

## بررسی تأثیرات پارامترهای فرزکاری بر ابعاد پلیسه و مدلسازی ریاضی آن

محمد رضا رازفر<sup>۱</sup> و ونداد اردبیلی اصل<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

در این مقاله، نحوه تأثیر پارامترهای مهم برشی و هندسه تیغ فرز (قطر و زاویه خروج از قطعه کار) در عملیات فرزکاری پیشانی تراش روی خصوصیات ابعادی پلیسه خروجی بررسی شده است. آزمایش‌های زیادی در شرایط مختلف ماشینکاری انجام گرفته و مقدار ارتفاع و ضخامت پلیسه اندازه‌گیری شده است. در ادامه، با استفاده از روشهای آماری، یک مدل ریاضی برای پیش‌گویی ارتفاع و ضخامت پلیسه روی جنس قطعه کار ST37 ارائه شده تا بتوان به مقادیر بهینه پارامترهای برشی برای داشتن حداقل ارتفاع پلیسه دست یافت.

**واژه‌های کلیدی:** پلیسه، ارتفاع پلیسه، ضخامت پلیسه، فرزکاری

## Investigation of the Effects of Milling Parameters on Burr and Its Mathematical Modeling

M.R. Razfar and V. Ardebili Asl

Mech. Eng. Dep't., Amirkabir Univ. of Tech.

### ABSTRACT

In this paper, the effect of cutting parameters and tool geometry on the burr dimensional properties in face milling operation was considered. Many experimental tests in different machining conditions have been performed and the amounts of burr height and thickness have been measured. Further, by statistical method, a mathematical model was developed to predict burr height and thickness where the type of work piece material was St37. Then, the model was used to define optimum cutting parameters to reach at minimum burr height.

**Key Words:** Burr, Burr Height, Burr Thickness, Milling

۱-استادیار (نویسنده پاسخگو): Razfar@aut.ac.ir

۲-کارشناس ارشد

## ۱- مقدمه

است. از سوی دیگر، ارتفاع پلیسه مشخص کننده آن است که آیا قطعه تولیدی در تolerانس مورد نظر می‌باشد یا احتیاج به عملیات پلیسه‌گیری دارد [۲] و [۳].

### ۲-۳- تقسیم پلیسه بر اساس مکان شکل‌گیری [۲]

از نظر مکان شکل‌گیری، پلیسه مطابق شکل ۱ به چهار دسته تقسیم می‌شود:

#### ۱- پلیسه بالایی<sup>۱</sup>

این پلیسه بر لبه بین سطوح ماشینکاری نشده و سطح انتقالی قطعه کار ایجاد می‌شود. پلیسه بالایی نتیجه تغییر شکل عرضی مواد در هنگام ورود ابزار به قطعه کار می‌باشد.

#### ۲- پلیسه خروجی<sup>۲</sup>

این پلیسه در خروج ابزار از قطعه کار ایجاد می‌شود. پلیسه خروجی توسط لبه کناری و پایین ابزار ایجاد شده که در آن به جای برش براده، عمل خمش روی داده است.

#### ۳- پلیسه کناری ورودی<sup>۳</sup>

این پلیسه در ورود ابزار به قطعه کار در لبه بین سطوح انتقالی ماشینکاری و سطح ورودی قطعه کار ایجاد می‌شود.

#### ۴- پلیسه کناری<sup>۴</sup>

این پلیسه در خروج ابزار از قطعه کار در لبه بین سطوح انتقالی ماشینکاری و سطح خروجی قطعه کار ایجاد می‌شود.

پلیسه ایجاد شده بر لبه قطعه کار باعث کیفیت نامطلوب قطعه کار، خطای ابعادی و ایجاد اشکال در مونتاژ قطعات در مجموعه‌های دقیق و حساس می‌شود [۱].

