



## بهینه‌سازی کنترل تطبیقی در فرآیند ماشین‌کاری قطعات سخت

محمد زادشکویان<sup>۱\*</sup>، وحید پورمستغیمی<sup>۲</sup>، حسن حیدری<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، zdashkoyan@tabrizu.ac.ir

### چکیده

در ماشین‌کاری به روش‌های سنتی، پارامترهای ماشین‌کاری براساس داده‌های موجود در کتاب‌های مرجع یا تجربه فرد برنامه‌نویس و یا پیشنهاد سازندگان ابزار، تعیین می‌شود و تغییرات انجام یافته در حین ماشین‌کاری مانند تغییر در میزان سایش ابزار و یا تغییر در ابعاد قطعه کار در تعیین این پارامترها تاثیری ندارند. این امر عملاً باعث کاهش عملکرد فرآیند ماشین‌کاری می‌شود. سیستم‌های کنترل تطبیقی با هدف محاسبه پارامترهای ماشین‌کاری بهینه با در نظر گرفتن تغییرات صورت گرفته در حین انجام ماشین‌کاری پیشنهاد شده و گسترش یافته‌اند. روش‌های بهینه‌سازی ماشین‌کاری به دو صورت برون‌خط و برخط می‌باشند. اکثر تحقیقات انجام شده برای بهینه‌سازی به صورت برون‌خط انجام شده است، به عبارت دیگر پارامترهای ماشین‌کاری محاسبه شده در این روش بدون در نظر گرفتن تغییرات نرخ سایش ابزار تعیین می‌شوند. برای اعمال تاثیر این گونه تغییرات در فرآیند بهینه‌سازی باید از نوع برخط استفاده شود. در این مقاله از روش گرادینان برای پیدا کردن مقادیر بهینه پارامترهای برش در فرآیند تراش کاری قطعات سخت استفاده شده است. بررسی نتایج شبیه‌سازی شده برای ماشین‌کاری بهینه شده و بهینه نشده تحت شرایط و پارامترهای ورودی یکسان نشان می‌دهد که با انجام بهینه‌سازی برخط، عملکرد کلی سیستم ماشین‌کاری افزایش می‌یابد و مقدار حجم براده برداشته شده توسط ابزار در ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه شده به مقدار قابل توجهی از حجم براده برداشته شده توسط ابزار در ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه نشده بیشتر می‌شود.

کلید واژه‌ها: تراش کاری قطعات سخت، بهینه‌سازی، کنترل تطبیقی

## Adaptive control optimization in the finishing process of hardened materials

Mohammad Zadshakoyan\*, Vahid Pourmostaghimi, Hasan Heidary

Department of mechanical-manufacturing Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 5166616471 Tabriz, Iran, zdashkoyan@tabrizu.ac.ir

### ABSTRACT

In traditional machining systems, cutting parameters are usually selected prior to machining according to handbooks or user's experience and variations during the machining process such as tool wear and dimensional changes are not considered in selecting cutting parameters. This practice will have a negative effect on the performance of machining. Adaptive control systems have been proposed and developed to find optimal cutting parameters by considering ongoing variations during machining process. Optimization of machining process can be done by off-line or on-line methods. The majority of researches in this field have been conducted in off-line mode. In other words, selection of optimal cutting parameters has been done without considering progressive tool wear. In order to investigate the effect of tool wear in selection of optimal cutting parameters, on-line methods for optimization of machining process should be used. In this paper, the gradient method has been proposed to find optimal cutting parameters during hard turning operation. The results of performed simulations showed that by using adaptive control optimization techniques, the performance of machining process improved and material removal rate increased remarkably.

**Keywords:** Adaptive Control, Hard Turning, Optimization.

به کمک تکنیک‌هایی مانند مدل‌های ریاضی، شبکه‌های عصبی و منطق فازی

به دست می‌آیند.

اصولاً ماشین‌کاری در شرایط بهینه تابع پارامترهای مختلفی است که این شرایط حتی بدون در نظر گرفتن نرخ سایش ابزار در حین ماشین‌کاری تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال کاهش نرخ پیشروی و سرعت برشی باعث افزایش عمر ابزار می‌شود، ولی در عوض باعث کاهش نرخ براده‌برداری خواهد شد و یا افزایش نرخ پیشروی زمان ماشین‌کاری را کم خواهد کرد ولی ممکن است صافی سطح موردنظر را ایجاد نکند. بنابراین برای بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای ماشین‌کاری بهینه، محدودیت‌هایی مانند حداقل و حداکثر سرعت

### ۱- مقدمه

یکی از مهمترین موضوعاتی که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان در زمینه ماشین‌کاری بوده است، مسئله بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری می‌باشد. روش‌های کلاسیک و تکاملی متعددی برای بهینه کردن مقادیر پارامترهای ماشین‌کاری مانند سرعت برشی، میزان پیشروی و عمق برش بر این اساس ارائه شده است، اما تمامی این روش‌ها در حالت برون‌خط کاربرد داشته و قابلیت بهینه کردن برخط فرآیند را ندارند [۱]. در بهینه‌سازی برخط، مقادیر بهینه پارامترهای ماشین‌کاری، از طریق کسب و جمع‌آوری داده‌ها از سنسورهای مختلف مانند سنسور نیرو، ارتعاش، صوت و پردازش این داده‌ها

Please cite this article using:

M. Zadshakoyan, V. Pourmostaghimi, H. Heidary, Adaptive Control Optimization in the Finish Turning of Hardened Materials, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 163-170, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تجهیزات و کارگر، مقدار نرخ سایش ابزار و مقدار نرخ براده‌برداری تاثیرگذار می‌باشند. برای مدل‌سازی فرآیند در این تحقیق از داده‌های نتایج تجربی بدست آمده توسط سایر محققین استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آزمایشات تجربی

مواد مورد استفاده در این تحقیق فولاد AISI H13 با سختی HRC ۵۵ و به قطر ۱۵mm بوده و آزمایشات بر روی دستگاه کنترل عددی EmcoTurn و توسط ابزار CBN صورت پذیرفته است. هرچند ابزارهای CBN گران قیمت می‌باشند، اما به علت مقاومت حرارتی بالا و چقرمگی عالی، عمدتاً در تراش-کاری مواد سخت به‌کار می‌روند و دارای مقاومت به سایش بسیار بالایی می‌باشند. این کارایی ابزارهای CBN باعث افزایش رقابت میان فرآیند پرهزینه‌ی سنگ‌زنی و فرآیند ماشین‌کاری قطعات سخت در فرآیند پرداخت-کاری قطعات گردیده است. مقادیر سایش توسط یک میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۳۰ برابر اندازه‌گیری شد. مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار متلب انجام گرفت.

### ۲-۲- سیستم‌های کنترل تطبیقی

سیستم‌های کنترل تطبیقی، AC، برای ماشین ابزارها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- کنترل تطبیقی با بهینه‌سازی (ACO).
- کنترل تطبیقی با محدودیت‌ها (ACC)<sup>۷</sup>.

