



کاربرد روش تاگوچی در بهینه‌سازی سایش کناره‌ای ابزار در ماشینکاری با سرعت بالا

عطا فردآقائی^{۱*}، مهدی جلالی عزیزپور^۲

۱. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

نویسنده مسئول: a.agmaie@iauhvaz.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش، پیش‌بینی شرایط بهینه‌ای از پارامترهای ماشینکاری شامل روش پوشش ابزار، سرعت برش، میزان پیشروی و عمق برش برای به حداقل رساندن سایش ابزار در تراشکاری فولاد AISI 4140 سخت شده، با ابزار پوشش داده شده به روش PVD و CVD، می‌باشد. در سال‌های اخیر گرایش به سمت تکنولوژی پوشش‌دهی ابزار برش، با افزایش سرعت برش و نرخ پیشروی، افزایش یافته است. این ابزارها با استفاده از دو روش متفاوت پوشش داده می‌شوند: رسوب فیزیکی بخار (PVD) و رسوب شیمیایی بخار (CVD). آرایه متعامد L₁₈ از طراحی آزمایشات تاگوچی و نسبت سیگنال به نویز (S/N) جهت انجام بهینه‌سازی پارامترها استفاده شد. همچنین آنالیز واریانس (ANOVA) جهت تعیین اهمیت پارامترهای موثر، به کار گرفته شد. در نهایت آزمون تایید با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی، جهت اعتبارسنجی و نشان دادن کارآمد بودن این روش انجام گرفت. نتایج نشان داد ابزار با پوشش PVD بهترین عملکرد را برای حداقل سایش ابزار دارد. همچنین سرعت برش، مهمترین پارامتر تاثیرگذار بر سایش ابزار به دست آمد. نتایج آزمون تایید، نشان داد که روش تاگوچی یک روش قابل اطمینان و موفق برای بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری جهت حداقل سایش ابزار در تراشکاری سرعت بالای فولاد AISI 4140 می‌باشد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، روش تاگوچی، مکانیزم سایش، سایش کناره‌ای، روش پوشش‌دهی.

مقدمه

ماشین کاری امروزه به طور وسیعی در فرآیند تولید قطعات در صنایع مکانیک، استفاده می‌شود [۱]. فن‌آوری ابزارهای برش که در ماشین کاری استفاده می‌شوند، به سرعت در حال پیشرفت است و بهبود در عملکرد ابزار را می‌توان با افزایش قدرت ابزار برش با در نظر گرفتن مقاومت در برابر سایش به دست آورد. در سال‌های اخیر گرایش به سمت تکنولوژی پوشش‌دهی ابزار برش، با افزایش سرعت برش و نرخ پیشروی، افزایش یافته است [۲]. ابزار روکش‌دار داری ساختاری مرکب از مواد، شامل یک زیر لایه می‌باشد که با موادی سخت، ضد اصطکاک، شیمیایی بی اثر و عایق حرارتی در حدود ضخامت یک تا چند میکرومتر پوشش داده می‌شوند [۳]. ابزارهای کاربردی، امروزه از جمله رایج‌ترین و محبوب‌ترین ابزارهای برش در دسترس و مورد استفاده می‌باشند [۴]. این ابزارها با استفاده از دو روش متفاوت پوشش داده می‌شوند: رسوب فیزیکی بخار (PVD) و رسوب شیمیایی بخار (CVD) [۲]. رسوب فیزیکی بخار طیف وسیعی از فرآیندهای پوشش‌دهی در خلا را شامل می‌شود که در آن مواد به طور فیزیکی از یک ماده به عنوان منبع، با بخار و یا چرخش^۱ جدا شده و بر روی سطح مورد نظر به شکل یک فیلم قرار داده می‌شوند [۳]. رسوب‌دهی شیمیایی بخار (CVD)، بر خلاف روش PVD که در خلا انجام می‌گیرد، یک فرایند حرارتی فعال بر اساس واکنش ترکیبات شیمیایی گاز با زیر لایه‌های

