



## محاسبه طول درگیری براده و ابزار در فرآیند تراش کاری متعامد با استفاده از الگوریتم فراکاوشی برنامه ریزی ژنتیک

محمد زادشکویان<sup>۱</sup>، وحید پورمستقیم<sup>۲\*</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

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

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

### چکیده

در ماشین کاری فلزات نشان داده شده است که طول درگیری براده و ابزار تأثیر بسزایی در بسیاری از پارامترهای خروجی ماشین کاری مانند نحوه تشکیل براده، نیروهای برشی، دمای برش، سایش ابزار و عمر ابزار دارد. هرگونه کاهش در طول درگیری براده و ابزار، ضخامت براده را در منطقه برش ثانویه کاهش داده و در نهایت منجر به کاهش دمای برش و نیروهای برشی می شود. در نتیجه این پارامتر تأثیر چشمگیری در عمر ابزار و صافی سطح قطعات تولید شده در روش ماشین کاری خواهد داشت. روش های متعددی توسط محققان مختلف جهت تخمین طول درگیری براده و ابزار ارائه شده است که در شرایط یکسان هرکدام جواب متفاوتی نسبت به سایر روش ها به دست می دهد. در این مقاله یک معادله ژنتیکی براساس برنامه ریزی ژنتیک و مقادیر اندازه گیری شده برای محاسبه طول درگیری براده و ابزار ارائه شده است. نتایج صحت سنجی نشان دهنده انطباق قابل قبول نتایج معادله به دست آمده با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشات بوده و می توان گفت که مدل ارائه شده، طول درگیری براده و ابزار را با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل های ارائه شده در این زمینه پیش بینی می کند.

**کلید واژگان:** پارامترهای برش، برنامه ریزی ژنتیک، ماشین کاری، طول درگیری براده و ابزار

## Genetic equation for the prediction of tool-chip contact length in orthogonal machining

Mohammad Zadshakoyan, Vahid Pourmostaghimi\*

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

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

### ABSTRACT

In metal cutting, it has been acknowledged that the tool-chip contact length significantly affects many aspects of machining such as chip formation, cutting forces, cutting temperatures, tool wear and tool life. Significant decrease in the tool-chip contact length decreases the thickness of the secondary shear zone which leads to a decrease in the cutting temperature and cutting force. As a result, it has a great effect on the finished surface and tool life. Several ways have been proposed in different works to find its value which have given discordant results for the same set of cutting conditions. In this paper, the genetic equation for the tool-chip contact length is developed with the use of the experimentally measured contact length values and genetic programming. The suggested equation has shown to correspond well with experimental data in various machining conditions with associated cutting parameters. This model predicts tool-chip contact length better than other known solutions.

**Keywords:** Cutting Parameters, Genetic Programming, Machining, Tool-chip Contact Length.

گرفته است [۱-۶]. باور کلی بر این است که طول درگیری براده و ابزار از دو

قسمت تقریباً مساوی تشکیل شده است. منطقه اول، منطقه چسبنده یا پلاستیک نام داشته و در نزدیکی های لبه برشی ابزار، جایی که تنش برشی ماکزیمم مقدار خود را دارد، قرار گرفته است. منطقه دوم، منطقه لغزنده یا الاستیک می باشد و در این ناحیه میزان تنش برشی به سمت صفر در انتهای طول درگیری میل می کند [۴-۷]. شکل ۱ نمای هندسی طول درگیری براده و ابزار را در فرآیند ماشین کاری متعامد نمایش می دهد.

طبق تئوری لایه برش ارائه شده توسط لی<sup>۱</sup> و شافر<sup>۲</sup>، طول ناحیه چسبنده در سطح براده ابزار تابعی از ضخامت براده تشکیل نیافته، زاویه برش و زاویه براده ابزار می باشد [۱]. آزمایشات مختلفی که توسط پلتیکا<sup>۳</sup> بر روی

### ۱- مقدمه

هنگام تشکیل براده پیوسته در فرآیند ماشین کاری، براده تشکیل شده با سطح براده ابزار در طول مشخصی در حالت درگیری باقی می ماند که طول درگیری براده و ابزار نامیده می شود و نقش مهمی در فرآیند برش فلزات دارد. این پارامتر مشخص کننده هندسه منطقه برش بوده و در نتیجه میزان حرارت تولید شده در منطقه ثانویه برش را در حین فرآیند ماشین کاری مشخص می کند. با داشتن اطلاعات دقیق در مورد مشخصات درگیری براده و ابزار و نیز دانستن نحوه توزیع تنش می توان اطلاعات جامعی در مورد نیروهای برشی، چگونگی توزیع دما در منطقه برش، شرایط استحکام ابزار، انتخاب شرایط بهینه ماشین کاری و کنترل کلی فرآیند ماشین کاری به دست آورد.