سیستم‌های ACO به سیستم‌هایی اطلاق می‌شوند که در آن مقدار بیشینه ضریب عملکرد سیستم که معمولاً یک تابع اقتصادی است مورد نظر می‌باشد، به طوری که محدودیت‌های سیستم و فرآیند نیز در نظر گرفته شده باشند. در سیستم‌های ACC ماشین‌کاری با پارامترهای ماشین‌کاری بیشینه در محدوده مشخصی که توسط سیستم و فرآیند محدود شده‌اند، مانند ماکزیمم توان مصرفی انجام می‌گیرد. در سیستم‌های ACC همچنین برای فرآیند مورد نظر، ضریب عملکرد تعریف نمی‌شود. به طور کلی در هر دو سیستم، استراتژی تطبیقی برای اعمال پارامترهای ماشین‌کاری بهینه شده در زمان حقیقی به فرآیند ماشین‌کاری به کار گرفته می‌شود.

هدف اصلی اکثر سیستم‌های AC افزایش بهره‌وری فرآیند ماشین‌کاری با افزایش نرخ براده‌برداری (MRR)<sup>۸</sup> در طول عملیات برش می‌باشد. تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که در فرآیندهای ماشین‌کاری که از سیستم‌های کنترل تطبیقی، AC، استفاده می‌شود، بهره‌وری نسبت به سیستم‌های ماشین‌کاری به روش سنتی در حدود ۲۰ تا ۸۰ درصد به نسبت ماده قطعه‌کار و پیچیدگی تولید آن افزایش می‌یابد [۱۵،۱].

سیستم‌های AC، در حالتی که عمق و عرض برش در حین انجام ماشین‌کاری تغییرات زیادی دارند، مانند شرایط ماشین‌کاری در عملیات خشن‌کاری، نتایج بهتری را نشان می‌دهند. با توجه به این‌که با استفاده از سیستم کنترل تطبیقی، برنامه‌نویس قطعه زمانی را برای محاسبه مقادیر بهینه پارامترهای ماشین‌کاری صرف نخواهد کرد، در مرحله برنامه‌نویسی از لحاظ وقت صرفه‌جویی زیادی حاصل خواهد شد، به دلیل این‌که پارامترهای ماشین‌کاری مانند سرعت برشی و نرخ پیشروی به‌طور اتوماتیک توسط سیستم

برشی و نرخ پیشروی، حداکثر عمر ابزار، کیفیت زبری سطح ایجاد شده، حداکثر توان مجاز برای ماشین‌کاری، و حداکثر دمای مجاز برای نوک ابزار باید در نظر گرفته شود. برخی از محدودیت‌ها بستگی به ماشین ابزار، برخی بستگی به کیفیت سطح و بعضی بستگی به خواص متالورژیکی قطعه کار و ابزار برش دارند که باید قبل از بهینه‌سازی، مقادیر مجاز برای محدودیت‌ها مشخص شود.

برای ماشین‌کاری در شرایط بهینه و با در نظر گرفتن پارامتر نرخ سایش ابزار، بایستی اندازه‌ی آن در هر لحظه معلوم باشد برای اندازه‌گیری پارامترهایی که جهت اندازه‌گیری ضریب عملکرد به صورت برخط مورد نیاز است، یا باید از سنسورهای مختلف و مناسب که قبلاً اشاره شد، استفاده شود و یا از مدل‌های تحلیلی- تجربی برای پیش‌بینی موارد ذکر شده استفاده کرد، که در این تحقیق از مدل‌های تحلیلی- تجربی موجود در مراجع علمی معتبر برای تعیین مقدار نرخ سایش ابزار، مقدار سایش ابزار، زبری سطح ایجاد شده بر روی قطعه‌کار و دمای نوک ابزار استفاده شده است [۲].

در سال‌های اخیر از روش‌های تکاملی متفاوتی برای بهینه‌سازی فرآیندهای ماشین‌کاری استفاده شده‌است که از جمله می‌توان به استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی صافی سطح، نرخ براده‌برداری، هزینه تولید، هندسه ابزار [۳-۶]، استفاده از الگوریتم تجمع ذرات در بهینه‌سازی چند منظوره فرآیند سنگ‌زنی [۷]، استفاده از الگوریتم کولونی مورچگان در فرآیند تراش چند مرحله‌ای [۸]، استفاده از الگوریتم آموزش و یادگیری در بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند تراش کاری [۹]، استفاده از روش تاگوچی در بهینه‌سازی پارامترهای فرزکاری [۱۰]، و شبکه‌های عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری فولاد اینکونل [۱۲،۱۱] اشاره نمود.

چاندراسکاران<sup>۱</sup> و همکاران با استفاده از روش گرادبان و نیروهای برشی، یک سیستم کنترل تطبیقی براساس مقادیر بهینه پارامترهای برش ارائه کردند [۱]. گران<sup>۲</sup> و همکاران یک ساختار بهینه‌ساز کنترل تطبیقی قابل آموزش را در فرآیند سوراخ‌کاری معرفی کردند. البته الگوریتم پیشنهاد شده برای حالت کلی یک سیستم تولید طراحی شده و قابلیت افزایش میزان یادگیری را براساس نیاز موجود دارا می‌باشد [۱۳]. زوپرل<sup>۳</sup> و همکاران یک سیستم بهینه‌ساز کنترل تطبیقی در فرآیند فرزکاری ارائه دادند که در آن مرجع بهینه‌سازی، میزان نیروی حاصل از فرآیند برش بوده و تنها متغیر مستقل ورودی میزان پیشروی ابزار می‌باشد [۱۴]. لیانگ<sup>۴</sup> و همکاران در تحقیق خود کلیت موضوع بهینه‌سازی کنترل تطبیقی را مورد بررسی قرار داده و گزارشی از امکان‌سنجی استفاده از سنسورهای قابل استفاده در بررسی برخط سایش ابزار را ارائه نمودند [۱۵]. ژیونگ<sup>۵</sup> و همکاران میزان ارتعاش ابزار در فرآیند فرزکاری را به عنوان یک پارامتر مهم معرفی نموده و سیستم کنترل تطبیقی تحقیق خود را بر مبنای بهینه کردن مقدار ارتعاش ابزار با تغییر دادن پارامترهای برش به‌دست آوردند [۱۶].

هدف این تحقیق طراحی و مدل‌سازی یک سیستم کنترل تطبیقی با بهینه‌سازی (ACO) برای محاسبه پارامترهای ماشین‌کاری بهینه شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی، در مرحله پرداخت تراش‌کاری و به صورت برخط می‌باشد. برای انجام بهینه‌سازی، یک ضریب عملکرد برای فرآیند تراش کاری تعریف شده است که در آن عواملی مانند هزینه ماشین‌کاری، اعم از هزینه

1. Chandrasekaran
2. Grant
3. Zuperl
4. Liang
5. Zhiyong
6. Adaptive Control Optimization

7. Adaptive Control with Constraints  
8. Material Removement Rate

برای بهینه‌سازی مرحله پرداخت‌کاری فرآیند تراش‌کاری می‌باشد و به علت ارائه ضریب عملکرد شفاف و مناسب، در این تحقیق مدل پیشنهاد شده توسط کمپانی بندیکس مدنظر قرار گرفته است [۱۷]. با توجه به این‌که در ضریب عملکرد تعریف شده پارامتر نرخ سایش ابزار نیز تاثیرگذار می‌باشد، می‌توان تغییرات صورت گرفته بر روی ابزار را در هر لحظه برای محاسبه و تعیین پارامترهای ماشین‌کاری بهینه مدنظر قرار داد.