^۱- Sputtering



مناسب گرم و آماده است. بخارات واکنش اولیه می‌تواند هالیدهای فلزی مانند کلراید، بروماید یا فلوراید و... و یا فلزات کربنی باشد. در تجزیه ترکیبات اجزا فلز، انرژی گرمایی نقش اصلی را دارد و زیر لایه دارای دمای قابل ملاحظه‌ای از سایر بخش‌ها می‌باشد. پوشش CVD برای اینسرت‌های کاربیدی در سال ۱۹۶۰ تجاری شد. پوشش PVD تقریباً ۲۰ سال بعد ساخته شد و امروزه هر دو روش پوشش‌دهی در بازار ابزار برش استفاده می‌شوند. اکثر اینسرت‌هایی که در حال حاضر در عملیات برش فلزات مختلف استفاده می‌شوند، ابزار کارباید سمند پوشش داده شده با مواد متشکل از نیتراید (CrN, TiN و...)، کاربایدها (CrC, TiC و...)، اکسید (آلومینا و...) و یا ترکیبی از اینها و مواد نانو کامپوزیت می‌باشند [۳]. در چند سال گذشته، مقایسه پوشش PVD و CVD از نقطه نظر عملکرد ماشینکاری، موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. در برخی مطالعات، پوشش PVD نتایج بهتری نشان داده در حالی که پوشش CVD عملکرد بهتری در بعضی دیگر از مطالعات نشان داده است. به همین دلیل، تعیین ابزار برش مناسب و انواع پوشش برای آن جهت افزایش عملکرد ماشینکاری و کاهش هزینه‌های تولید، بسیار مهم است. از این رو در سال‌های اخیر، تعدادی از مدل‌های آماری برای تحلیل و بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری مانند روش پاسخ سطح (RSM)، تکنیک‌های رگرسیون، تحلیل واریانس (ANOVA) و روش تاگوچی ارائه شده است. تکنیک بهینه‌سازی تاگوچی یک روش بهینه‌سازی منحصر به فرد و قدرتمند در مقایسه با شیوه‌های سنتی مختلف می‌باشد. لین و هرایس [۴] مکانیزم سایش و عملکرد ابزار برای اینسرت پوشش داده شده به روش PVD و پوشش TiAlN در ماشینکاری سرعت بالای فولاد AISI 4140، تحت شرایط خشک و مرطوب را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که ماشینکاری خشک عملکرد بهتری را نسبت به استفاده از روانکار در استفاده از این نوع اینسرت خواهد داشت. همچنین مکانیزم سایش ساییدگیو خستگی در سرعت‌های برش بالا تحت برش خشک و مکانیزم سایش گرمایی بعد از خستگی در برش مرطوب به دست آمد. گونای و همکارش [۵] در سال ۲۰۱۳ روش تاگوچی را برای بهینه‌سازی زبری سطح در تراش کاری چدن سفید پر آلیاژ با دو نوع ابزار سرامیکی و CBN به کار گرفتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که کوچکترین مقدار زبری سطح در طول ماشین-کاری نیکل سخت با سختی HRC ۶۰ و نیکل سخت با سختی HRC ۵۰، به ترتیب به مقدار ۰/۲۶۲ میکومتر و ۰/۲۸۰ میکومتر با ابزار برش CBN به دست آمده است. اثرات متغیرها بر زبری سطح توسط ANOVA تعیین شد. مهمترین متغیر برای نیکل سخت با سختی HRC ۶۲، نرخ پیشروی بود در حالی که مهمترین متغیر برای نیکل سخت با سختی HRC ۵۰ سرعت برش بود. شهرم و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳ روش تاگوچی را برای بررسی تاثیر شرایط روان کار بر زبری سطح در عملیات فرزکاری به کار بردند. آنها از دو نوع شرایط روان کار MQL و Wet استفاده کردند و نتیجه گرفتند که پارامتر مهم تاثیرگذار بر زبری سطح به ترتیب، نرخ پیشروی و به دنبال آن سرعت برش و عمق برش می‌باشند. آلبا و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۳ عملکرد ابزارهای سرامیکی معمولی و وایپر را بر زبری سطح در تراش سخت فولاد AISI 4140 بررسی کردند. آنها دریافتند که ابزار وایپر عملکرد بهتری دارد. همچنین نرخ پیشروی عامل مهم در زبری سطح شناخته شد. داس و همکاران [۸] با استفاده از روش تاگوچی همراه با روش پاسخ سطح (RSM) و تحلیل واریانس (ANOVA) به بررسی تراشکاری خشک فولاد AISI 4140 سخت شده با استفاده از ابزار سرامیکی پوشش داده شده با TiN و روش PVD پرداختند. آنها دریافتند که سرعت برش عامل اصلی موثر بر سایش کناره‌ای ابزار می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت برش، سایش کناره‌ای افزایش یافته و به همین دلیل کیفیت سطح فوراً رو به کاهش می‌گذارد. چین-چانیکار و چادری [۹] تاثیر سختی قطعه کار، پارامترهای برش و نوع پوشش ابزار بر زبری سطح، عمر ابزار، نیروی برش و مورفولوژی براده را در تراشکاری فولاد AISI 4340 سخت شده در سطوح متفاوت، بررسی کردند. بهترین زبری سطح برای قطعه با بیشترین سختی و ابزار با یک لایه TiAlN و پوشش دهی PVD مشاهده شد. همچنین بهترین عمر ابزار برای ابزار با یک لایه پوشش و یک لایه محافظت کننده اکسید Al_2O_3 ، به دست آمد. کیواک [۱۰] در سال ۲۰۱۴ از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری در فرزکاری فولاد هادفیلد با ابزارهای پوشش داده شده به روش PVD و CVD، استفاده کرد. او دریافت که اینسرت کاربیدی CVD با پوشش $Al_2O_3/TiCN$ عملکرد بهتری نسبت به اینسرت کاربیدی PVD با پوشش TiAlN به نمایش می‌گذارد و



می‌تواند برای استفاده در فرزکاری فولاد هادفیلد توصیه شود. همچنین توجه به نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری، نشان داد که نرخ پیشروی پارامتر مهم برای زبری سطح با سهم تاثیر ۸۲/۳۸ درصد و سرعت برش با اهمیت ترین پارامتر برای سایش ابزار با سهم تاثیر ۴۹/۳۳ درصد بوده است. کارا و باراک [۱۱] عملکرد پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در فرآیند تراشکاری فولاد قالب DIN 1.2738 سخت‌کاری شده را بررسی و شناسایی شرایط بهینه ماشینکاری این فولاد را گزارش کردند. اصلان [۱۲] بهینه‌یازی و آنالیز پارامترهای موثر بر سایش کناره‌های ابزار در تراشکاری فولاد AISI 5140 بررسی کرد.