تحقیقات زیادی تاکنون در مورد محاسبه طول درگیری براده ابزار انجام

1. Lee  
2. Shaffer  
3. Poletika

Please cite this article using:

M. Zadshakoyan, V. Pourmostaghimi, Genetic Equation for the Prediction of Tool-Chip Contact Length in Orthogonal Cutting, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 171-175, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

فراکاوشی است که در مدل‌سازی به‌کار می‌رود. GP در اصل نوعی الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در آن کروموزوم‌ها را مجموعه‌ای برنامه‌های کامپیوتری تشکیل داده‌اند. امکان بهینه‌سازی ساختارهای بسیار پیچیده‌تر و همچنین تنوع وسیع در محدوده وسیعی از مسائل از مزیت‌های GP نسبت به GA می‌باشد. در GP در هر مرحله از برنامه‌ریزی، گام‌های زیر اجرا می‌شوند.

I. تولید جمعیت اولیه.

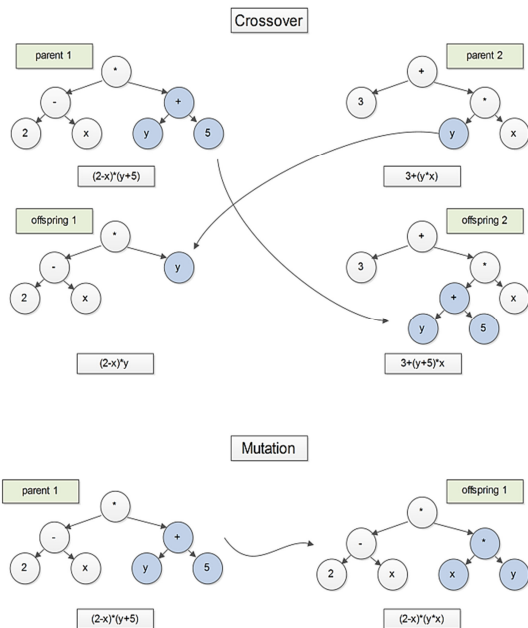
II. به دست آوردن مقادیر هزینه به ازای هر یک از اعضای مجموعه اولیه، به علاوه اگر شرایط توقف الگوریتم حاصل شد (به عنوان مثال GP به تعداد نسل مشخصی نایل شد) الگوریتم متوقف شده و تابع با کمترین هزینه به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌شود.

III. جایگزینی اعضای جمعیت اولیه با جمعیت جدیدی که پس از اعمال عملگرهای مختلفی مانند جهش و تکثیر به وجود آمده‌اند.

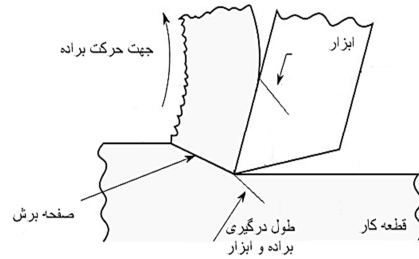
IV. بازگشت به مرحله II.

هدف GP پیداکردن عضوی از جمعیت جدید والدین یا فرزندان است که بهترین جواب را برای مسئله مفروض به دست دهد. در این الگوریتم، هر عضو یا رابطه به صورت نمودار درختی و ترکیبی از اعداد، توابع و عملگرهای ریاضی مشخص می‌شود.