ضریب عملکرد به‌کار گرفته شده برای فرآیند تراش‌کاری همانند ضریب پیشنهادی کمپانی بندیکس می‌باشد که در رابطه‌ی (۲) نشان داده شده است.

$$\phi = \frac{MRR}{(C_1 + (C_1 \epsilon_1 + C_2 \beta))(TWR)/W_0} \quad (2)$$

که در این رابطه  $C_1$  هزینه ماشین و اپراتور در واحد زمان،  $C_2$  هزینه ابزار و تیزکاری برای یک تعویض ابزار،  $W_0$  حداکثر مقدار مجاز سایش ابزار،  $\epsilon_1$  زمان تعویض ابزار و  $\beta$  پارامتر تنظیم می‌باشد که معمولاً مابین ۰ و ۱ بوده و نوع ضریب عملکرد  $\phi$  را مشخص می‌کند.

اگر  $\beta=1$  باشد،  $\phi$  بیانگر معکوس هزینه برای هر قطعه است.

اگر  $\beta=0$  باشد،  $\phi$  بیانگر نرخ تولید است.

اگر  $0 < \beta < 1$  باشد،  $\phi$  هر دو پارامتر نرخ تولید و هزینه برای هر واحد را شامل می‌شود.  $TWR$  مقدار نرخ سایش ابزار برشی می‌باشد.

آشکارا می‌توان دید در این ضریب که نحوه عملکرد فرآیند تراش‌کاری را نشان می‌دهد، نرخ سایش ابزار ( $TWR$ ) تاثیرگذار می‌باشد. در حالی که در روش‌های بهینه‌سازی برون‌خط، نقشی برای نرخ سایش ابزار در حین فرآیند ماشین‌کاری در نظر گرفته نشده است.

## ۲-۵- مدل‌سازی تجربی

### ۲-۵-۱- مدل نرخ سایش ابزار

برای بدست آوردن مدل تجربی برای تعیین مقدار سایش و نرخ سایش از مدل ارائه شده توسط اوزل و کارپات استفاده شده است [۱۸].

$$VB = 6.329 \times 10^{-8} \times H^{2.96} \times E^{0.11} \times v^{0.48} \times f^{0.28} \times D^{-0.54} \times t^{0.54} \quad (3)$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق، نرخ سایش ابزار را که همان مشتق این رابطه نسبت به زمان است، به‌صورتی که در رابطه‌ی (۳) بیان می‌شود، می‌توان تعیین کرد.

$$TWR = 3.43 \times 10^{-8} \times H^{2.96} \times E^{0.11} \times v^{0.48} \times f^{0.28} \times D^{-0.54} \times t^{-0.45} \quad (4)$$

که در این‌که در این روابط  $VB$  مقدار سایش انجام شده در پهلوی ابزار برحسب  $H$ ،  $(mm)$ ، سختی قطعه‌کار در حال تراش‌کاری برحسب  $E$ ، HRC، شعاع لبه ابزار برحسب  $v$ ،  $(mm)$ ، سرعت برشی برحسب  $f$ ،  $(m/min)$ ، مقدار نرخ پیشروی برحسب  $D$  و قطر قطعه‌کار برحسب  $(mm)$  می‌باشد. با جای‌گذاری مقادیر سختی، شعاع لبه ابزار، و قطر قطعه‌کار، رابطه‌ی نهایی نرخ سایش ابزار بصورت رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$TWR = 1.65 \times 10^{-2} \times v^{0.48} \times f^{0.28} \times t^{-0.45} \quad (5)$$

### ۲-۵-۲- مدل زبری سطح و دما

میزان دمای نوک ابزار هنگام براده‌برداری و توان مصرفی لازم برای انجام عملیات برش از محدودیت‌هایی است که در فرآیند تراش‌کاری باید مدنظر واقع شود. برای پیش‌بینی دمای نوک ابزار و توان مصرفی برای ماشین‌کاری

کنترل تغییر می‌کنند و با شرایط واقعی برش تطبیق می‌یابند. این صرفه‌جویی در خصوص قطعاتی که پیچیدگی‌های زیادی داشته و عمق برش در آن‌ها تغییرات زیادی دارد، مانند ماشین‌کاری قطعات ریخته‌گری شده، قابل توجه خواهد بود.

## ۲-۳- سیستم کنترل تطبیقی با بهینه‌سازی

شکل ۱ نمایی از یک سیستم بهینه‌ساز کنترل تطبیقی را نمایش می‌دهد. سنسورهای مورد استفاده، گشتاور، دمای ابزار و ارتعاشات ماشین ابزار را اندازه‌گیری و برای محاسبه و تعیین مقادیر نرخ پیشروی و سرعت برش بهینه توسط کنترل‌کننده تطبیقی به آن واحد ارسال می‌کنند.

کنترل‌کننده تطبیقی از دو کامپیوتر و یک مجموعه جمع‌آوری داده<sup>۱</sup> (DRS) تشکیل یافته است. داده‌های موردنیاز واحد DRS از طریق اندازه‌گیری متغیرها توسط سنسورهای مناسب تامین می‌شود. واحد DRS در واقع یک کارت داده‌برداری به همراه یک کامپیوتر است که داده‌ها را از سنسورهای مختلف اخذ کرده و محاسبات ساده‌ای مانند محاسبه نرخ براده‌برداری را انجام می‌دهد.

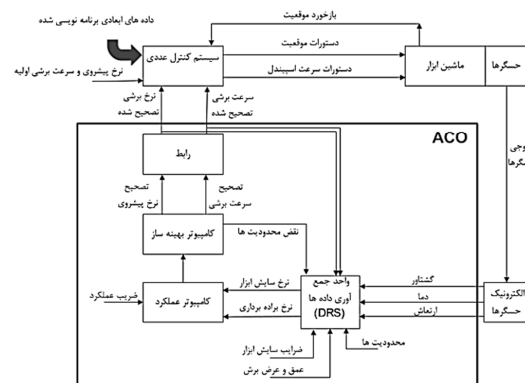
خروجی واحد DRS نرخ پیشروی و سرعت برشی با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعیین شده برای ماشین‌کاری می‌باشد. واحد DRS دو سیگنال خروجی ایجاد می‌کند که عبارتند از: نرخ براده‌برداری (MRR) و نرخ سایش ابزار<sup>۲</sup> (TWR). MRR در فرآیند تراش‌کاری طبق رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید.

$$MRR = v \times f \times a \quad (1)$$

که در آن  $v$  سرعت برشی  $(m/min)$ ،  $a$  عمق برش  $(mm)$ ، و  $f$  نرخ پیشروی  $(mm/rev)$  می‌باشد. TWR و MRR سیگنال‌هایی هستند که به عنوان ورودی‌های واحد کامپیوتر ارسال می‌شوند تا در محاسبه ضریب عملکرد به کار گرفته شوند.

