بایست سطوح بهینه‌ی پارامترهای برشی و زوایای ابزار، با توجه به جنس قطعه کار، به نحو مطلوبی تعیین شوند. در اغلب کاربردهای عملی، انتخاب ابزار و تعیین مقادیر پارامترهای برشی به صورت تجربی و با استفاده از روش‌های مبتنی بر سعی و خطا انجام می‌گیرد. اما این روش‌ها، علاوه بر هزینه بالا، با احتمال خطا همراه هستند. در سال‌های اخیر، به‌کارگیری رویکردهای علمی و ریاضی در زمینه‌ی مدل‌سازی و بهینه‌سازی انواع فرآیندهای تولیدی، افزایش چشمگیری یافته است.

در این سال‌ها، به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری، مطالعات زیادی انجام شده است. این تحقیقات بیشتر از تکنیک‌های آماری، شبکه‌های عصبی مصنوعی و تئوری مجموعه‌های فازی در مدل‌سازی فرآیند تحت مطالعه بهره می‌گیرند [3-6]. همچنین به منظور تعیین سطوح بهینه‌ی پارامترهای تنظیمی، رویکردهای بهینه‌سازی متنوعی مانند روش تاگوچی، سطح پاسخ

(Response Surface Methodology (RSM)) و الگوریتم‌های فرا ابتکاری (Metaheuristic Algorithm) استفاده شده است. یانگ و ترانگ [3] از روش تاگوچی و آنالیز واریانس (Variance (ANOVA)) برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای تراشکاری فولاد S45C استفاده نموده‌اند. گُپک و همکاران [4] مقادیر بهینه‌ی 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 به دست آورده‌اند. چین و تسای [5] با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی یک مدل برای پیش‌بینی فرسایش ابزار ارائه داده‌اند. با ترکیب این مدل و الگوریتم ژنتیک (GA) مقادیر بهینه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری برای فولاد ضد زنگ 17-4PH را به دست آورده‌اند.

از دیگر مباحث مهم در تحقیقات مرتبط با ماشین‌کاری، هندسه‌ی ابزار است. به عنوان مثال، نالبانت و همکاران [6] با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز واریانس میزان تأثیر و مقادیر بهینه‌ی شعاع نوک ابزار، نرخ پیشروی و عمق برش را برای دستیابی به صافی سطح مطلوب در تراشکاری فولاد AISI 1030 تعیین کرده‌اند. بر اساس نتایج ارائه شده توسط این محققین، شعاع نوک ابزار و نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی صافی سطح از خود نشان داده‌اند. این در حالی است که عمق برش (با تأثیر کمتر از ۰.۴٪) در تعیین صافی سطح، تقریباً بی‌اثر است. اسلان و همکاران [7]، تأثیر پارامترهای برش بر سایش ابزار و صافی سطح در عملیات تراش فولاد سخت کاری شده را بررسی کرده و رابطه‌ی بین آنها را به صورت یک مدل ریاضی ارائه نموده‌اند. مانا و سالدکار [8] شرایط بهینه‌ی برش برای دستیابی به صافی سطح مطلوب و حداقل هزینه‌ی ماشین‌کاری را در عملیات تراشکاری فولاد آلیاژی EO300 تعیین کرده‌اند. به منظور دستیابی به کیفیت سطح مطلوب برای کامپوزیت آلومینیوم

داده‌اند.

علی‌رغم مطالعات انجام شده در زمینه‌ی بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری و انتخاب ابزار، تأثیر همزمان این دو گروه از عوامل بر کیفیت فرآیند ماشین‌کاری (صافی سطح)، به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، هدف از این مطالعه، مدل‌سازی و بهینه‌سازی همزمان پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار به عنوان متغیرهای موثر بر کیفیت سطح در عملیات تراشکاری فولاد AISI 1045 می‌باشد. بدین منظور، برای جمع‌آوری داده‌های تجربی مورد نیاز، از رویکرد طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی استفاده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری نتایج، سطوح بهینه‌ی پارامترها به کمک تکنیک‌های آماری و روش سیگنال به نویز (S/N) تعیین گردیده‌اند.

#### مواد و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها

ماده‌ی مورد مطالعه در این تحقیق فولاد AISI1045 است که کاربرد فراوانی در صنایع ماشین‌سازی و قطعه‌سازی دارد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۱) ارائه شده است. تمامی آزمایش‌های تجربی بر روی یک دستگاه تراش ۲ متری با توان اسپیندل ۲KW انجام شد. در این مطالعه، از ابزار برشی HSS تقویت شده با ۰.۵٪ کبالت، استفاده شده است. دلیل به کارگیری این ابزار، سهولت پیاده‌سازی زوایای مختلف ابزار بر روی این نوع فولاد تندر می‌باشد. زوایای مورد نظر به کمک یک دستگاه سنگ ابزار و با دقت  $\pm 0.5$  درجه، بروی سطوح ابزارهای مختلف ایجاد گردید. شکل (۱) چند نمونه از ابزارهای برشی مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به انجام آزمایش‌های اولیه و در نظر گرفتن حداقل طول برشی مورد نیاز برای اندازه‌گیری صافی سطح (مشخصات و محدودیت‌های دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح) و همچنین جلوگیری از تأثیر