جمعیت اولیه با انتخاب تصافی عملگرها و اعداد ایجاد می‌شود و هر عضو در هر نسل در واقع یک نقطه تصادفی در فضای جستجو می‌باشد. مرحله بعدی محاسبه میزان انطباق پذیری اعضا با شرایط محیطی می‌باشد (به عبارت دیگر محاسبه میزان صحت یا مقدار هر عضو در تابع هزینه). میزان صحت به عنوان بازخوردی برای اصلاح ساختار در حال پیشرفت الگوریتم به کار می‌رود. در GP، اعضا با اعمال عملگرهایی مانند تکثیر و جهش دچار تغییراتی می‌شوند. با اعمال عملگر تکثیر، خاصیت ژن‌های مناسب در اعضا جدید به‌وجود می‌آید و احتمال یافتن نقاط بهینه بیشتر می‌شود. عملگر جهش نیز با تغییر تصادفی ژن‌ها، امکان جستجو در فضای مسئله را افزایش داده و از گیر کردن الگوریتم در مینیمم محلی جلوگیری می‌کند. شکل ۲ این عملگرها را با روابط درختی مربوطه نمایش می‌دهد.



شکل ۲ نحوه کارکرد عملگرهای GP



شکل ۱ نمای شماتیکی از فرآیند تراش کاری متعامد

مواد مختلف از جمله (فولادهای کربنی ساده، فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای مختلف مس و برنز با سختی‌های گوناگون) و در شرایط مختلف ماشین‌کاری صورت گرفت بیانگر این بود که طول درگیری براده و ابزار منحصر با نسبت براده و ضخامت براده تشکیل نشده ارتباط دارد [۲]. با در نظر گرفتن خواص پلاستیکی براده و تاثیر آن بر روی نسبت براده، ابولادزه<sup>۱</sup> فرمولی را برای محاسبه طول درگیری براده و ابزار براساس نسبت فشردگی براده و ضخامت براده تشکیل شده ارائه داد [۳]. بسیاری از محققان یک رابطه براساس آزمایشات و اندازه‌گیری‌های واقعی را جهت محاسبه طول درگیری براساس ضخامت براده و نسبت براده پیشنهاد داده‌اند [۴]. کاتو<sup>۲</sup> و همکاران با استفاده از یک ابزار دو تکه به این نتیجه رسیدند که طول درگیری براده و ابزار دو برابر ضخامت براده تشکیل شده‌است [۶]. توروپوف<sup>۳</sup> و کو<sup>۴</sup> نیز در تحقیق خود همین نتیجه را با استفاده از تئوری لایه برش به‌دست آوردند [۷].

به علت نواقص و پیچیدگی موجود در تحقیقات پیشین، نیاز چشمگیری به استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک، GP<sup>۵</sup>، در این زمینه احساس می‌شود، زیرا این قابلیت را دارد که توسط یک رابطه ریاضی، ارتباط میان پارامترهای ورودی مؤثر و پارامتر خروجی را به‌صورت دقیق‌تری ارائه دهد. بنابراین در این مقاله یک روش محاسباتی دقیق برای تخمین طول درگیری براده و ابزار توسط برنامه‌ریزی ژنتیک ارائه شده که قابلیت استفاده در فرآیند ماشین‌کاری را با در نظر گرفتن کمترین مقدار آزمایشات دارد. GP، که به خانواده الگوریتم‌های فراکاوشی تعلق دارد، از مکانیزم تکامل در طبیعت جهت مدل‌سازی مشتق شده است [۸]. این تکنیک برنامه‌ریزی جدید برای نخستین بار توسط کوزا<sup>۶</sup> تشریح شد و قابلیت تلفیق مفاهیم برنامه‌ریزی اتوماتیک و محاسبات تکاملی را دارا می‌باشد. در زمینه مهندسی، بخصوص مهندسی مکانیک از GP به کرات برای مدل‌سازی فرآیندهای مختلف استفاده شده است. از کاربردهای GP به‌عنوان مثال می‌توان به پیش‌بینی صافی سطح [۹]، تخمین نیروهای برشی در فرآیند فرزکاری [۱۰] و پیش‌بینی سایش ابزار [۱۱] اشاره کرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- برنامه‌ریزی ژنتیک

الگوریتم ژنتیک GA، یک تکنیک بهینه‌سازی از خانواده الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشد که عمدتاً برای یافتن نقاط ایتیمم توابع به‌کار می‌رود. در مقابل، برنامه‌ریزی ژنتیک، GP، الگوریتمی مشابه از خانواده الگوریتم‌های