روش مرسوم برای تولید قطعات بدون پلیسه، انجام روش پلیسه‌گیری پس از ماشینکاری نهایی است. این روش باعث ایجاد خرابی در کیفیت سطح قطعات، ایجاد تنش پسماند، بالارفتن هزینه و زمان تولید قطعه می‌شود. بیشتر مطالعات به روش پلیسه‌گیری صورت گرفته است تا بتوان با به‌کارگیری روشهای اتوماسیون و رباتهای صنعتی یا سیستم‌های هوشمند برای تشخیص پلیسه، هزینه و زمان انجام عملیات پلیسه‌گیری را کاهش داد [۲]، ولی مطالعات کمتری بر نحوه ایجاد پلیسه و درک نحوه تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر پلیسه صورت گرفته است. با درک این ارتباط می‌توان به حداقل ابعاد پلیسه دست یافت.

در این مطالعه ابتدا نحوه تأثیر پارامترهای برشی و هندسی عملیات فرزکاری پیشانی تراش بر ارتفاع و ضخامت پلیسه خروجی بررسی شده است. سپس با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، پارامترهای مهم تشخیص داده شده و با استفاده از روش آماری، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی ارتفاع و ضخامت پلیسه طراحی شده است تا بتوان با استفاده از روش بهینه‌سازی، به پارامترهای بهینه برای حداقل کردن ارتفاع پلیسه دست یافت.

## ۲- پلیسه در فرآیند فرزکاری

### ۲-۱- تعریف پلیسه

پلیسه ماشینکاری، لبه ناخواسته ایجاد شده در لبه اصلی قطعه کار است که بر اثر تغییر فرم پلاستیک در حین ماشینکاری ایجاد می‌شود.

### ۲-۲- مشخصات پلیسه

پلیسه ماشینکاری دارای مشخصات متعددی است که از آن موارد می‌توان مکانیسم شکل‌گیری پلیسه، مکان پلیسه، سختی پلیسه، ارتفاع و ضخامت پلیسه و... را نام برد. مهمترین موضوع در اینجا، ساینده‌بندی پلیسه توسط ارتفاع و ضخامت آن است.

از نظر پلیسه‌گیری، ضخامت پلیسه مهمتر است. هرچه ضخامت پلیسه بیشتر باشد، پلیسه‌گیری مشکل‌تر

1-Top Burr

2-Exit Burr

3-Entrance Side Burr

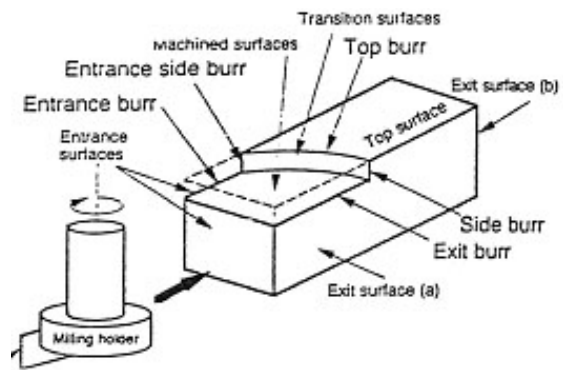
4-Side Burr

#### ۲-۴-۳- شروع پلیسه

تغییر فرم پلاستیک در لبه قطعه کار به صورت خمش پلاستیک در لبه قطعه کار اتفاق می افتد (شماره ۳ در شکل ۲).

#### ۲-۴-۴- چرخش حول محور

تغییر فرم زیادی به طور ناگهانی در لبه قطعه کار اتفاق می افتد. نقطه گردش که در آن تغییر فرم زیادی ایجاد گشته، قابل مشاهده است (شماره ۴ در شکل ۲).



شکل (۱): انواع پلیسه بر اساس مکان شکل گیری [۲].

#### ۲-۴-۵- ناحیه برش منفی توسعه یافته:

در این مرحله، پلیسه توسعه یافته و تغییر فرم زیادی در نقطه گردش به وجود می آید (شماره ۵ در شکل ۲). از این مرحله به بعد، جدایش براده به وسیله گسترش ترک ایجاد می شود. این روش در مواد نرم و مواد ترد متفاوت است (قسمت (b) از شکل ۲).

#### -مواد نرم

##### الف) ترک ابتدایی

ترکهای ابتدایی در لبه ابزار و در منطقه برش اولیه در جهت امتداد خط برش صورت می گیرد (شماره I-۶ در شکل ۲).

##### ب) رشد ترک

ترک در امتداد منطقه برش اولیه رشد می کند. ترک ظاهر شده، در امتداد خط برش می باشد (شماره I-۷ در شکل ۲).