هدف از این پژوهش، پیش‌بینی شرایط بهینه‌ای از پارامترهای ماشینکاری شامل روش پوشش ابزار، سرعت برش، میزان پیشروی و عمق برش برای به حداقل رساندن سایش ابزار و بررسی مکانیزم سایش آن، در تراشکاری فولاد AISI 4140 سخت شده، با ابزار پوشش داده شده به روش PVD و CVD، می‌باشد. دلیل انتخاب این فولاد این است که، فولاد AISI 4140 یک نوع فولاد کم آلیاژ حاوی کروم، مولیبدن و منگنز است که امروزه به دلیل خواص خوب از قبیل استحکام بالا، مقاومت در برابر خستگی، سایش و ضربه، به طور وسیعی در صنایع گوناگون استفاده می‌شود. از این فولاد در ساخت تجهیزات از قبیل غلتک های صنایع سیمان، غلتک های صنایع فولاد، شاتون‌ها، چرخ دنده‌ها، محورهای خودرو، دنده فرمان، پیچ های مقاوم، ظروف تحت فشار، سازه هواپیما، قالب های تزریق پلاستیک استفاده می‌شود [۸]. آرایه متعامد L18 از طراحی آزمایشات تاگوچی جهت انجام بهینه‌سازی پارامترها استفاده شد. همچنین آنالیز واریانس (ANOVA) جهت تعیین اهمیت پارامترهای موثر، به کار گرفته شد. در نهایت آزمون تایید با استفاده از روش پیش‌بینی تاگوچی، جهت اعتبارسنجی و نشان دادن کارآمد بودن این روش انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

قطعه کار

عملیات تراشکاری در شرایط برش خشک، با استفاده از یک دستگاه ماشین تراش CNC با کنترلر مدل ۸۰۵۵ با موتور محرک ۱۵ kW انجام شد. نحوه نصب و شرایط قطعه کار در انجام آزمایشات تجربی، در شکل (۱) نشان داده شده است. مفتول فولاد ۴۱۴۰ به قطر ۷۰ mm و طول ۳۵۰ mm جهت انجام عملیات تراشکاری، مورد استفاده قرار گرفت. جهت بالا بردن سختی، در ابتدا، قطعه کار عملیات حرارتی گردید. بدین منظور قطعه کار در کوره با دمای ۸۵۰ C° به مدت ۳۰ دقیقه پخت و سپس در روغن کوئنچ شد. سپس جهت از بین بردن تنشهای پسماند و ایجاد ساختاری هموزنیزه، مجدداً در کوره با دمای ۲۰۰ C° به مدت ۱ ساعت بازپخت گردید. پس از عملیات حرارتی سختی قطعه کار در حدود $HRC 50 \pm 1$ به دست آمد ترکیب شیمیایی فولاد استفاده شده توسط آزمون اسپکترومتری با دستگاه کوانتومتر مدل Was-Fmp تعیین گردید. ترکیب شیمیایی به دست آمده در جدول (۱) آمده است.



شکل ۱: تنظیمات آزمایشات تجربی



جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4140 استفاده شده
در آزمایشات تجربی

عناصر	درصد وزنی (%)
C	۰,۳۷
Si	۰,۲۶
Mn	۰,۸۲
P	۰,۰۱۰
S	۰,۰۲۲
Cr	۰,۹۴
Mo	۰,۱۷
Ni	۰,۰۸
Cu	۰,۲۰
V	۰,۰۰۴

ابزار برش و پوشش

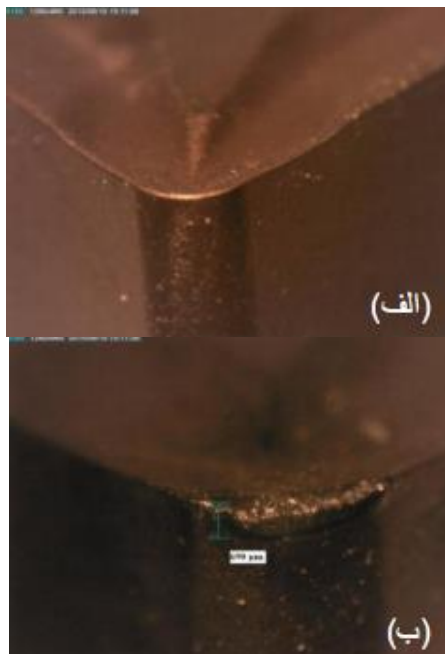
دو اینسرت کاربایدی یکسان با دو گرید متفاوت در پوشش دهی، پوشش PVD و CVD انتخاب شدند. اینسرت‌ها ساخت شرکت سندویک کرومانت و با مشخصات فنی CNMG120408-MF می‌باشند. جهت مشاهده تاثیر روش پوشش دهی ابزار، بر سایش آن، تمام مشخصات هندسی و براده‌شکن ابزارها با یکدیگر یکسان انتخاب شد. مشخصات ابزار و پوشش آنها در جدول (۲) آورده شده است. ابزار جهت انجام عملیات تراش بر روی نگهدارنده با مشخصات فنی PCLNL2020K12 قرار گرفت.