1. Abuladze
2. Kato
3. Toropov
4. Ko
5. Genetic Programming
6. Kozka

جدول ۱ محدوده پارامترهای برشی استفاده شده

|              |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|
| $v$ (m/min)  | ۸۰   | ۱۰۰  | ۱۲۰  | ۱۴۰  | ۱۶۰  |
| $f$ (mm/rev) | ۰/۰۷ | ۰/۱۰ | ۰/۱۳ | ۰/۱۶ | ۰/۱۹ |
| $d$ (mm)     | ۱/۵  | ۱/۸  | ۲/۱  | ۲/۴  | ۲/۷  |

جدول ۲ طراحی آزمایشات تاگوچی و رویه پاسخ برای انتخاب پارامترهای برش مورد

نیاز

| طرح آزمایش     | عمق برش $d$ (mm) | نرخ پیشروی $f$ (mm/rev) | سرعت برشی $v$ (m/min) |
|----------------|------------------|-------------------------|-----------------------|
| Taguchi        | ۱/۵              | ۰/۰۷                    | ۸۰                    |
| Taguchi        | ۱/۵              | ۰/۱۹                    | ۱۰۰                   |
| R.S.           | ۱/۵              | ۰/۱۳                    | ۱۲۰                   |
| Taguchi        | ۱/۵              | ۰/۱۶                    | ۱۴۰                   |
| Taguchi        | ۱/۵              | ۰/۱۳                    | ۱۴۰                   |
| Taguchi        | ۱/۵              | ۰/۱                     | ۱۶۰                   |
| Taguchi        | ۱/۸              | ۰/۱                     | ۸۰                    |
| Taguchi        | ۱/۸              | ۰/۰۷                    | ۸۰                    |
| R.S.           | ۱/۸              | ۰/۱                     | ۱۰۰                   |
| R.S.           | ۱/۸              | ۰/۱۶                    | ۱۰۰                   |
| Taguchi        | ۱/۸              | ۰/۱۹                    | ۱۲۰                   |
| R.S.           | ۱/۸              | ۰/۱                     | ۱۴۰                   |
| Taguchi & R.S. | ۱/۸              | ۰/۱۶                    | ۱۴۰                   |
| R.S.           | ۱/۸              | ۰/۱۳                    | ۱۶۰                   |
| Taguchi & R.S. | ۲/۱              | ۰/۱۳                    | ۸۰                    |
| Taguchi        | ۲/۱              | ۰/۱                     | ۱۰۰                   |
| Taguchi        | ۲/۱              | ۰/۰۷                    | ۱۲۰                   |
| R.S.           | ۲/۱              | ۰/۱۳                    | ۱۲۰                   |
| R.S.           | ۲/۱              | ۰/۱۹                    | ۱۲۰                   |
| Taguchi        | ۲/۱              | ۰/۱۹                    | ۱۴۰                   |
| Taguchi        | ۲/۱              | ۰/۱۳                    | ۱۶۰                   |
| Taguchi        | ۲/۱              | ۰/۱۶                    | ۱۶۰                   |
| Taguchi        | ۲/۴              | ۰/۱۶                    | ۸۰                    |
| R.S.           | ۲/۴              | ۰/۱                     | ۱۰۰                   |
| Taguchi & R.S. | ۲/۴              | ۰/۱۳                    | ۱۰۰                   |
| R.S.           | ۲/۴              | ۰/۱۶                    | ۱۰۰                   |
| Taguchi        | ۲/۴              | ۰/۱                     | ۱۲۰                   |
| Taguchi        | ۲/۴              | ۰/۰۷                    | ۱۴۰                   |
| R.S.           | ۲/۴              | ۰/۱                     | ۱۴۰                   |
| R.S.           | ۲/۴              | ۰/۱۶                    | ۱۴۰                   |
| Taguchi        | ۲/۷              | ۰/۱۹                    | ۱۶۰                   |
| Taguchi        | ۲/۷              | ۰/۱۹                    | ۸۰                    |
| Taguchi        | ۲/۷              | ۰/۱۶                    | ۱۰۰                   |
| Taguchi & R.S. | ۲/۷              | ۰/۱۳                    | ۱۲۰                   |
| Taguchi        | ۲/۷              | ۰/۱                     | ۱۴۰                   |
| Taguchi        | ۲/۷              | ۰/۰۷                    | ۱۶۰                   |

جدول ۳ پارامترهای برشی آزمایشی برای تست روابط ژنتیکی.