##### ج) پلیسه مثبت

ترک باعث جدا شدن براده در راستای خط برش می شود و در پایان، پلیسه مثبت در گوشه قطعه کار باقی می ماند (شماره I-۸ در شکل ۲).

#### -مواد ترد

##### الف) ترک ابتدایی

ترک در لبه ابزار و در ناحیه برش منفی شروع می شود و در جهت جلو به سمت نقطه دوران گسترش می یابد (شماره II-۶ در شکل ۲).

##### ب) رشد ترک

حرکت ابزار در راستای خط برش باعث رشد ترک در

در این مقاله روی پلیسه خروجی مطالعه شده است؛ زیرا ارتفاع و ضخامت این نوع پلیسه بزرگتر از سایر انواع پلیسه هاست.

#### ۲-۴-۲- فرآیند شکل گیری پلیسه

اساس روش کاهش یا جلوگیری از شکل گیری پلیسه با دانستن فرآیند تشکیل پلیسه مشخص می شود. مطالعات فراوانی در این زمینه صورت گرفته ولی هیچ یک، توضیح روشن و مشخصی از پدیده ارائه نداده اند. در این قسمت یک مدل پیشنهادی شکل گیری پلیسه با در نظر گرفتن خواص مکانیکی قطعه کار بررسی شده است [۴].

شکل ۲ نمایش دهنده فرآیند شکل گیری پلیسه در مراحل مختلف است (۸ مرحله) که به دو قسمت (a) توسعه پلیسه قبل از ترک و (b) توسعه پلیسه پس از ترک، تقسیم می شود. قسمت (b) نیز به دو بخش مواد نرم و مواد ترد تقسیم شده که در ادامه، مراحل مختلف توضیح داده شده است.

#### ۲-۴-۱- برش پیوسته

حالت قبل از ایجاد پلیسه، به صورت برش پیوسته است (شماره ۱ در شکل ۲).

#### ۲-۴-۲- قبل از ایجاد پلیسه

توزیع تنش و تغییر فرم بر لبه قطعه کار تأثیرگذار است. منطقه تغییر شکل الاستیک به لبه قطعه کار رسیده یا به صورت خمش الاستیک ظاهر می شود. منطقه تغییر فرم پلاستیک نیز در اطراف منطقه برش اولیه به سمت لبه قطعه کار امتداد می یابد (شماره ۲ در شکل ۲).