(AI/sic-MMC)، دیویم و همکاران [9] به کمک آنالیز واریانس و شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری را به دست آورده‌اند. کینی و چینچالکار [10] تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر روی صافی سطح و نرخ برداشت ماده را در تراشکاری پلیمر تقویت شده با فایبر گلاس بررسی کرده و یک رابطه‌ی تجربی برای تعیین نرخ برداشت ماده و صافی سطح ارائه نموده‌اند.

با توجه به تاریخچه‌ی تحقیق، مهمترین مشخصه‌های هندسه‌ی ابزار در تراشکاری، شعاع نوک ابزار، زاویه‌ی آزاد، زاویه‌ی براده و زوایای تنظیم اصلی و فرعی می‌باشند. در اغلب تحقیقات موجود، تأثیر هر یک از پارامترهای هندسه‌ی ابزار بر روی کیفیت سطح به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که به‌طور کلی افزایش زاویه‌ی براده باعث بهبود کیفیت سطح می‌گردد؛ در حالی‌که تغییر زاویه‌ی آزاد، اثر قابل توجهی بر کیفیت سطح و نرخ برداشت ماده ندارد و تنها شرایط ماشین‌کاری را تسهیل می‌نماید [۱۱]. کولو و همکاران [12]، فرآیند تراشکاری پر سرعت آلیاژ نیکل Inconel718 را مورد مطالعه قرار داده‌اند. ایشان تأثیرات ناشی از تغییرات هندسی لبه‌ی برش (زاویه‌ی برش، عرض برش، شعاع نوک ابزار و شکل لبه‌ی ابزار (تیز یا گرد)) را بر روی صافی سطح قطعه و درجه حرارت منطقه‌ی ماشین‌کاری بررسی کرده و مقادیر مناسب آنها را تعیین نموده‌اند. برای ماشین‌کاری آلیاژهای آلومینیوم، فنگ و وو [13] تأثیرات هندسه‌ی لبه‌ی ابزار را بر نیروهای برش، توان ماشین‌کاری و ضخامت براده مورد بررسی قرار داده‌اند. آلتان و همکاران [14] تأثیر هندسه‌ی لبه‌ی ابزار، زاویه‌ی براده و شعاع نوک ابزار و شرایط برش (سرعت برش) را بر روش تشکیل براده در عملیات تراش سخت به‌صورت تجربی (آزمایشگاهی) و شبیه‌سازی شده در فولاد 100CR6 مورد مطالعه قرار

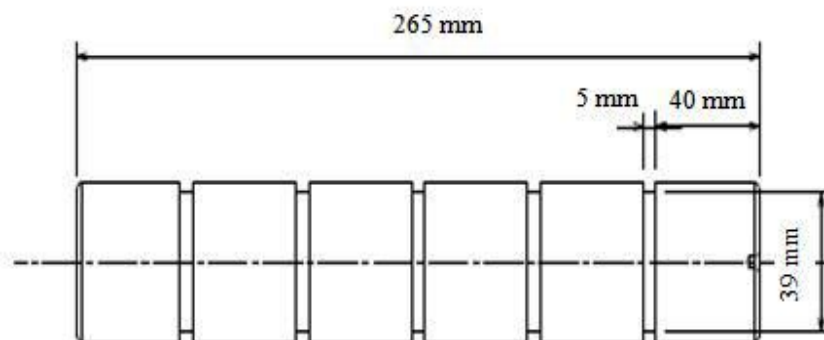
فرسایش ابزار بر روی هندسه‌ی آن و کیفیت سطح (۲) طراحی و تهیه گردید. حاصله، قطعه‌ی آزمایشی با ابعاد نشان داده شده در

جدول ۱ عناصر تشکیل دهنده فولاد AISI1045

ترکیب شیمیایی						
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Others
0.46	Max. 0.40	0.65	Max. 0.40	Max. 0.10	Max. 0.40	(Cr+Mo+Ni) = max 0.63