| $v$ (m/min) | $f$ (mm/rev) | $d$ (mm) |
|-------------|--------------|----------|
| ۷۰          | ۰/۰۸         | ۲        |
| ۱۳۰         | ۰/۰۸         | ۲        |
| ۱۳۰         | ۰/۱۵         | ۲/۲      |
| ۱۲۰         | ۰/۱۵         | ۲/۲      |
| ۸۰          | ۰/۱۳         | ۲/۵      |
| ۱۸۰         | ۰/۲          | ۲/۵      |
| ۱۵۰         | ۰/۱۲         | ۲/۴      |
| ۱۵۰         | ۰/۱۲         | ۲/۷      |

بعد از تولید جمعیت اولیه و محاسبه مقادیر برای جمعیت اولیه براساس تابع تعریف شده و اصلاح جمعیت با عملگرهای جهش و تکثیر، جمعیت‌های بعدی آموزش و اصلاح می‌شوند. بعد از تولید تعداد مشخصی از جمعیت، جمعیت تولید شده جدید (فرزندان جدید)، انطباق پذیری بهتری با شرایط محیط خواهند داشت. به عبارت دیگر مقدار صحت برای جمعیت جدید بهتر خواهد بود. با تکرار عمل تولید جمعیت جدید و اعمال عملگرهای ذکر شده، برنامه ریزی ژنتیک سعی بر بهبود جمعیت موجود با در نظر گرفتن میزان خطا را دارد. یعنی برنامه ریزی ژنتیک رابطه‌ی جدید را در صورت کاهش میزان خطای آموزش به عنوان رابطه‌ی جدید معرفی می‌کند و در نهایت رابطه‌ی ژنتیکی با کمترین خطا حاصل می‌شود.

به‌منظور به دست آوردن جواب‌های قابل قبول‌تر، الگوریتم را باید به تعداد مشخصی اجرا کرد. تعداد این اجراها بستگی به پیچیدگی مسئله مورد نظر دارد [۱۱].

در این مقاله، برای محاسبه طول درگیری براده و ابزار براساس پارامترهای برشی سرعت برشی،  $v$ ، سرعت پیشروی،  $f$ ، و عمق برش،  $d$ ، یک رابطه ژنتیکی با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک به دست آمده است. با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده از آزمایشات مختلف و انتخاب عملگرهای محاسباتی لازم، رابطه ژنتیکی برای محاسبه طول درگیری به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$Lc=L(v, f, d) \quad (1)$$

پارامترهای تکاملی در نظر گرفته شده برای این تحقیق شامل جمعیت اولیه  $M_s=30$  و تعداد نسل  $G=2000$  می‌باشد. عملگرهای مورد نیاز مانند جهش و تکثیر نیز که برای فرآیند تکامل ضروری می‌باشند، به‌ترتیب با نرخ جهش  $p_m=0.44$  و نرخ تکثیر  $p_c=0.1$  انتخاب گردیده‌اند. علاوه بر این، عملگرهای ریاضی برای ایجاد رابطه به صورت رابطه (۲) تعریف شده‌اند:

$$F=\{+, -, \times, /, \text{sqrt}, X^2, X^3\} \quad (2)$$

### ۳- آزمایشات تجربی

تمامی آزمایشات در یک ماشین CNC و بدون استفاده از روانکار توسط یک ابزار بدون روکش ساخت شرکت TIZIT با مشخصات  $TNMA220408$  و گرید  $P20$  و بر روی فولاد  $AISI4140$  به عنوان قطعه کار انجام گرفت. جهت به دست آوردن رابطه ژنتیک با استفاده از آزمایشات، از مقادیر متفاوتی از سرعت برشی،  $v$ ، نرخ پیشروی،  $f$ ، و عمق برش،  $d$ ، براساس طرح آزمایشات تاگوچی<sup>۱</sup> و پاسخ رویه<sup>۲</sup>، RS، از مقادیر نشان داده شده در جدول ۱ استفاده شده‌است. پارامترهای انتخاب شده براساس طرح آزمایشات ذکر شده در جدول ۲ آورده شده‌اند. مقادیر طول درگیری توسط میکروسکوپ نوری متصل به کامپیوتر و مجهز به نرم‌افزار پردازش تصویر اندازه‌گیری شده‌اند. علاوه بر این، برای مقایسه مدل ارائه شده در این تحقیق با مدل‌های دیگر، مقادیر عملی نسبت براده مورد نیاز می‌باشند، بنابراین تحت شرایط مشخص عمق ۱/۵ میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دور، آزمایشاتی صورت گرفته و ضخامت براده به‌دست آمده از هر آزمایش توسط میکرومتر محاسبه شده و نسبت براده برای هر آزمایش به‌دست می‌آید. از این مقادیر برای مقادیری مدل‌های مقالات پیشین استفاده شده است. یک‌سری آزمایش دیگر نیز جهت بررسی میزان صحت معادله ژنتیک به‌دست آمده انجام گرفته‌اند که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