## ۲-۴- ضریب عملکرد

نخستین گام برای انجام بهینه‌سازی تراش‌کاری تعیین تابع هدف یا همان ضریب عملکرد مناسب به‌نحوی است که فرآیند تراش‌کاری را مدل‌سازی نموده و تاثیر پارامترهای مختلف و موثر بر انجام فرآیند ماشین‌کاری را در عملکرد سیستم تراش‌کاری به‌خوبی نشان دهد. قبلاً گفته شد که برای فرایندهای ماشین‌کاری مدل‌های اقتصادی زیادی از سوی محققین ارائه شده‌است. ولی با توجه به این‌که هدف این تحقیق طراحی یک سیستم ACO



شکل ۱ نمایی کلی از یک سیستم کنترل تطبیقی با بهینه‌سازی

1. Data Reduction System
2. Tool Wear Rate

پارامترهای موثر و محدودیت‌های مورد نیاز برای انجام فرایند ماشین‌کاری و بهینه‌سازی به صورت مقادیر پیش فرض در جدول ۱ آورده شده‌اند. هزینه های درج شده در این جدول با در نظر گرفتن قیمت به‌روز ابزار و ماشین‌آلات مورد استفاده استخراج و ثبت شده‌اند [۱].

به‌ازای مقادیر پارامترهای ماشین‌کاری اولیه که به‌عنوان ورودی تعریف شده‌اند، مقادیر پارامترهای سایش ابزار، نرخ سایش ابزار، دمای نوک ابزار، زبری سطح ایجاد شده و عملکرد سیستم براده‌برداری بعد از یک مرحله ماشین‌کاری محاسبه شده و نتایج زیر حاصل شده است:

$$VB=0.105 \text{ (mm)}$$

$$TWR=0.057 \text{ (mm/sec)}$$

$$Temp=40.4 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$Ra=1.27 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$\phi=0.3199$$

اگر سرعت برشی و نرخ پیشروی که توسط برنامه نویس و از روی داده‌های هندبوک سازنده‌ی ابزار برای قطعه‌کار و ابزار مشخص شده برای انجام عملیات براده‌برداری در مرحله پرداخت به ترتیب برابر با  $v=160 \text{ (m/min)}$  و  $f=0.11 \text{ (mm/rev)}$  باشند [۱۸]، مقادیر گرادپانی به دست آمده برای سرعت برشی و پیشروی به ترتیب برابر خواهند بود با:  $\Delta v=16 \text{ (m/min)}$  و  $\Delta f=0.11$ .

تغییراتی به اندازه  $\Delta v$  و  $\Delta f$  بر روی سرعت برشی و نرخ پیشروی اولیه اعمال می‌شود و مجدداً مقدار سایش ابزار، نرخ سایش ابزار، دمای نوک ابزار، و زبری سطح ایجاد شده بر روی قطعه کار و عملکرد سیستم برای هر حالت محاسبه می‌شود. نحوه اعمال تغییرات در سرعت برشی و نرخ پیشروی در قسمت نتایج توضیح داده شده است.

برای بررسی حالت‌های مختلف سرعت برشی و نرخ پیشروی و جستجوی پارامترهای ماشین‌کاری بهینه، در هر لحظه نرم‌افزار پیشنهادی برای ایجاد ۹ حالت مختلف سرعت برشی و نرخ پیشروی، با احتساب حالت ورودی اولیه، به عنوان ورودی مبنا طراحی شده است. حالت‌های مختلف به وجود آمده، فضای جستجوی شرایط بهینه ماشین‌کاری را تشکیل می‌دهند. مقادیر ضریب عملکرد به ازای ۹ حالت موجود در این فضا محاسبه و با هم مقایسه شده و سرعت برشی و نرخ پیشروی، در حالتی که شرایط مطلوب را داشته باشد، به عنوان حالت بهینه انتخاب می‌شود. حالت‌های مختلف که توسط برنامه‌ی کامپیوتری ایجاد شده و پارامترها در آن حالات محاسبه می‌شوند، در شکل

بایستی از سنسورهای مناسب استفاده نمود و یا از مدل‌های تجربی قابل اعتماد بهره گرفت، که در این تحقیق از مدل‌های تجربی-تحلیلی که در منابع علمی برای تراش‌کاری فولادها اعلام شده است، استفاده می‌شود [۱۸]. فرمول تجربی پیش‌بینی دمای نوک ابزار در ماشین‌کاری فولادها توسط رابطه‌ی (۶) قابل پیش‌بینی است:

$$Temp = 74.96 \times v^{0.4} \times f^{0.2} \times a^{0.105} \quad (6)$$

زبری سطح ایجاد شده بر روی قطعه‌کار هم یکی از محدودیت‌هایی می‌باشد که بایستی در فرایند تراش‌کاری و به خصوص در مرحله پرداخت به آن توجه شود تا زبری سطح قطعه کار از میزان تعیین شده تجاوز ننماید. در این تحقیق برای پیش‌بینی اندازه زبری سطح ایجاد شده بر روی قطعه کار از مدل تجربی رابطه‌ی (۷) استفاده شده است [۱۸].

$$Ra = 125 \frac{f^2}{r} \quad (7)$$

که در این رابطه  $Ra$  زبری سطح ایجاد شده بر روی قطعه‌کار برحسب میکرون،  $f$  نرخ پیشروی برحسب میلی‌متر بر دور و  $r$  شعاع نوک ابزار برشی برحسب میلی‌متر می‌باشد.

با استفاده از روابط (۶) و (۷) می‌توان اندازه پارامترهای دمای نوک ابزار و زبری سطح را که از محدودیت‌های ماشین‌کاری می‌باشند محاسبه نموده و در حین انجام بهینه‌سازی از انتخاب پارامترهایی که باعث نقض شدن این محدودیت‌ها می‌شوند، جلوگیری کرد.