شکل ۱ چند نمونه از ابزارهای آماده شده برای انجام آزمایش‌ها



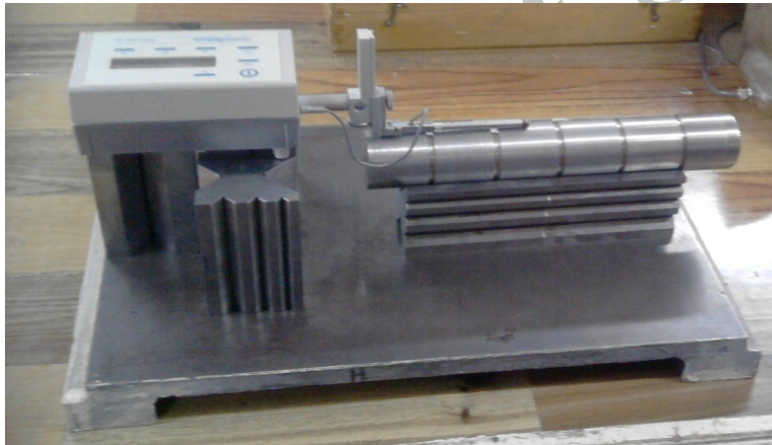
شکل ۲ نمونه قطعه مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

بهینه‌ی این پارامترها به منظور بهبود کیفیت سطح در عملیات تراشکاری فولاد AISI1045 می‌باشد. بدین منظور، سرعت برشی ( $V$ ) و نرخ پیشروی ( $f$ ) به عنوان پارامترهای برشی و زاویای براده ( $\gamma$ )، تنظیم اصلی ( $X$ ) و تنظیم فرعی ( $X'$ )، به عنوان پارامترهای هندسی ابزار، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در مقابل، صافی سطح قطعات به عنوان مهمترین مشخصه‌ی خروجی فرآیند، در نظر گرفته شده است. هر یک از پارامترهای تنظیمی در پنج سطح مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. جدول (۲) پارامترهای تنظیمی فرآیند را به همراه سطوح آنها نشان می‌دهد.

صافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده ( $Ra$ ) با استفاده از دستگاه زبری سنج Taylor-Hobson (شکل ۳) در جهت حرکت ابزار و در سه نقطه‌ی مختلف از سطح نمونه، اندازه‌گیری گردید. در این مطالعه، میانگین صافی سطح در این سه نقطه به عنوان صافی سطح قطعه در نظر گرفته شده است.

### انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

هدف از این مطالعه، بررسی میزان تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار و تعیین همزمان مقادیر



شکل ۳ دستگاه زبری سنج در حال اندازه‌گیری صافی سطح

جدول ۲ سطوح مختلف متغیرهای فرآیند

سطح	سرعت برشی (متر / دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی متر / دور)	زاویه براده (درجه)	زاویه تنظیم اصلی (درجه)	زاویه تنظیم فرعی (درجه)
۱	۱۸	۰/۰۵	۲	۰	۴
۲	۳۶	۰/۲	۵	۱۰	۸
۳	۵۲	۰/۳۵	۱۰	۲۰	۱۲
۴	۷۳	۰/۵	۱۵	۳۰	۱۶
۵	۱۰۴	۰/۶۵	۲۰	۴۰	۲۰

جدول ۳ ماتریس آزمایش‌ها و نتایج خروجی

شماره آزمایش	$\gamma$	X	X'	V	f	$\bar{Ra}$	S/N
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸/۱۳	-۱۸/۲
۲	۱	۲	۲	۲	۲	۹/۱۲	-۱۹/۲
۳	۱	۳	۳	۳	۳	۲۸/۶۰	-۲۹/۱
۴	۱	۴	۴	۴	۴	۲۰/۶۰	-۲۶/۳
۵	۱	۵	۵	۵	۵	۲/۱۱	-۶/۵
۶	۲	۱	۲	۳	۴	۸/۳۸	-۱۸/۵
۷	۲	۲	۳	۴	۵	۴/۰۱	-۱۲/۱
۸	۲	۳	۴	۵	۱	۱/۵۰	-۲/۲
۹	۲	۴	۵	۱	۲	۵/۱۷	-۱۴/۳
۱۰	۲	۵	۱	۲	۳	۴۰/۲۰	-۳۳/۶
۱۱	۳	۱	۳	۵	۲	۲/۱۰	-۲/۹
۱۲	۳	۲	۴	۱	۳	۹/۸۸	-۱۹/۹
۱۳	۳	۳	۵	۲	۴	۷/۵۳	-۱۷/۵
۱۴	۳	۴	۱	۳	۵	۱۵/۵۰	-۲۳/۸
۱۵	۳	۵	۲	۴	۱	۳/۳۷	-۱۰/۶
۱۶	۴	۱	۴	۲	۵	۳/۲۵	-۱۰/۳
۱۷	۴	۲	۵	۳	۱	۱/۹۰	۴/۲
۱۸	۴	۳	۱	۴	۲	۴/۱۰	-۱۲/۲
۱۹	۴	۴	۲	۵	۳	۴/۴۲	-۱۲/۹
۲۰	۴	۵	۳	۱	۴	۳۹/۴	-۳۱/۹
۲۱	۵	۱	۵	۴	۳	۱/۸۵	۶/۱
۲۲	۵	۲	۱	۵	۴	۳/۰۰	-۹/۶
۲۳	۵	۳	۲	۱	۵	۱۴/۶۰	-۲۳/۳
۲۴	۵	۴	۳	۲	۱	۱/۵۸	-۳/۹
۲۵	۵	۵	۴	۳	۲	۲/۱۰	-۶/۴

آزمایش‌ها برابر ۳۱۲۵ آزمایش خواهد بود. واضح است که انجام این تعداد آزمایش بسیار زمانبر بوده و مقرون به صرفه نیز نمی‌باشد. در نتیجه، برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، از رویکرد طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی استفاده شده است.