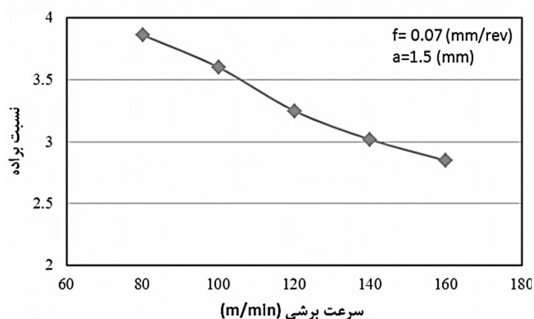
1. Taguchi  
2. Response Surface

در این جدول، مقادیر RMSE و  $R^2$  برای تمامی مدل‌های مذکور جهت مقایسه با مدل GP ارائه شده، در عمق برش ۱/۵ میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دور، محاسبه شده‌اند.

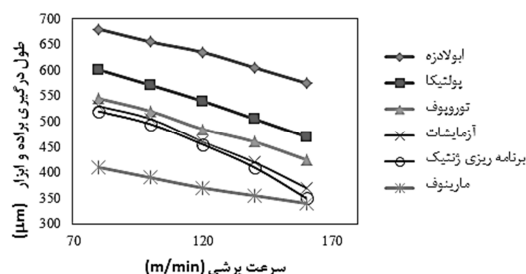
با مقایسه اعداد به‌دست آمده در جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که رابطه ژنتیکی ارائه شده برای طول درگیری براده و ابزار توسط GP در این مقاله، همخوانی بهتری با مقادیر واقعی به دست آمده از آزمایشات داشته و بنابراین دقت بیشتری در محاسبه طول درگیری دارد. شکل ۴ تغییرات نسبت براده بدست آمده از آزمایشات را در سرعت‌های برش متغیر و دیگر شرایط مشخص شده نشان می‌دهد. در شکل ۵ دقت مدل‌های انتخابی و مدل GP با مقادیر به دست آمده از آزمایشات نشان داده شده است.

با مراجعه به شکل ۵ می‌توان به این نکته پی برد که با افزایش سرعت برشی، طول درگیری براده و ابزار کاهش می‌یابد. این چنین رفتاری توسط سادیک<sup>۱</sup> و لیندستروم<sup>۲</sup> [۱۲] در ماشین‌کاری فولاد کوئچ و تمپر شده SS۱۵۷۲ مشاهده گردیده بود. علت کاهش طول درگیری با افزایش سرعت برشی را می‌توان به شرایط مرزی به وجود آمده مابین براده و سطح ابزار نسبت داد. با افزایش سرعت برشی، نیروهای برشی کاهش پیدا می‌کنند. علت این کاهش

|                   | $R^2$  | RMSE   |
|-------------------|--------|--------|
| پلتیکا            | ۰/۹۵۰۳ | ۹/۷۸۷  |
| ابولادزه          | ۰/۸۱۸۲ | ۱۳/۶۱۳ |
| توروپوف           | ۰/۹۸۷۴ | ۶/۷۳۲  |
| مارینوف           | ۰/۹۷۶۲ | ۸/۲۲۱  |
| برنامه‌ریزی ژنتیک | ۰/۹۹۹۲ | ۳/۱۹۳  |



شکل ۴ تغییرات نسبت براده با سرعت برشی در پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دور و عمق بار ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۵ مقایسه دقت مدل‌های پیشین و مدل GP با مقادیر به دست آمده از آزمایشات در پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دور و عمق بار ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۳ میکروسکوپ نوری برای اندازه‌گیری طول درگیری ابزار و براده به همراه کامپیوتر مجهز به نرم‌افزار پردازش تصویر