جدول ۲: مشخصات پوشش ابزار انتخابی [۱۵]

Grade	Coating procedure and composition	
GC1125	PVD	Oxide
GC2025	CVD	Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN

اندازه‌گیری سایش ابزار

مقدار سایش کناره‌ای ابزار کار کرده، پس از انجام کلیه آزمایشات، با استفاده از میکروسکوپ استریو اپتیکا با دوربین دینو متصل به کامپیوتر، اندازه‌گیری شد. سایش کناره‌ای هر اینسرت پس از ماشین‌کاری به طول ۷۵۰ میلیمتر از قطعه کار، اندازه‌گیری گردید. جهت جلوگیری از هرگونه خطایی، هر مقدار به تعداد ۳ بار اندازه‌گیری شد. شکل (۲) نمونه‌ای از تصویر ابزار سالم و کارکرده را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصویر لبه برنده ابزار (الف) قبل از عملیات ماشین کاری، (ب) بعد از عملیات ماشین کاری

طراحی آزمایشات و بهینه‌سازی

روش طراحی آزمایشات تاگوچی

روش تاگوچی یک روش طراحی قدرتمند است که به صورت گسترده ای در تجزیه و تحلیل مهندسی استفاده می‌شود [۳]. این روش یک تکنیک طراحی آزمایشات تجربی است که با استفاده از آرایه‌های متعامد، در جهت کاهش تعداد آزمایشات و به حداقل رساندن اثرات فاکتورهای غیر قابل کنترل، بسیار مفید می‌باشد. بزرگترین مزیت استفاده از روش تاگوچی، کاهش زمان آزمون، به منظور کاهش هزینه و یافتن اهمیت فاکتورهای موثر در یک بازه زمانی کوتاه است [۱۳]. در این روش، پارامترهای اصلی که فرض می‌شود در نتایج یک فرآیند موثر هستند، در ردیف‌های مختلف در یک آرایه متعامد طراحی شده، قرار می‌گیرند [۱۴]. تاگوچی از نسبت سیگنال به نویز (S/N) به عنوان مشخصه‌ای از انتخاب کیفیت، استفاده می‌کند. نسبت (S/N) به عنوان یک مقدار قابل اندازه‌گیری به جای انحراف معیار استفاده می‌شود زیرا هنگامی که به صورت متوسط کاهش می‌یابد، انحراف معیار نیز کاهش می‌یابد و بالعکس [۱۳]. سه تابع مختلف که به عنوان تابع هدف شناخته شده و همچنین جهت نسبت (S/N) تعریف می‌شود، وجود دارد: "هرچه بزرگ‌تر، بهتر"، "هرچه کوچک‌تر، بهتر"، "هرچه به مقدار اسمی نزدیک‌تر، بهتر". علاوه بر این، تحلیل واریانس (ANOVA) برای تعیین اهمیت آماری پارامترهای برش استفاده می‌شود. ترکیب بهینه از پارامترهای برش به کمک ANOVA و نسبت (S/N) مشخص می‌گردد [۱۴]. هدف از این تحقیق، به دست آوردن حداقل سایش ابزار است. بنابراین مشخصه کیفیت "هرچه کوچک‌تر، بهتر" همانطور که در رابطه (۱) نشان داده شده است مورد استفاده قرار گرفت.

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n Y_i^2 \right] \quad (1)$$



در معادله فوق Y_1 نتیجه مشاهده شده در آزمایش آم و n تعداد نتایج کل آزمایشات می‌باشد. در این تحقیق، پارامترهای ماشینکاری جهت حداقل سایش ابزار، بهینه‌سازی شده‌اند. سه سطح مختلف برای سرعت برش (V)، نرخ پیشروی (F)، عمق برش (d) و دو سطح مختلف روش پوشش‌دهی ابزار به عنوان پارامترهای ماشینکاری انتخاب شده‌اند (متغیرها). سطوح انتخابی متغیرها در محدوده توصیه شده توسط سازنده ابزارهای برش و اطلاعات مطالعات پیشین، انتخاب شده است (جدول ۳). مناسب‌ترین آرایه متعامد L_{18} برای تعیین پارامترهای بهینه برش و تحلیل اثرات پارامترهای ماشینکاری انتخاب شد. جدول (۴) آرایه متعامد مرکب L_{18} جهت انجام آزمایشات تجربی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: پارامترهای متغیر ماشین‌کاری در آزمایشات تجربی و سطوح آنها

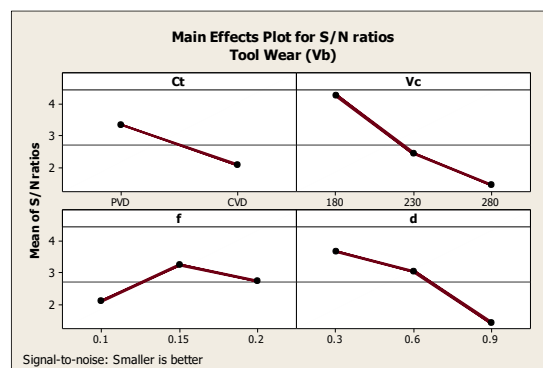
فاکتورها	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
روش پوشش‌دهی ابزار	A	PVD	CVD	-
سرعت برش (m/min)	B	۱۸۰	۲۳۰	۲۸۰
نرخ پیشروی (mm/rev)	C	۰,۱۰	۰,۱۵	۰,۲۰
عمق برش (mm)	D	۰,۳	۰,۶	۰,۹