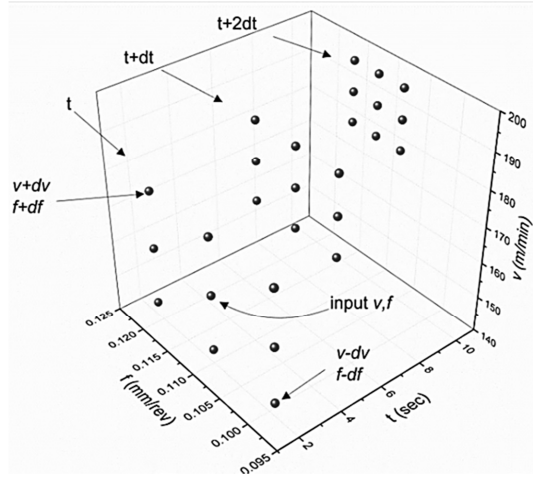
## ۲-۶- سیستم بهینه‌ساز و فرآیند کنترل

در این تحقیق سرعت برشی و میزان پیشروی در سیستم کنترل تطبیقی بصورت برخط بهینه شده و به واحد کنترل ماشین‌ابزار جهت اجرا اعمال می‌شود. برای بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری روش گرادپان استفاده شده است. براساس روش گرادپان، ابتدا مقادیر اولیه سرعت برشی و نرخ پیشروی توسط برنامه‌نویس برای انجام ماشین‌کاری تعیین می‌شود. از مدل‌های تجربی که قبلاً بحث شده است، نرخ سایش ابزار برای پارامترهای ماشین‌کاری ورودی در هر لحظه تعیین شده سپس از رابطه‌ی ضریب عملکرد، میزان عملکرد لحظه‌ای در فرآیند تراش‌کاری مشخص می‌شود.

برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای ماشین‌کاری، نرم‌افزار کامپیوتری پیشنهادی، سرعت برشی را به اندازه  $\Delta v$  تا  $\Delta v +$  و نرخ پیشروی را از  $\Delta f$  تا  $\Delta f +$  تغییر می‌دهد. در واقع  $\Delta v$  و  $\Delta f$  مقادیر گرادپانی به کار برده شده در این تحقیق می‌باشند که برابر با ۱۰٪ مقدار اولیه سرعت برشی و نرخ پیشروی انتخاب شده‌اند. از انجام این تغییرات حالت‌های مختلف سرعت برشی و نرخ پیشروی به وجود می‌آید. برای هر حالت به وجود آمده نرخ سایش ابزار با استفاده از مدل تجربی محاسبه شده و ضریب عملکرد سیستم براده‌برداری با توجه به نرخ سایش به دست آمده مشخص می‌گردد. از مدل‌های تجربی که میزان زبری سطح و دمای نوک ابزار را تعیین می‌نمایند این مقادیر محاسبه شده و از نتایج حاصل از محاسبات، محدودیت‌های مورد نظری را که برای انجام فرآیند ماشین‌کاری می‌بایست در نظر داشت، بررسی می‌شوند. با مقایسه نتایج به دست آمده از حالت‌های مختلف سرعت برشی و نرخ پیشروی که برای انجام ماشین‌کاری می‌توان آن‌ها را به کار گرفت، حالتی از سرعت برشی و نرخ پیشروی که بیشترین مقدار ضریب عملکرد را داشته و در عین حال از محدودیت‌های تعیین شده تجاوز ننموده باشد، به‌عنوان پارامترهای بهینه ماشین‌کاری انتخاب شده و به سیستم CNC اعمال می‌شود.

فرآیند بهینه‌سازی را با حل مثالی ادامه می‌دهیم:

جدول ۱ مقادیر اولیه برای پارامترهای موثر و محدودیت‌های فرآیند	
$D=15$	قطر قطعه کار برحسب (mm)
$H=55$	سختی قطعه برحسب (RC)
$E=0.1$	شعاع لبه ابزار برحسب (mm)
$r=1/19$	شعاع نوک ابزار برحسب (mm)
$a=1/25$	عمق بار برحسب (mm)
$t_1=10$	زمان تعویض ابزار (sec)
$C_1=60$	هزینه ماشین و اپراتور در واحد زمان (ریال)
$C_2=7000$	هزینه ابزار و تعویض ابزار در واحد زمان (ریال)
$\beta=0.15$	پارامتر تنظیم
$VB_{max}=0.13$	حداکثر مقدار سایش مجاز برای ابزار حسب (mm)
$Temp_{max}=50.5$	حداکثر دمای نوک ابزار برحسب ( $^\circ\text{C}$ )
$V_{min}=75$	حداکثر و حداقل سرعت برشی (m/min)
$f_{max}=1 \quad f_{min}=0.05$	حداکثر و حداقل نرخ پیشروی (mm/rev)
$Ra=20$	میزان زبری سطح برحسب میکرون
$\alpha=5^\circ$	زاویه آزاد ابزار برحسب درجه
$\gamma=5^\circ$	زاویه براده برحسب درجه



شکل ۳ نحوه تغییرات مقادیر  $\Delta v$  و  $\Delta f$  برای حالت ورودی سرعت برشی ۱۶۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۱۱ میلی‌متر بر دور

جدول ۲ سایش ابزار، نرخ سایش ابزار، زبری سطح، دمای نوک ابزار و ضریب عملکرد فرآیند ماشین‌کاری در ۹ حالت مختلف

شرایط ماشین‌کاری	$VB$ (mm)	$TWR$ (mm/s)	$Ra$ ( $\mu m$ )	Temp ( $^{\circ}C$ )	$\phi$
(۱۷۶ و ۰/۱۲۱)	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۶۱	۱/۵۳	۴۲۷	۰/۳۷۱۲
(۱۷۶ و ۰/۱۱۰)	۰/۰۱۱۰	۰/۰۰۵۹	۱/۲۷	۴۱۹	۰/۳۴۲۷
(۱۷۶ و ۰/۰۹۹)	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۵۸	۱/۰۲	۴۱۱	۰/۳۱۳۷
(۱۶۰ و ۰/۱۲۱)	۰/۰۱۰۸	۰/۰۰۵۸	۱/۵۳	۴۱۱	۰/۳۴۶۶
(۱۶۰ و ۰/۱۱۰)	۰/۰۱۰۵	۰/۰۰۵۷	۱/۲۷	۴۰۴	۰/۳۱۹۹
(۱۶۰ و ۰/۰۹۹)	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۵۵	۱/۰۲	۳۹۵	۰/۲۹۲۷
(۱۴۴ و ۰/۱۲۱)	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۵۵	۱/۵۳	۳۹۴	۰/۳۲۱۱
(۱۴۴ و ۰/۱۱۰)	۰/۰۹۹۰	۰/۰۰۵۴	۱/۲۷	۳۸۷	۰/۲۹۶۲
(۱۴۴ و ۰/۰۹۹)	۰/۰۹۷۰	۰/۰۰۵۲	۱/۰۲	۳۷۹	۰/۲۷۱۰

(۱۷۶ و ۰/۱۲۱) می باشد. با توجه به این‌که برای فرآیند ماشین‌کاری محدودیت‌هایی وجود دارد، بایستی این سرعت برشی و نرخ پیشروی از نظر محدودیت‌های ماشین‌کاری که قبلاً به آن‌ها اشاره شده است بررسی شوند تا از حد مجاز تعریف شده تجاوز ننموده باشند.

با مقایسه نتایج به‌دست آمده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که پارامترهای ماشین‌کاری حالت (۱۷۶ و ۰/۱۲۱) هیچ یک از محدودیت‌های مورد نظر را نقض نمی‌نماید. پس پارامترهای ماشین‌کاری در این حالت به‌عنوان پارامترهای ماشین‌کاری بهینه انتخاب و برای اعمال و انجام ماشین‌کاری در مرحله بعدی به سیستم CNC ارسال می‌شوند.