صحت مدل‌های GP به‌دست آمده در این تحقیق توسط دو مشخصه آماری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این مشخصه‌ها عبارتند از خطای میانگین مربعات، RMSE، و انحراف معیار استاندارد،  $R^2$ ، به عبارت دیگر، ابتدا نتایج آزمایشات به‌دست آمده، و سپس با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک، مدل‌سازی‌های مربوطه صورت گرفته است. سپس با استفاده از مشخصه‌های آماری ذکر شده، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام گرفته است. در شکل ۳، میکروسکوپ نوری و کامپیوتر مجهز به نرم‌افزار پردازش تصویر نمایش داده شده است.

#### ۴- نتایج

در این تحقیق برای تعیین ارتباط بین طول درگیری براده و ابزار با پارامترهای برشی در تراش‌کاری فولاد AISI۴۱۴۰ و براساس آزمایشات و اندازه‌گیری‌های انجام شده، یک رابطه ژنتیکی با استفاده از GP بسط داده می‌شود. به همین منظور پارامترهای مستقل  $f$ ،  $v$ ،  $d$  به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و مجموعه عملگرها مطابق با رابطه‌ی (۲) انتخاب شدند. دقیق‌ترین مدل GP به دست آمده طبق شرایط بیان شده برای طول درگیری براده و ابزار به صورت رابطه (۳) می‌باشد:

$$L_c = d - 89.935 - \frac{v\sqrt{v}}{8.28} + [(19.638f)^3 \times (f + 7.776)] + [\sqrt{f \times d} - (f + 8.499)^3] \quad (3)$$

مقادیر RMSE و  $R^2$  برای معادله ژنتیکی به‌دست آمده برای سری داده‌های آموزشی و آزمایشی و برای مقادیر به‌دست آمده از آزمایشات و مدل، طبق جدول ۴ می‌باشند.

#### ۵- بحث

در این مقاله، میزان طول درگیری براده و ابزار با استفاده از رابطه‌ی (۳) محاسبه شد. در این قسمت نتایج عددی به دست آمده از این مدل با نتایج مدل‌های قبلی ارائه شده مقایسه می‌شود. مدل‌هایی که برای مقایسه به کار رفته‌اند در جدول ۵ قابل رؤیت می‌باشند.

| آموزش  |        | تست   |        |
|--------|--------|-------|--------|
| $R^2$  | RMSE   | $R^2$ | RMSE   |
| ۰/۹۹۴۵ | ۱۱/۵۳۲ | ۰/۹۸۱ | ۲۴/۲۶۲ |

1. Sadik  
2. Lindstrom

- [5] Marinov, V., The tool chip contact length on orthogonal metal cutting, *5th International Conference on Advanced Engineering and Technology AMTECH*, pp. 149-155, 1999.
- [6] Kato, S., Yamaguchi, K., Yamada, M., Stress distribution at the interface between tool and chip in machining, *Transaction Journal of Engineering Industry*, Vol. 94, pp. 683-689, 1972.
- [7] Toropov, A., Ko, S.L., Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 1209-1215, 2003.
- [8] Koza, J.R., Genetic Programming, *The MIT Press*, Massachusetts, 1992.
- [9] Brezocnik, M., Kovacic, M., Ficko, M., Prediction of surface roughness with genetic programming, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 157-158, pp. 28-36, 2004.
- [10] Milfelner, M., Kopac, J., Cus, F., Zuperl, U., Genetic equation for the cutting force in ball-end milling, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1554-1560, 2005.
- [11] Zadshakoyan, Mohammad, and Vahid Pourmoustaghimi, Cutting Tool Crater Wear Measurement in Turning Using Chip Geometry and Genetic Programming, *International Journal of Applied Metaheuristic Computing (IJAMC)* Vol. 6.1, pp. 47-60, 2015.
- [12] Sadik, M.I., Lindstrom, B., The role of tool-chip contact length in metal cutting, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 37, pp. 613-627, 1993.
- [13] Bahi, S., Nouari, M., Moufki, A., ElMansori, M., Molinari, A., A new friction law for sticking and sliding contacts in machining, *International Journal of Tribology*, Vol. 44, pp. 764-771, 2011.
- [14] Settea, S., Boullart, L., Genetic programming: principles and applications, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol. 14, pp. 727-736, 2001.
- [15] Iqbal, S.A., Mativenga, P.T., Sheikh, M.A., Characterization of the machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds—Part 1: Investigation of contact phenomena. *Proceedings Institution of Mechanical Engineering Part B: Journal of Engineering and Manufacturing*, Vol. 221(5), pp. 909-916, 2007.