نتایج و بحث

تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N)

پس از انجام همه آزمایشات، مقدار میانگین سایش ابزار $0,7476$ (mm) به دست آمد. به طور مشابه مقدار میانگین برای نسبت S/N سایش ابزار $2,717$ (dB) حاصل شد. آنالیز تاثیر هر فاکتور کنترل (Ct, V, f, d) بر سایش ابزار با استفاده از جدول پاسخ S/N صورت گرفت (جدول ۵). این جدول، که با استفاده از تکنیک تاگوچی ساخته شده، سطوح بهینه فاکتورهای کنترل برای بهینه بودن سایش ابزار را نشان می‌دهد. مقادیر سطوح فاکتورها بر اساس جدول (۵) در نمودارهای شکل (۳) نمایش داده شده است. بهترین سطح جهت بهینه بودن، به وضوح در این نمودارها قابل دیدن می‌باشد. سطوح با بالاترین نسبت S/N ، سطوح بهینه برای حداقل سایش ابزار است. بر اساس مقادیر جدول (۵) مشاهده می‌شود که سطوح بهینه به صورت $A1B1C2D1$ به دست آمد. بنابراین سطوح بهینه برای سایش ابزار عبارت است از Ct در سطح اول (PVD)، V_c در سطح اول (180 m/min)، f در سطح دوم ($0,15$ mm/rev) و d در سطح اول ($0,3$ mm).

نتایج آزمایشات تجربی و نسبت S/N آنها با توجه به مشخصه کیفیت "هرچه کوچک‌تر، بهتر" در جدول (۶) آورده شده است.



شکل ۳: نمودار پاسخ نسبت S/N جهت تعیین سطوح بهینه برای سایش ابزار



جدول ۴: آرایه متعامد $L_{18} (2^{**}1 3^{**}3)$ طراحی آزمایشات تاگوچی

شماره آزمایش	فاکتور A	فاکتور B	فاکتور C	فاکتور D
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۲
۳	۱	۱	۳	۳
۴	۱	۲	۱	۱
۵	۱	۲	۲	۲
۶	۱	۲	۳	۳
۷	۱	۳	۱	۲
۸	۱	۳	۲	۳
۹	۱	۳	۳	۱
۱۰	۲	۱	۱	۳
۱۱	۲	۱	۲	۱
۱۲	۲	۱	۳	۲
۱۳	۲	۲	۱	۳
۱۴	۲	۲	۲	۱
۱۵	۲	۲	۳	۲
۱۶	۲	۳	۱	۱
۱۷	۲	۳	۲	۲
۱۸	۲	۳	۳	۳

جدول ۵: پاسخ نسبت S/N جهت تعیین سطوح بهینه برای سایش ابزار V_b

سطوح	فاکتورهای کنترلی			
	A	B	C	D
سطح ۱	۳,۳۵۴	۴,۲۸۲	۲,۱۳۰	۳,۶۶۸
سطح ۲	۲,۰۷۹	۲,۴۳۶	۳,۲۵۴	۳,۰۴۵
سطح ۳	-	۱,۴۳۲	۲,۷۶۶	۱,۴۳۷

مقادیر پر رنگ سطوح بهینه را نشان می‌دهد.



جدول ۶: نتایج آزمایشات تجربی و نسبت‌های S/N

شماره آزمایش	فاکتور A پوشش ابزار (ct)	فاکتور B سرعت برش (۷)	فاکتور C پیشروی (f)	فاکتور D عمق برش (d)	سایش ابزار V_b (mm)	نسبت S/N V_b (dB)
۱	PVD	۱۸۰	۰,۱۰	۰,۳	۰,۵۴۵	۵,۲۷۲۰۷
۲	PVD	۱۸۰	۰,۱۵	۰,۶	۰,۵۵۰	۵,۱۹۲۷۵
۳	PVD	۱۸۰	۰,۲۰	۰,۹	۰,۶۳۰	۴,۰۱۳۱۹
۴	PVD	۲۳۰	۰,۱۰	۰,۳	۰,۶۵۵	۳,۶۷۵۱۷
۵	PVD	۲۳۰	۰,۱۵	۰,۶	۰,۶۸۵	۳,۲۸۶۱۹
۶	PVD	۲۳۰	۰,۲۰	۰,۹	۰,۷۶۰	۲,۳۸۳۷۳
۷	PVD	۲۸۰	۰,۱۰	۰,۶	۰,۸۰۵	۱,۸۸۴۰۸
۸	PVD	۲۸۰	۰,۱۵	۰,۹	۰,۸۶۵	۱,۲۵۹۶۸
۹	PVD	۲۸۰	۰,۲۰	۰,۳	۰,۶۹۰	۳,۲۲۳۰۲
۱۰	CVD	۱۸۰	۰,۱۰	۰,۹	۰,۹۵۵	۰,۳۹۹۹۳
۱۱	CVD	۱۸۰	۰,۱۵	۰,۳	۰,۵۰۵	۵,۹۳۴۱۷
۱۲	CVD	۱۸۰	۰,۲۰	۰,۶	۰,۵۷۰	۴,۸۸۲۵۰
۱۳	CVD	۲۳۰	۰,۱۰	۰,۶	۰,۷۵۹	۲,۳۹۵۱۶
۱۴	CVD	۲۳۰	۰,۱۵	۰,۹	۰,۸۵۰	۱,۴۱۱۶۲
۱۵	CVD	۲۳۰	۰,۲۰	۰,۳	۰,۸۴۵	۱,۴۶۲۸۷
۱۶	CVD	۲۸۰	۰,۱۰	۰,۹	۱,۱۰۲	-۰,۸۴۳۶۳
۱۷	CVD	۲۸۰	۰,۱۵	۰,۳	۰,۷۵۵	۲,۴۴۱۰۶
۱۸	CVD	۲۸۰	۰,۲۰	۰,۶	۰,۹۳۰	۰,۶۳۰۳۴