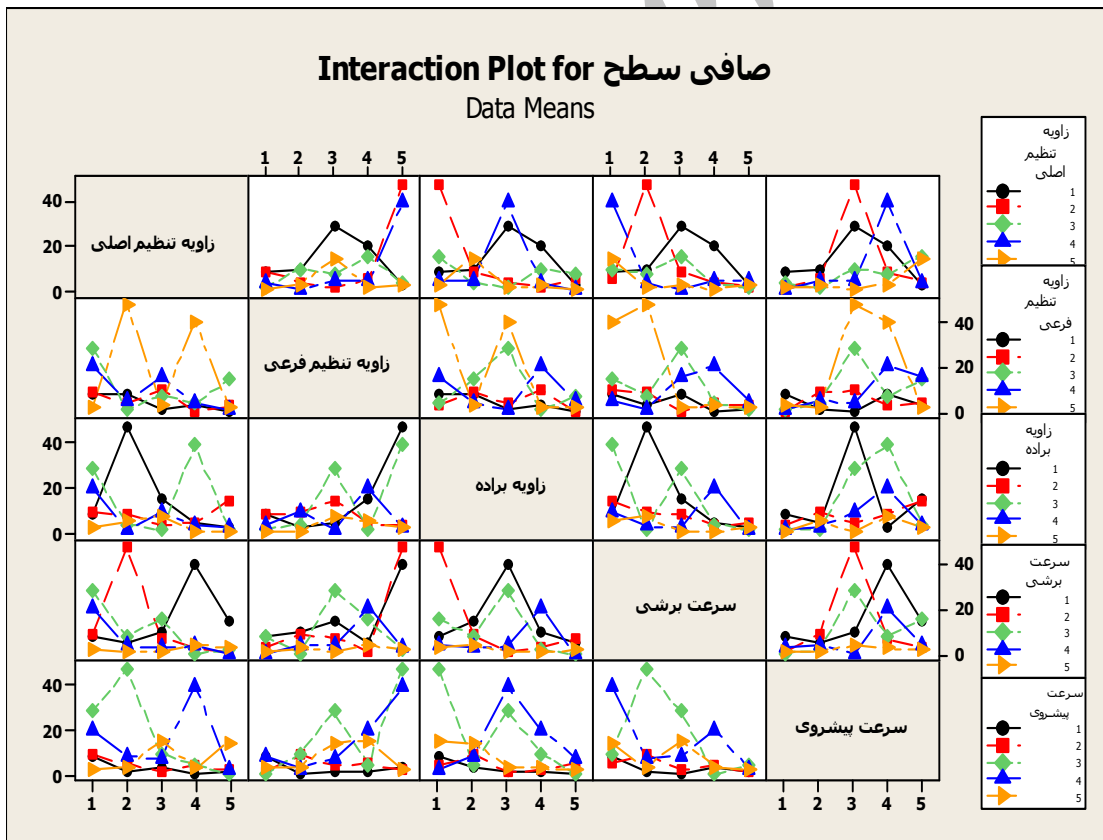
تاگوچی یک رویکرد کاربردی در زمینه‌ی کنترل کیفیت صنایع تولیدی ارائه می‌دهد. اهداف اصلی روش

برای کسب اهداف این تحقیق، به مجموعه‌ای از داده‌های تجربی فرآیند، نیاز است. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آنها، تعداد کل حالات (آزمایش‌ها) از رابطه‌ی  $n = L^K$  به دست می‌آید. در این رابطه  $n$  تعداد آزمایش‌ها،  $L$  تعداد سطوح و  $K$  تعداد پارامترهای مورد بررسی هستند. در مسأله‌ی این تحقیق، ۵ پارامتر هر یک در ۵ سطح وجود دارد، بنابراین تعداد کل

نقطه از هر نمونه در جهت ماشین کاری، اندازه گیری شده و میانگین آنها به عنوان خروجی هر آزمایش در ستون هفتم جدول (۳) گزارش شده است.

**بررسی اثر متقابل پارامترهای تنظیمی بر صافی سطح.**  
تأثیر متقابل پارامترهای ورودی در شکل (۴) نشان داده شده است. این شکل شامل پنج ردیف است که در هر ردیف اثر متقابل هر یک از پارامترها با چهار پارامتر دیگر گنجانده شده است. به عنوان مثال، در ردیف اول اثر متقابل زاویه تنظیم اصلی با زاویه تنظیم فرعی، زاویه براده، سرعت برشی و سرعت پیشروی نشان داده شده است. محور عمودی بیانگر میزان صافی سطح بر حسب میکرومتر و محور افقی سطوح تنظیمی هر یک از پارامترها را نشان می دهد.