در لحظه ماشین‌کاری بعدی یعنی پس از گذشت زمان  $\Delta t$  و اتمام ماشین‌کاری در لحظه قبلی، شرایط ورودی مبناء در فضای جستجوی جدید همان مقادیر (۱۷۶ و ۰/۱۲۱) خواهند بود که مشابه ثانیه اول بایستی الگوریتم جستجو تکرار شود تا پارامترهای بهینه برای ماشین‌کاری در لحظه بعدی به‌دست آید. شکل ۴ ضریب عملکرد را فرآیند را برای حالات مختلف نمایش می‌دهد.

باید توجه داشت که فرایند بهینه‌سازی و انجام ماشین‌کاری همانند ماشین‌کاری‌های بهینه نشده تا زمانی ادامه می‌یابد که عمر ابزار پایان نیافته باشد، به

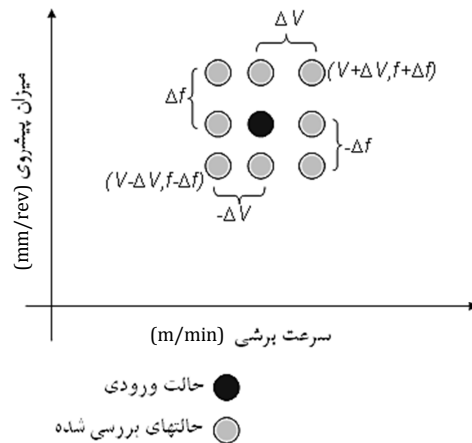
۲ نشان داده شده است. در اعمال این تغییرات به دلیل این‌که سرعت برشی و نرخ پیشروی مرحله قبلی، که بهینه بوده است، به صورت دست نخورده در فضای جستجو قرار می‌گیرد، اگر شرایط بهینه بودن را داشته باشند انتخاب خواهند شد، در غیر این صورت یکی از حالت‌های مجاور حالت ورودی که شرایط بهینه بودن را دارا می باشد به عنوان حالت بهینه انتخاب می‌شود. برای این‌که بتوان فضاهای انتخاب مختلفی را برای یافتن مقادیر بهینه جستجو نمود، در هر لحظه مقادیر  $\Delta v$  و  $\Delta f$  در یک ضریب کوچک کننده مانند ۰/۷۰ ضرب می‌شود تا فضای جستجو کوچک‌تر شده و جستجو در آن فضا صورت بگیرد. کاهش دادن فضای جستجو تا اندازه‌ای ادامه می‌یابد که دیگر عملاً تغییرات سرعت برشی و نرخ پیشروی به حدی کم باشند که محسوس نبوده و قابل اعمال نباشند. در این زمان برای ایجاد فضای جستجوی جدید، مقادیر  $\Delta v$  و  $\Delta f$  به اندازه‌ی مناسبی افزایش می‌یابند تا جستجوی مفیدتری برای یافتن پارامترهای بهینه ماشین‌کاری در این فضا انجام شود.

در شکل ۳ نمایی شماتیک از نحوه تغییر یافتن فضای جستجو در هر لحظه آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، با گذشت زمان، مقادیر  $\Delta v$  و  $\Delta f$  کاهش می‌یابند. این امر باعث افزایش دقت فرآیند بهینه‌سازی و کنترل تطبیقی شده و امکان استفاده از تنظیمات ریزتر برای پارامترهای برشی را میسر می‌سازد.

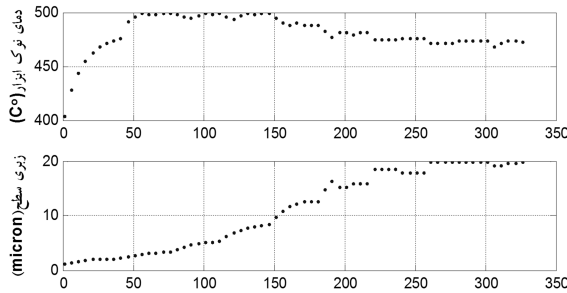
### ۳- نتایج

پس از اعمال تغییرات مورد نظر بر روی سرعت برشی و نرخ پیشروی ورودی با:  $\Delta v = 16 (m/min)$  و  $\Delta f = 0.11 (mm/rev)$  تعداد ۹ حالت مختلف ماشین‌کاری به‌وجود می‌آیند. برای هر حالت به وجود آمده از طریق مدل‌های تجربی مقادیر سایش ابزار، نرخ سایش، زبری سطح ایجاد شده، دمای نوک ابزار و عملکرد سیستم در یک ثانیه بعد از شروع ماشین‌کاری قابل محاسبه خواهد بود که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. البته همان‌گونه که مشخص می‌باشد، زوج (۱۶۰ و ۰/۱۱) پارامترهای اولیه پیشنهادی برای انجام ماشین‌کاری و زوج (۱۷۶ و ۰/۱۲۱) همان  $v + \Delta v, f + \Delta f$  و زوج (۱۴۴ و ۰/۰۹۹) همان  $v - \Delta v, f - \Delta f$  می‌باشد.

با مقایسه حالت‌های مختلف به وجود آمده مشاهده می‌شود که بیشینه ضریب عملکرد ۰/۳۷۱۲ و مربوط به ماشین‌کاری با سرعت برشی و نرخ پیشروی



شکل ۲ حالات مختلف سرعت برشی و نرخ پیشروی، با احتساب حالت ورودی به عنوان ورودی مبناء در  $v$  و  $f$



شکل ۶ تغییرات دمای نوک ابزار و زبری سطح در حین فرآیند ماشین‌کاری

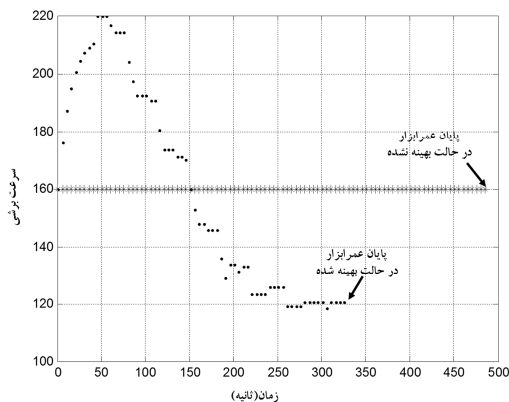
محدوده مجاز تعیین شده باشند و این امر در ساختار برنامه کامپیوتری لحاظ شده‌است. در شکل ۶ تغییرات دمای نوک ابزار و زبری سطح در حین فرآیند ماشین‌کاری آورده شده‌اند.