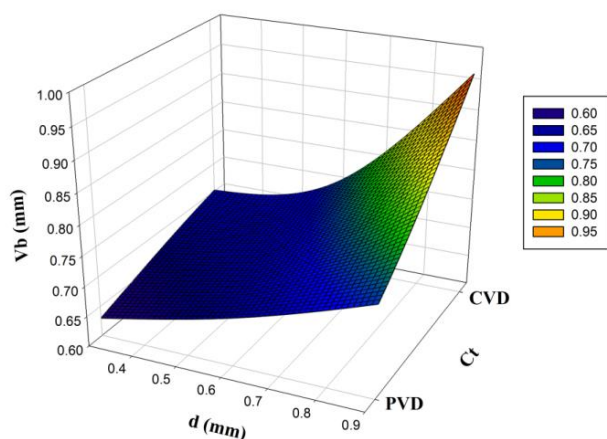
بررسی نتایج آزمایشات تجربی

در شکل (۴) عملکرد پوشش ابزار در سرعت و عمق برش برای سایش ابزار به طور جداگانه بررسی شده است. مشاهده می‌شود که در کلیه سرعت‌های برش تفاوت در سایش برای هر دو ابزار محسوس است. افزایش سرعت برش باعث می‌شود که حرارت و بارهای مکانیکی به وسیله بالا رفتن دما در منطقه برش، افزایش یابند و این سرعت بالا، تغییر شکل در ابزار را به دنبال خواهد داشت [۲]. افزایش عمق برش باعث افزایش منطقه تداخل ابزار با قطعه و براده شده و منجر به بالا رفتن دما در محدوده برش می‌شود، در نتیجه با افزایش عمق برش مقدار سایش افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود در عمق برش کم‌تر، با توجه به تفاوت ابزارهای برش، اما مقدار سایش تغییر چشم‌گیری نداشته است در صورتی که در عمق برش بیشتر (۰,۹ mm) تفاوت مقدار سایش برای دو ابزار چشم‌گیر است.

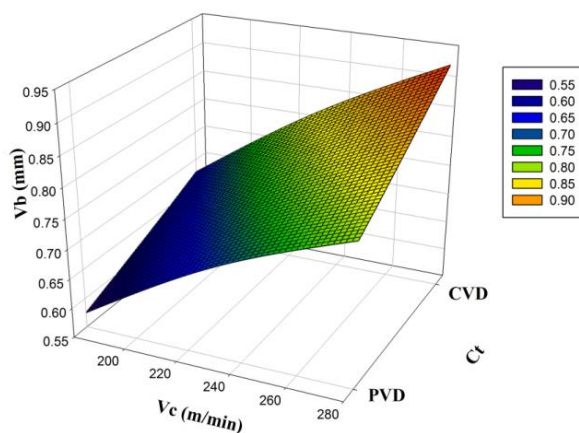


آنالیز واریانس

ANOVA یک روش آماری است که برای تعیین اثرات فردی هر فاکتور کنترل در یک طراحی آزمایشات، استفاده می‌شود. در این تحقیق، از آنالیز واریانس جهت تحلیل اثر روش پوشش‌دهی ابزار، سرعت برش، میزان پیشروی و عمق برش بر زبری سطح، استفاده شده است. نتیجه این تحلیل در جدول (۷) آمده است. این آنالیز در سطح اهمیت ۰,۰۵ و دامنه اطمینان ۹۵٪ انجام گرفت. اهمیت هر فاکتور کنترل توسط مقایسه مقدار پارامتر F برای هر فاکتور به دست می‌آید. ستون آخر جدول (۷) درصد مشارکت هر فاکتور که در واقع بیانگر میزان تاثیر آن در فرآیند انجام شده، را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج جدول (۷) بالاترین میزان درصد مشارکت برای سایش ابزار سرعت برش با درصد مشارکت ۳۴,۴٪ به دست آمد.