تاگوچی شامل تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر روی خروجی فرآیند و تعیین سطوح بهینه ای این پارامترها است. روش تاگوچی با تجزیه و تحلیل داده های تجربی که در شرایط از پیش تعیین شده جمع آوری شده اند، به این اهداف دست می یابد. در این تحقیق طراحی آزمایش ها در محیط نرم افزار Minitab 16 انجام گرفته است. تاگوچی برای پنج فاکتور ورودی و پنج سطح، آرایه متعامد  $L_{25}$  را پیشنهاد می کند. بنابراین ۲۵ آزمایش، طبق سطوح آرایه شده در جدول (۳)، انجام و زبری سطح قطعات اندازه گیری شد. لازم به ذکر است، به منظور افزایش دقت آزمایش ها، ترتیب انجام آزمایش ها به صورت اتفاقی (نه لزوماً به ترتیب آرایه شده در جدول (۳)) بوده است. زبری سطح بر حسب میکرومتر، در سه



شکل ۴ بررسی اثر متقابل پارامترهای تنظیمی بر صافی سطح

ناصافی سطوح در گروه اول، ابعاد و تلرانس‌ها در گروه دوم و عمر مفید آن در دسته سوم قرار می‌گیرند. تاگوچی برای محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز، بر حسب اینکه مشخصه‌ی مورد نظر جزء کدام یک از سه گروه فوق باشد، روابط مختلفی را ارائه کرده است. اما به طور کلی، در هر آزمایش همواره بالاترین نسبت (S/N) مطلوب است. مقادیر بالای (S/N) نشان دهنده‌ی این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و اغتشاشی می‌باشد. خروجی اندازه‌گیری شده در این تحقیق، زبری سطح است که در گروه هر چه کمتر، بهتر قرار می‌گیرد. بنابراین از رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود.

$$S/N = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right) \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق  $n$  تعداد تکرار هر آزمایش و  $y_i$  مقدار نامین خروجی اندازه‌گیری شده است. نسبت سیگنال به نویز برای هر یک از ۲۵ آزمایش انجام شده با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردیده و در ستون آخر جدول (۳) نشان داده شده است. به عنوان مثال، برای محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش اول با توجه به این که هر یک از آزمایش‌ها یک مرتبه انجام شده و  $n$  برابر با یک است، داریم:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} (8.13)^2 = -18.2$$

**تحلیل واریانس (Analysis of Variance).** چون در آزمایش‌های عاملی کسری، تنها بخشی از مجموعه‌ی حالات ممکن مورد آزمایش قرار می‌گیرند، به منظور حصول اطمینان از دقت نتایج نهایی، می‌بایست از روش‌های آماری مناسب استفاده نمود. تحلیل واریانس، یک روش آماری استاندارد است که در

با توجه به شکل (۴)، مشخص است که در بررسی اثر متقابل زاویه‌ی تنظیم اصلی و فرعی به‌زای زاویه‌ی تنظیم اصلی در سطح پنجم و زاویه‌ی تنظیم فرعی در سطح اول صافی سطح مینیمم به دست می‌آید.

### تحلیل نسبت سیگنال به نویز (Signal to Noise Ratio).

در روش تاگوچی، فاکتورها یا متغیرهای فرآیند به دو گروه فاکتورهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم می‌شوند. عوامل کنترلی (Signal Factor) آن دسته از عواملی هستند که کنترل آنها به راحتی امکان‌پذیر بوده و به منظور انتخاب بهترین شرایط در طراحی فرآیندهای ساخت به کار می‌روند. به عنوان مثال، سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش در فرآیندهای ماشین‌کاری به عنوان عوامل کنترلی در نظر گرفته می‌شوند. متغیرهای غیر کنترلی (Noise Factor) تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند، اما بدین دلیل که کنترل آنها مشکل است یا شناخت کافی از آنها وجود ندارد، بر حسب مورد، ثابت در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، در یک فرآیند ماشین‌کاری ارتعاشات دستگاه، دما، رطوبت و سایر شرایط محیطی عوامل غیر کنترلی محسوب می‌شوند.

نسبت سیگنال به نویز، نشان‌دهنده‌ی حساسیت مشخصه‌ی مورد بررسی به فاکتورهای ورودی در یک فرآیند کنترل شده می‌باشد [15]. شرایط بهینه با تعیین تأثیر هر یک از فاکتورهای ورودی بر روی مشخصه‌ی خروجی، شناسایی می‌شود. از نقطه نظر مشخصه‌ی خروجی فرآیند، آن را می‌توان به سه دسته‌ی هر چه کمتر، بهتر (Smaller the better)، هر چه به مقدار اسمی نزدیک‌تر، بهتر (Nominal the best) و هر چه بزرگتر بهتر (Larger the better) تقسیم‌بندی نمود. به عنوان مثال، برای یک قطعه‌ی ماشین‌کاری شده میزان



کمتر از ۰/۰۵ می باشد.