#### ۴- بحث

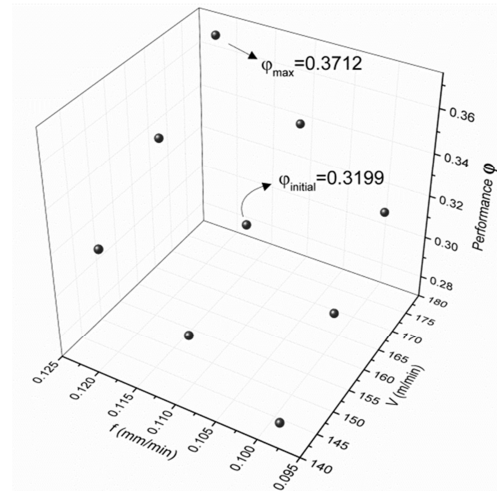
برای نشان دادن تاثیر بهینه‌سازی بر روی نحوه عملکرد سیستم براده برداری، باید مقایسه‌ای ما بین ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه شده و ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه نشده انجام بگیرد. برای مقایسه، تمام شرایط برای ماشین‌کاری اعم از نحوه تعیین ضریب عملکرد، معیار پایان یافتن عمر ابزار، ضرایب مربوط به عملکرد سیستم، مقدار سرعت برشی و نرخ پیشروی ورودی برای ماشین‌کاری در هر دو حالت یکسان در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود ورودی پارامترهای ماشین‌کاری برای سیستم ماشین‌کاری بهینه شده و ماشین‌کاری بهینه نشده برابر با  $v=160$  (m/min) و  $f=0.11$  (mm/rev) باشد. تغییرات سرعت برشی و تغییرات نرخ پیشروی برای هر دو حالت در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.

در ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه نشده، سرعت برشی و نرخ پیشروی از شروع تا پایان ماشین‌کاری ثابت مانده و همان مقدار اولیه خود را دارند. اما انجام بهینه‌سازی در طول فرآیند باعث شده است تا سرعت برشی و نرخ پیشروی مطابق با شرایط واقعی فرآیند برش تغییر یابند. برای بررسی دقیقتر تاثیر بهینه‌سازی بر عملکرد سیستم، باید تغییرات ضریب عملکرد سیستم براده برداری را بررسی نمود.

در شکل ۹ ضریب عملکرد سیستم برای ماشین‌کاری بهینه شده و ماشین‌کاری بهینه نشده آورده شده است. مشاهده می‌شود که در ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه نشده، ضریب عملکرد سیستم در لحظات ابتدایی ماشین‌کاری بعلا بالا بودن نرخ سایش ابزار پایین است. با توجه به اینکه در لحظات



شکل ۷ مقایسه سرعت برشی در ماشین‌کاری بهینه شده و ماشین‌کاری بهینه نشده



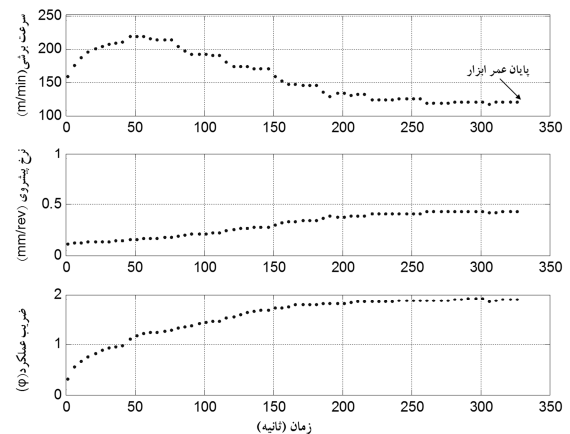
شکل ۸ ضریب عملکرد سیستم برای ۹ حالت مختلف سرعت برشی و نرخ پیشروی طبق جدول ۲، بعد از یک ثانیه ماشین‌کاری

عبارت دیگر سایش ابزار برشی به مقدار تعیین شده مجاز نرسیده باشد. در صورت پایان یافتن عمر ابزار، عملیات ماشین‌کاری جهت تعویض ابزار و یا تیزکاری آن متوقف خواهد شد.

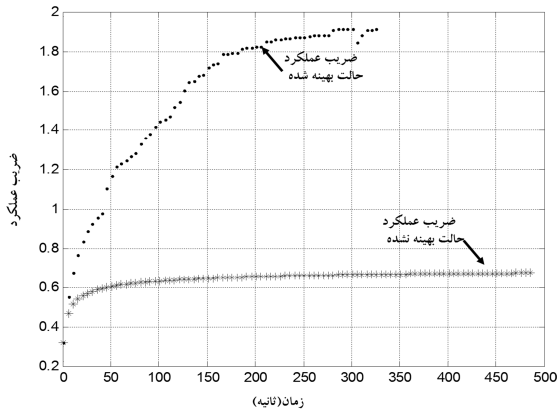
سیستم ACO پیشنهادی در هر بازه زمانی با استفاده از نتایج حاصله از مدل‌های تجربی و تعریف ضریب عملکرد برای سیستم براده برداری، سرعت برشی و نرخ پیشروی بهینه را در هر لحظه از ماشین‌کاری تعیین نموده و برای انجام ادامه ماشین‌کاری به عنوان شرایط بهینه به واحد پردازشگر اعمال می‌کند. تغییرات سرعت برشی و نرخ پیشروی بهینه همراه با ضریب عملکرد فرآیند در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.

با توجه به تغییراتی که در سرعت برشی و نرخ پیشروی در هر بازه زمانی به وجود می‌آید، مسلماً ضریب عملکرد سیستم برای هر لحظه از ماشین‌کاری متفاوت خواهد بود. طبق منطق برنامه و مطابق مثال ذکر شده، در بهینه‌سازی ماشین‌کاری، ضریب عملکرد در هر لحظه به حداکثر مقدار ممکن خود می‌رسد. این امر باعث خواهد شد تا عملیات براده برداری با بیشترین عملکرد انجام شود.

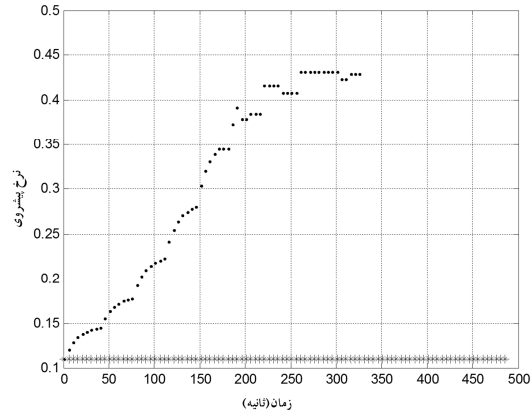
در طول فرآیند ماشین‌کاری، دمای نوک ابزار و زبری سطح نیز با تغییر یافتن سرعت برشی و نرخ پیشروی تغییر می‌یابند که بایستی این تغییرات در



شکل ۹ تغییرات پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و ضریب عملکرد فرآیند در حین فرآیند بهینه‌سازی کنترل تطبیقی



شکل ۹ مقایسه ضریب عملکرد در ماشین کاری بهینه شده و ماشین کاری بهینه نشده



شکل ۸ مقایسه نرخ پیشروی در ماشین کاری بهینه شده و ماشین کاری بهینه نشده

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کارایی سیستم‌های کنترل تطبیقی با بهینه‌ساز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

(الف) در ماشین کاری سنتی، پارامترهای ماشین کاری با توجه به تجربه اپراتور یا داده هندبوک‌ها انتخاب می‌شوند. در این نوع انتخاب، تغییرات صورت گرفته در حین ماشین کاری مانند سایش ابزار و یا تغییرات در ابعاد قطعه کار در تعیین پارامترهای ماشین کاری نقشی ندارند.