(الف)



(ب)

شکل ۴: عملکرد ابزارها در سایش ابزار (الف) در عمق‌های برش آزمایش،
(ب) در سرعت‌های برش آزمایش



جدول ۷: نتایج تحلیل واریانس ANOVA برای سایش ابزار

منبع واریانس	درجه آزادی (DoF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربع (MS)	نسبت واریانس (F)	درصد مشارکت (%)
Ct	۱	۰,۰۶۵۵۲۲	۰,۰۶۵۵۲۲	۱۱,۴۹	۱۳,۶
V	۲	۰,۱۶۲۶۵۱	۰,۰۸۱۳۲۵	۱۴,۲۶	۳۴,۴
f	۲	۰,۰۳۲۰۲۰	۰,۰۱۶۰۱۰	۲,۸۱	۴,۷
d	۲	۰,۱۲۲۱۷۱	۰,۰۶۱۰۸۵	۱۰,۷۱	۲۵,۲
Error	۱۰	۰,۰۵۷۰۳۹	۰,۰۰۵۷۰۴	-	۲۲,۱
Total	۱۷	۰,۴۳۹۴۰۲	-	-	۱۰۰

ردیف پر رنگ، موثرترین پارامتر در فرآیند می‌باشد.

پیش بینی سایش بهینه ابزار

تخمین سایش بهینه ابزار از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$Vb_{opt} = \bar{Vb} + (\bar{Ct}_{opt\ level} - \bar{Vb}) + (\bar{Vc}_{opt\ level} - \bar{Vb}) + (\bar{f}_{opt\ level} - \bar{Vb}) + (\bar{d}_{opt\ level} - \bar{Vb}) \quad (2)$$

در این رابطه، \bar{Vb} مقدار میانگین کل سایش ابزار و \bar{Vc} ، \bar{f} ، \bar{d} و \bar{Ct} بیانگر مقدار میانگین سطوح بهینه برای Vb_{opt} هستند. مقادیر میانگین کل برای \bar{Vb} از آزمایشات تجربی مقدار $0,7476$ (mm) به دست آمد. با جایگذاری مقادیر به دست آمده از جدول (۸) در رابطه (۲) مقدار بهینه برای سایش ابزار $0,438$ (mm) به دست می‌آید. با استفاده از رابطه (۲) می‌توان مقدار پارامتر خروجی آزمایش را در هر یک از موقعیت‌های آزمایشی دلخواه به دست آورد، به این ترتیب که میانگین عملکرد هر فاکتور کنترلی را در سطوح مورد نظر در یک موقعیت آزمایشی به دست آورده (جدول ۸) و آن را در رابطه فوق به جای عملکرد میانگین فاکتورها در سطح بهینه قرار می‌دهیم. بدین ترتیب مقدار پیش‌بینی شده به روش تاگوچی برای پارامتر خروجی در آن موقعیت آزمایشی به دست آمده است. جهت اعتبارسنجی بیشتر، یک آزمایش تجربی نیز با انتخاب تصادفی سطوح فاکتورهای کنترل، انجام گرفت. جدول (۹) مقادیر به دست آمده از آزمایشات تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده به روش تاگوچی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش با مقادیر پیش‌بینی شده بسیار به هم نزدیک هستند و مقدار خطا زیر 20% می‌باشد. یک آنالیز آماری هنگامی فابل اعتماد است که خطا کمتر از 20% باشد [۲]. بنابراین نتایج نشان داد که فرآیند پیش‌بینی در این تحقیق کاملاً موفقیت آمیز بوده است.

جدول ۸: پاسخ میانگین سایش ابزار Vb در سطوح آزمایش

سطوح	فاکتورهای کنترلی			
	Ct	V	f	d
سطح ۱	۰,۶۸۷۲	۰,۶۲۵۸	۰,۸۰۳۵	۰,۶۶۵۸
سطح ۲	۰,۸۰۷۹	۰,۷۵۹۰	۰,۷۰۱۷	۰,۷۱۶۵
سطح ۳	-	۰,۸۵۷۸	۰,۷۳۷۵	۰,۸۶۰۳

مقادیر پر رنگ سطوح بهینه را نشان می‌دهد.



جدول ۹: مقایسه مقادیر به دست آمده از آزمایشات تجربی
و مقادیر پیش بینی شده به روش تاگوچی برای سایش ابزار

خطا (%)	مقدار اختلاف	پیش بینی	آزمایش تجربی	سطوح
۱۶,۹%	۰,۰۷۴	۰,۴۳۸	۰,۵۱۲	A2B3C1D2 (سطوح بهینه)
۵,۱%	۰,۰۴۱	۰,۸۰۱	۰,۷۶۰	A1B2C3D3 (سطوح تصادفی)

آزمون تایید

در روش تاگوچی، بهینه سازی توسط آزمایش‌های تایید، پس از تعیین سطوح بهینه متغیرها در فرآیند اعتبارسنجی می‌گردد [۳]. این که فرآیند به اندازه کافی بهینه شده است، باید بررسی شود. بدین منظور از روابط (۳) و (۴) جهت تشخیص دامنه اطمینان برای پیش‌بینی سایش ابزار، استفاده شد.

$$c.l.Ra,Vb = \sqrt{f_{\alpha,1,f_e} \times V_e \times \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (۳)$$