آماره‌ی F یا تست فراوانی (Frequency Test) نیز مانند آماره‌ی P برای تعیین معنادار بودن تأثیرات پارامترها بر روی خروجی به کار می رود [9]. از جدول (۴) مشخص است که مقدار آماره‌ی F برای هر یک از ورودی‌ها از مقدار بحرانی ( $F_{0.05,4,4} = 6.38$ ) که از جدول‌های آماری استاندارد به دست می آید، بیشتر است. در نتیجه، تمامی پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق دارای معنای آماری و فیزیکی بر روی خروجی فرآیند (صافی سطح) هستند. ستون آخر جدول (P%) نیز که سهم هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی را بر حسب درصد نشان می‌دهد در شکل (۵) به صورت نمودار میله‌ای ترسیم شده‌اند.

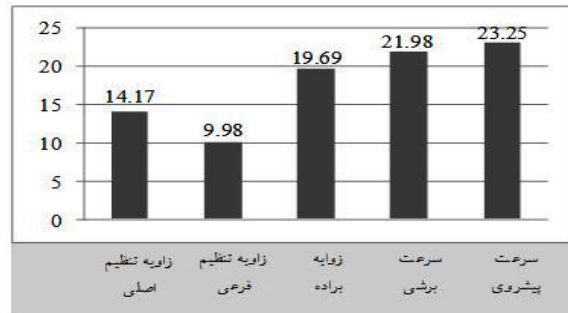
همان‌گونه که ذکر شد، شکل (۵) میزان تأثیر هر یک از پارامترهای متغیر بر خروجی را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که سرعت پیشروی (با بیش از ۲۳٪) بیشترین تأثیر را بر روی صافی سطح دارد. سایر پارامترها به ترتیب اهمیت، سرعت برشی، زاویه‌ی براده، زاویه‌ی تنظیم اصلی و زاویه‌ی تنظیم فرعی می‌باشند. با توجه به نمودار شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای ماشین‌کاری نسبت به هندسه‌ی ابزار، تأثیر بیشتری بر روی صافی سطح دارند.

محاسبه‌ی درجه‌ی اطمینان و تعیین درصد مشارکت هر یک از متغیرها بر روی خروجی فرآیند، کاربرد دارد [15]. در ادامه، تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی نتایج آزمایش‌های تراشکاری فولاد AISI1045 ارایه می‌شود.

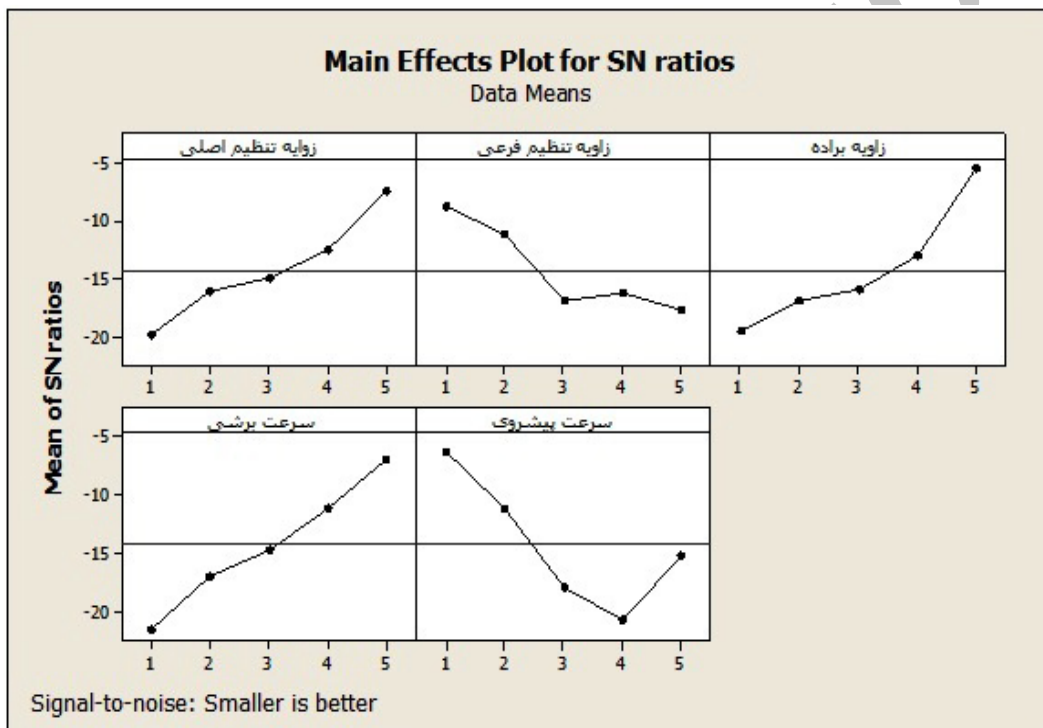
جدول (۴)، تحلیل واریانس برای صافی سطح در تراشکاری فولاد AISI1045 را نشان می‌دهد. این تحلیل بر اساس سطح اطمینان ۹۵٪ (عدم قطعیت ۵٪) انجام شده است. ستون دوم جدول، درجه‌ی آزادی (DF) هر یک از پارامترها، ستون سوم مجموع مربعات (SeqSS)، ستون چهارم مجموع مربعات یافته (Adj SS)، ستون پنجم میانگین مجموع مربعات (AdjMS)، ستون ششم آماره‌ی F، ستون هفتم آماره‌ی P و ستون هشتم میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی مورد نظر (P%) را نشان می‌دهند. آماره‌ی P به منظور تعیین معنادار بودن تأثیر هر یک از پارامترها بر روی خروجی استفاده می‌شود. با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ که تحلیل بر اساس آن انجام شده، اگر مقدار P برای هر یک از پارامترها کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان دهنده‌ی معنادار بودن تأثیر پارامتر بر خروجی است. همان‌گونه که در جدول مشخص است مقدار P برای همه‌ی پارامترها