(ب) استفاده از سیستم‌های کنترل تطبیقی از روش‌های مفیدی است که می‌تواند پارامترهای ماشین کاری بهینه را با در نظر گرفتن شرایط واقعی ماشین-کاری از جمله نرخ سایش ابزار در هر لحظه تعیین نماید.

(ج) فرایند ماشین کاری دارای محدودیت‌های مختلفی مانند دمای نوک ابزار و زبری سطح ایجاد شده است که بایستی قبل از بهینه‌سازی، محدودیت‌های فرایند ماشین کاری به طور دقیق مشخص شده و در حین بهینه‌سازی در نظر گرفته شوند.

(ه) مدل‌های تجربی که بتواند رابطه‌ی مناسبی بین پارامترهای ماشین کاری و متغیرهای مورد نیاز ایجاد کند می‌تواند جایگزین استفاده از سنسورها برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز باشد.

### ۶- مراجع

- [1] Chandrasekaran, M., M. Muralidhar, and U. S. Dixit. Online optimization of a finish turning process: strategy and experimental validation., *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 75, pp. 783-791, 2014.
- [2] Suhail, Adeel H., et al. Optimization of cutting parameters based on surface roughness and assistance of workpiece surface temperature in turning process., *American journal of engineering and applied sciences* Vol. 3, pp. 102-110, 2010.
- [3] Suresh, P. V. S., P. Venkateswara Rao, and S. G. Deshmukh, A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model., *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp. 675-680, 2002.
- [4] Gopal, Anne Venu, and P. Venkateswara Rao. Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding., *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 1327-1336, 2003.
- [5] Cus, Franci, and Joze Balic, Optimization of cutting process by GA approach., *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 19 pp. 113-121, 2003.
- [6] Singh, Dilbag, and P. Venkateswara Rao, Optimization of tool geometry and cutting parameters for hard turning., *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 22, pp. 15-21, 2007.
- [7] Pawar, P. J., R. V. Rao, and J. P. Davim, Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm., *Materials and manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 424-431, 2010
- [8] Vijayakumar, K., et al, Optimization of multi-pass turning operations

اولیه فرآیند نوک تیز ابزار سریعاً ساییده می‌شود، نرخ سایش ابزار مقدار بالایی دارد، ولی پس از گذشت زمان نرخ سایش ابزار تقریباً مقدار ثابتی خواهد داشت. در این زمان ضریب عملکرد سیستم ماشین کاری تغییرات اندکی دارد. از مقایسه ضریب عملکرد دو حالت ماشین کاری بهینه شده و بهینه نشده می‌توان نتیجه گرفت اگرچه عمر ابزار در حالت بهینه نشده بیشتر از عمر ابزار در حالت بهینه شده است، ولی سیستم براده برداری در حالت بهینه نشده تا پایان یافتن عمر ابزار با ضریب عملکرد پایین تری نسبت به ضریب عملکرد حالت بهینه شده کار کرده است.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که ابتدا ضریب عملکرد برای هر دو حالت یکسان می‌باشد، ولی هرچه از زمان ماشین کاری می‌گذرد و برای حالت بهینه شده مقادیر سرعت برشی و نرخ پیشروی بهینه اعمال می‌شود، ضریب عملکرد سیستم افزایش می‌یابد. اگر مساحت تقریبی سطح زیر دو منحنی در شکل ۹ به عنوان معیاری برای مقایسه ماشین کاری بهینه شده و ماشین کاری بهینه نشده به کار برده شود، می‌توان دو حالت ماشین کاری را با هم مقایسه نمود. مساحت تقریبی زیر منحنی ضریب عملکرد سیستم برای حالت بهینه شده برابر با  $A_0 = 506$  و مساحت تقریبی زیر منحنی ضریب عملکرد سیستم برای حالت بهینه نشده برابر  $A_i = 325$  (برغم این که در این حالت ابزار بیشتر عمر کرده است) می‌باشد. درصد افزایش مساحت را به صورت رابطه (۸) می‌توان به دست آورد:

$$\frac{A_0 - A_i}{A_i} \times 100 = \frac{506}{325} \times 100 = 55.69\% \quad (8)$$

مشاهده می‌شود که برای سرعت برشی و نرخ پیشروی ورودی، انجام بهینه‌سازی باعث می‌شود تا ضریب عملکرد سیستم براده برداری ۵۵ درصد افزایش یابد.

اگر حجم براده برداشته شده در طول فرایند ماشین کاری بهینه شده با ماشین کاری بهینه نشده با استفاده از رابطه (۹) به عنوان معیاری برای مقایسه انتخاب شود:

$$Q = \frac{v \times f \times a \times t}{60} \quad (9)$$

$Q_i$  کل حجم براده برداشته شده توسط ابزار در حالت بهینه نشده تا لحظه  $t$  را بدست می‌دهد.

$$\frac{Q_0 - Q_i}{Q_i} \times 100 = \frac{606}{376} \times 100 = 61.17\% \quad (10)$$

مشاهده می‌شود که با انجام بهینه سازی، حجم براده برداری را در طول عمر ابزار می‌توان ۶۱ درصد افزایش داد.

- [14] Zuperl, Uros, Franci Čuš, and Edvard Kiker, Intelligent adaptive cutting force control in end-milling, *Tehnički vjesnik*, Vol. 13, pp. 15-22, 2006.
- [15] Liang, Steven Y., Rogelio L. Hecker, and Robert G. Landers, Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art, ASME 2002 *International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers*, 2002.
- [16] Chen, Zhiyong, et al, Adaptive active chatter control in milling processes, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* Vol. 136, pp. 103-110, 2014.
- [17] Ulsoy, A. Galip, and Yoram Koren, Applications of adaptive control to machine tool process control, *Control Systems Magazine, IEEE*, Vol. 9, pp. 33-37, 1989.
- [18] Özel, Tuğrul, and Yiğit Karpat, Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 467-479, 2005.
- using ant colony system., *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 1633-1639, 2003.
- [9] Venkata Rao, R., and V. D. Kalyankar, Parameter optimization of machining processes using a new optimization algorithm., *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, pp. 978-985, 2012.
- [10] Ghani, J. A, I. A. Choudhury, and H. H. Hassan, Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, pp. 84-92, 2004.
- [11] Senthilkumaar, J. S, P. Selvarani, and R. M. Arunachalam, Intelligent optimization and selection of machining parameters in finish turning and facing of Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58, pp. 885-894, 2012.
- [12] Zuperl, Uros, and Franci Čus, Optimization of cutting conditions during cutting by using neural networks, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 19, pp. 189-199, 2003.
- [13] Kruger, Grant H., et al, Intelligent machine agent architecture for adaptive control optimization of manufacturing processes, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 25, pp. 783-796, 2011.