و

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + T_{dof}} \quad (۴)$$

که در آن، $f_{\alpha,1,f_e}$ نسبت F برای دامنه اطمینان ۹۵٪ و سطح اهمیت α ، f_e درجه آزادی خطا، V_e واریانس خطا، n_{eff} تعداد تکرار موثر، R تعداد تکرار آزمون تایید می‌باشد. همچنین N تعداد کل آزمایشات و T_{dof} تعداد کل درجات آزادی فاکتورهای اصلی، هستند. با در نظر گرفتن α برابر با ۰,۰۵ و مقدار f_e از جدول (۷)، بر اساس جدول استاندارد نسبت F، مقدار $f_{0.05,1,10}$ برابر با ۴,۹۶۴ به دست می‌آید. مقدار V_e از جدول (۷) برابر $۰,۰۵۷۰۴$ ، با توجه به دو بار تکرار در انجام آزمون تایید، R برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با جایگذاری مقادیر در روابط (۳) و (۴) مقدار دامنه اطمینان ± 0.16 حاصل می‌شود. اکنون بررسی می‌کنیم که آیا مقدار بهینه در آزمایش تجربی در دامنه اطمینان وجود دارد یا خیر. بنابراین:

$$[Vb_{optformula} - c.l.] < Vb_{optexp} < [Vb_{optformula} + c.l.] = [0.438 - 0.16] < 0.512 \quad (۵)$$

$$< [0.438 + 0.16] = 0.278 < 0.512 < 0.598$$

مشاهده شد که مقادیر بهینه به دست آمده از آزمایشات در دامنه اطمینان ۹۵٪ وجود دارد. بنابراین، بهینه سازی فرآیند برای سایش ابزار با استفاده از روش تاگوچی در سطح اهمیت ۰,۰۵ به دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش تاگوچی برای تعیین شرایط بهینه پارامترهای ماشینکاری در تراشکاری فولاد AISI4140 سخت شده با اینسرت‌های پوشش داده شده به روش PVD و CVD تحت شرایط برش خشک، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجربی با استفاده از نسبت S/N و ANOVA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- مهمترین پارامتر تاثیرگذار بر سایش ابزار، سرعت برش با درصد مشارکت ۳۴,۴۲٪ به دست آمد.



۲- سطوح بهینه برای پارامترهای ماشینکاری روش پوشش ابزار، سرعت برش، میزان پیشروی و عمق برش برای حداقل سایش ابزار به ترتیب، Ct در سطح اول (PVD)، V_c در سطح اول (180 m/min)، f در سطح دوم (0.15 mm/rev) و d در سطح اول (0.3). به دست آمد.

۳- مقدار سایش ابزار بهینه 0.09 (mm) پیش بینی شد که در دامنه اطمینان 95% و سطح اهمیت 0.05 به دست آمد.

۴- نتایج آزمون تایید و نزدیکی مقادیر پیش بینی شده به مقادیر حاصل از آزمایشات تجربی، نشان داد که روش بهینه‌سازی تاگوچی یک روش قابل اطمینان برای پیش‌بینی سایش ابزار، در شرایط متفاوت پارامترهای ماشینکاری در تراشکاری این فولاد می‌باشد.

مراجع

- [1] Benardos. P.G.. Vosniakos. G.. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 4. pp 844-852.
- [2] Bouzakis. K.. Michailidis. N.. Skordaris. G.. Bouzakis. E.. Biermann D.. M'Saoubi. R.. (2012). Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. *IRP Annals - Manufacturing Technology* 61. pp 703 – 723.
- [3] Khrais. K.. Khrais. Y.J.. Lin (2007) . Wear mechanisms and tool performance of TiAlN coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear* 262. pp 64–69.
- [4] Narasimha. M.. Reiji Kumar. R.. Kassie. A.. (2013). Performance of Coated Carbide Tools. *The International Journal of Engineering and Science*. 4. pp 47-54.
- [5] Günay. M.. Yücel. M.. (2013). Application of Taguchi Method for Determining Optimum Surface Roughness in Turning of High-Alloy White Cast Iron. *Measurement* 46. pp 913 – 919.
- [6] Shahrom. M.. Shahrom. N. X. Yusoff. M. (2013). Taguchi Method Approach on Effect of Lubrication Condition on Surface Roughness in Milling Operation. *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology. Procedia Engineering* 53. pp 594 – 599.
- [7] Elbah. M.. Yaltese. M.. Aouici. H.. Mabrouki. T.. (2013). Comparative Assessment of Wiper and Conventional Ceramic Tools on Surface Roughness in Hard Turning AISI 4140 steel. *Measurement* 46. pp 3041 – 3056.
- [8] Das. S.. Dhupal. D.. Kumar. A.. (2014). Experimental Investigation into Machinability of Hardened AISI 4140 steel Using TiN Coated Ceramic Tool. *Measurement* 52. pp 812-818.
- [9] Chinchankar. S.. Choudhury. S.K..(2013). Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tool. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 38. pp 124–133.
- [10] Kıvık. T.. (2014). Optimization of Surface Roughness and Flank Wear Using the Taguchi method in Milling of Hadfield Steel with PVD and CVD Coated inserts. *Measurement* 50. pp 19 – 28.
- [11] Kara. F.. Fuat. O.. (2019). Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel. *Sensor Review*, 2019.
- [12] Aslan. A.. (2020) Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140. *Measurement* 163. 107959.
- [13] Asiltürk. I. Akkus. H.. (2011). Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement* 44. pp 1697–1704.
- [14] Palanikumar. K.. (2011). Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites. *Measurement* 44. pp 2138–2148.
- [15] Any name. (2014). *Catalog and Technical Turning Sandvik Coromant Company, Manufacturer of Cutting Tools.*