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس نسبت سیگنال به نویز

	DF	SeqSS	Adj SS	AdjMS	F Test	P value	P(%)
x	۴	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۱۰۵/۶۹	۸/۸۰	۰/۰۲۹	۱۴/۱۷
x'	۴	۳۱۲/۱	۳۱۲/۱	۷۸/۰۲	۶/۵۰	۰/۰۴۹	۹/۹۸
γ	۴	۵۶۸/۷	۵۶۸/۷	۱۴۲/۱۸	۱۱/۸۴	۰/۰۱۷	۱۹/۶۹
v	۴	۶۲۹/۴	۶۲۹/۴	۱۵۷/۳۵	۱۳/۱۰	۰/۰۱۴	۲۱/۹۸
f	۴	۶۶۲/۸	۶۶۲/۸	۱۶۵/۷۰	۱۳/۸۰	۰/۰۱۳	۲۳/۲۵
Error	۴	۴۸/۰۵	۴۸/۰۵	۱۲/۰۱			۱۰/۹۱
Total	۲۴	۲۶۴۳					۱۰۰



شکل ۵ درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر صافی سطح



شکل ۶ میانگین نسبت سیگنال به نویز

سیگنال به نویز، مطلوب می‌باشد. بنابراین بر اساس میانگین نسبت سیگنال به نویز هر پارامتر تنظیمی، می‌توان سطوح بهینه‌ی آنها را تعیین نمود. با توجه به شکل (۶)، بهترین سطوح پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار برای دستیابی به بهترین صافی سطح (کمترین زبری سطح) با در نظر گرفتن علامت منفی،  $f_1 v_5 \gamma_5 x_1 x_5$  هستند. به این ترتیب برای کسب زبری سطح مطلوب، باید سرعت پیشروی برابر  $0.05$

در تحقیق حاضر، طبق رابطه‌ی (۱) مقادیر سیگنال به نویز (S/N) برای نتایج تمامی آزمایش‌ها محاسبه شد. سپس برای هر یک از سطوح مورد آزمایش هر پارامتر، میانگین مقدار سیگنال به نویز به دست آمد. شکل (۶) میانگین نسبت سیگنال به نویز برای هر یک از پنج پارامتر تنظیمی را در فرآیند تراشکاری نشان می‌دهد. همان‌گونه که ذکر شد، همواره مقادیر بالای نسبت

شده است. در این خصوص، از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها و تعیین سطوح بهینه‌ی پارامترها و از تحلیل واریانس برای اثبات معنادار بودن تأثیر پارامترها بر روی خروجی استفاده شده است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که تمامی پنج پارامتر تنظیمی، که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، دارای تأثیرات معنادار بر صافی سطح قطعات می‌باشند. همچنین به کمک تحلیل نسبت سیگنال به نویز که بر روی نتایج آزمایش‌های عملی انجام پذیرفت، سطوح بهینه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار برای ماده‌ی مورد بررسی، تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که برای کسب بهترین صافی سطح، سه پارامتر سرعت برشی، زاویه‌ی براده و زاویه‌ی تنظیم اصلی باید در بالاترین سطح و نرخ پیشروی و زاویه‌ی تنظیم فرعی در پایین‌ترین سطح خود قرارگیرند. در همین راستا، با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA)، میزان تأثیر هر یک از این پارامترها در خروجی فرآیند ماشین‌کاری مورد ارزیابی قرارگرفت. براساس نتایج تحلیل واریانس، پارامترهای هندسه‌ی ابزار، نسبت به پارامترهای ماشین‌کاری، تأثیر کمتری بر روی صافی سطح دارند. از میان پارامترهای ماشین‌کاری، سرعت پیشروی نسبت به سرعت برشی تأثیر بیشتری بر روی کیفیت سطح قطعات را دارا می‌باشد. رویکرد ارایه شده در این تحقیق را می‌توان، با اعمال تغییرات جزئی، برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی سایر فرآیندهای ماشین‌کاری نیز مورد استفاده قرار داد.

میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۱۰۴ متر بر دقیقه، زاویه‌ی براده ۲۰ درجه، زاویه‌ی تنظیم فرعی ۴ درجه و زاویه‌ی تنظیم اصلی بر روی ۴۰ درجه تنظیم شوند. لازم به ذکر است، در کاربردهای عملی مقادیر فوق را می‌توان به نزدیک‌ترین مقدار قابل تنظیم گرد نمود.

به منظور تأیید نتایج بهینه‌سازی، یک آزمایش (با تنظیم مقادیر بهینه‌ی به دست آمده) انجام و سه مرتبه تکرار گردید. میانگین صافی سطح در این سه آزمایش برابر با  $1/3$  میکرون متر به دست آمد که نسبت به بهترین حالت در بین آزمایش‌های انجام شده حدود ۱۴ درصد بهبود کیفیت سطح را در پی داشته است. این مسأله، نشان‌گر قابل اعتماد بودن نتایج و روش پیشنهادی در این مطالعه برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای تنظیمی در فرآیند تراشکاری فولادهای AISI 1045 می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، کیفیت قطعات ماشین‌کاری شده با معیار صافی سطح آنها سنجیده می‌شود. کیفیت سطح قطعات به‌نوبه‌ی خود وابسته به پارامترهای برشی و هندسه‌ی ابزار مورد استفاده می‌باشد. بنابراین، برای دستیابی به کیفیت سطح مطلوب، پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار باید به صورت همزمان بر روی مقادیر مناسب، تنظیم شوند. در این مطالعه، اثرات همزمان پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار بر روی صافی سطح قطعات تراشکاری شده از جنس فولاد AISI 1045 بررسی

### مراجع

1. Mukherjee, I. and Ray, K.R., "A Review of Optimization Techniques in Metal Cutting Processes", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 50, pp. 15-34, (2006).
2. Gokkaya, H. and Nalbant, M., "The Effects of Cutting Tool Geometry and Processing Parameters on the Surface Roughness of AISI 1030 Steel", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 717-721, (2007).

3. Yang, W.H. and Tarng, Y.S., "Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations Based on the Taguchi Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, pp. 122-129, (1998).
4. Kopac, J., Bahor, M. and 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*, Vol. 42, pp. 707-716, (2002).
5. Chien, W.T. and Tsai, C.S., "The Investigation on the Prediction of Tool Wear and the Determination of Optimum Cutting Conditions in Machining 17-4PH Stainless Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 340-345, (2003).
6. Nalbant, M., Gokkaya, H. and Sur, G., "Application of Taguchi Method in the Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1379-1385, (2007).
7. Aslan, E., Camuscu, N. and Birgoren, B., "Design Optimization of Cutting Parameters When Turning Hardened AISI 4140 Steel(63 HRC) with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiCN Mixed Ceramic Tool", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1618-1622, (2007).
8. Manna, A. and Salodkar, S., "Optimization of Machining Conditions for Effective Turning of E0300 Alloy Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, pp. 143-157, (2008).
9. Muthukrishnana, N. and Davim, P.D., "Optimization of Machining Parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN Analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 225-232, (2009).
10. Kini, M.V. and Chincholkar, A.M., "Effect of Machining Parameters on Surface Roughness and Material Removal Rate in Finish Turning of  $\pm 30$  Glass Fibre Reinforced Polymer Pipes", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3590-3598, (2010).
۱۱. رازفر، محمدرضا، اصول ماشین‌کاری و ابزار شناسی، تهران: دانشگاه صنعتی امیر کبیر، (۱۳۸۴).
12. Coelho, R.T., Silva, L.R., Braghini, A. and Bezerra, A.A., "Some Effects of Cutting Edge Preparation and Geometric Modifications When Turning INCONEL 718 at High Cutting Speeds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, pp. 147-153, (2004).
13. Fang, N. and Wu, Q., "The Effects of Chamfered and Honed Tool Edge Geometry in Machining of Three Aluminum Alloys", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 1178-1187, (2005).
14. Kountanya, R., Al-Zkeri, I. and Altan, T., "Effect of Tool Edge Geometry and Cutting Conditions on Experimental and Simulated Chip Morphology in Orthogonal Hard Turning of 100Cr6 Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5068-5076, (2009).
15. Roy, R.K., "A primer on the Taguchi method", New York: Van Nostrand Reinhold, (1990).