وجود پدیده نرم شدن گرمایشی (کاهش تنش سیلان ماده با افزایش دما) و نتیجه کاهش میزان اصطکاک در سطح براده ابزار می‌باشد [۱۳]. در نهایت کاهش این میزان اصطکاک ظاهری موجب کاهش طول درگیری براده و ابزار خواهد شد.

همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات می‌توان بیان کرد که هرگونه افزایش سرعت پیشروی منجر به افزایش طول درگیری براده و ابزار می‌گردد. این امر را می‌توان این گونه توضیح داد که با افزایش سرعت پیشروی، ضخامت براده و در نتیجه نیروهای برشی افزایش پیدا می‌کنند [۱۴]. از آن جایی که تغییر شکل براده‌های ضخیم تر به مراتب سخت‌تر است، بنابراین طول درگیری براده و ابزار افزایش خواهد یافت. یک چنین رفتار مشابهی توسط اقبال<sup>۱</sup> و همکاران در ماشین کاری فولاد AISI ۱۰۴۵ نیز مشاهده گردید [۱۵]. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت براده یا نسبت براده، طول درگیری افزایش می‌یابد. نسبت براده پارامتری مهم در تخمین حرارت تولید شده در فرآیند ماشین کاری و ارزیابی کارایی خود فرآیند ماشین کاری می‌باشد. نسبت براده پایین منجر به افزایش زاویه برش شده که متعاقب آن میزان کرنش در براده کمتر شده و در نهایت انرژی مصرفی کاهش پیدا می‌کند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک، GP، یک مدل جدید برای تخمین طول درگیری براده و ابزار با استفاده از پارامترهای برشی به-دست آمد. نتایج آزمایش‌های به‌دست آمده حاکی از کاهش طول درگیری با افزایش سرعت برشی بود که این امر به علت اثر نرم شدن گرمایشی است. همچنین با افزایش سرعت پیشروی، طول درگیری نیز افزایش یافت که علت این امر نیز افزایش ضخامت براده تشکیل شده بود. همچنین ملاحظه گردید که تغییرات عمق برش تاثیر بسیار جزئی بر روی طول درگیری براده و ابزار داشت.

نتایج به‌دست آمده از مدل GP پیشنهاد شده نشانگر عملکرد بسیار خوب و موثر آن می‌باشد. نتایج نویدبخش به‌دست آمده از GP بیانگر امکان استفاده از این ابزار توانمند در سیستم‌های تولید به‌هنگام و همراه با سیستم‌های تولید هوشمند در صنعت تولید اتوماتیک می‌باشند. البته ارائه یک مدل که بتواند پارامتر وابسته خروجی را برحسب پارامترهای مستقل ورودی مشخص نماید، یکی دیگر از مزیت‌های GP به حساب می‌آید، چرا که امکان تحلیل خروجی را براساس ورودی‌های بیان شده به کاربر می‌دهد. با توجه به مزایای ذکر شده و نتایج قابل قبول به‌دست آمده از مدل GP در این مقاله، به نظر می‌رسد که استفاده از این روش در مسایل مربوط به ماشین کاری، قابلیت اطمینان بیشتر و دقت بهتری نسبت به سایر مدل‌ها به همراه خواهد داشت.

## ۷- مراجع

- [1] Lee, E.H., Shaffer, B.W., The theory of plasticity applied to a problem of machining, *ASME Transaction Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 405-413, 1951.
- [2] Poletika, M.F., Contact Loads on Tool Faces, *Machinostroenie*, Moscow, 1969. (In Russian)
- [3] Abuladze, N.G., Character and the length of tool-chip contact (in Russian, In: *Proceedings Machinability of Heat-resistant and Titanium Alloys*, Kuiby-shev, pp. 68-78, 1962.
- [4] Zorev, N.N., Interrelationship between shear process occurring along the tool face and on the shear plane in metal cutting, *International Journal of Research in Production Engineering, ASME*, pp. 42-49, 1963.