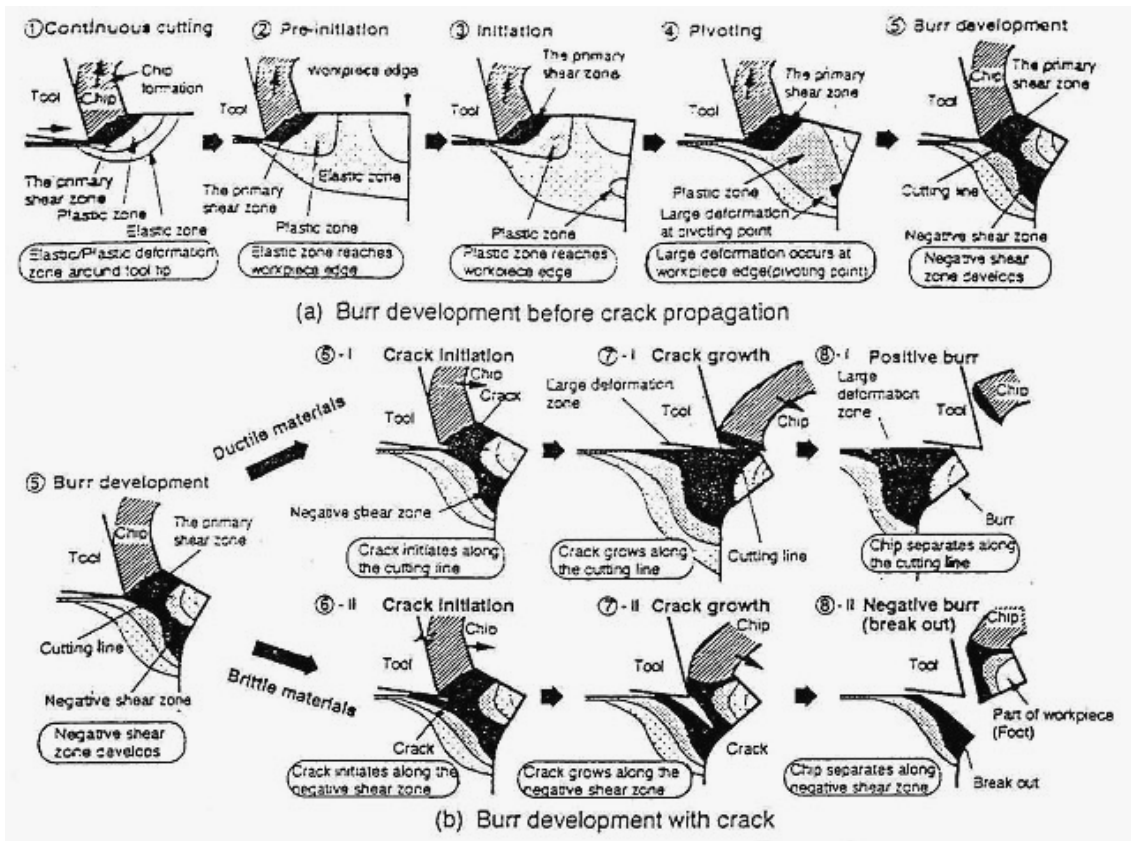
۲-۵- آزمایش‌های تجربی

در این مقاله، نحوه تأثیر پارامترهای مختلف ماشینکاری بر پلیسه خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

منطقه برش منفی می‌شود (شماره ۷-II در شکل ۲).

ج) پلیسه منفی

ترک باعث جدایش براده در بالای خط برش منفی می‌شود و سطح حاصل از تغییر شکل کم در لبه قطعه کار باقی می‌ماند که این حالت را پلیسه منفی گویند (شماره ۸-II در شکل ۲).



شکل (۲): مراحل مختلف فرآیند شکل‌گیری پلیسه [۴].

I) پارامترهای برشی

- سرعت برشی (V (m/min))
- پیشروی بر دندان (fz (mm/tooth))
- عمق محوری (ap (mm))

II) پارامترهای هندسی

- زاویه خروج لبه اصلی ابزار (EXA (Rad))
- زاویه براده شعاعی (RRA (Rad))
- زاویه براده محوری (ARA (Rad))
- قطر ابزار (d (mm))

این آزمایشها در دو بخش صورت گرفته است. در بخش اول، نحوه تأثیر مستقل هر یک از پارامترهای فرآیند فرزکاری بر ابعاد پلیسه خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم، بر مبنای روشهای آماری، مدلسازی ریاضی ارتفاع و ضخامت پلیسه صورت گرفته است.

۲-۵-۱- بررسی تأثیر مستقیم پارامترها بر ابعاد پلیسه

در این قسمت، تأثیر پارامترهای ماشینکاری زیر، بر ابعاد پلیسه بررسی شده است:

## ۲-۵-۲- شرایط آزمایش

آزمایشها بر روی نمونه‌هایی به ابعاد 20\*20\*60 mm جنس فولاد St37 صورت گرفته است. در انجام آزمایشها از ابزار کف گرد به قطر 50 mm با زاویه براده شعاعی و زاویه براده محوری صفر درجه معادل ابزار (SECO R 220. 1) استفاده شده است [۵]. به این ابزار، سه اینسرت بدون پوشش بسته شده است. در ابتدا برای بررسی تأثیر مستقل هر یک از پارامترها، سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شود. مقادیر پارامترهای ثابت در آزمایشها به این شرح است:

- سرعت برش  $V=157.1$  (m/min)

- پیشروی به ازای هر دندانه  $fz=0.133$  (mm/tooth)

- عمق برش  $a_p=0.5$  (mm)

- زاویه خروج ابزار  $EXA=90$  (deg)

- زاویه براده شعاعی  $RRA=0$  (deg)

- زاویه براده محوری  $ARA=0$  (deg)

- قطر ابزار برش  $d=50$  (mm)

در اندازه‌گیری ابعاد پلیسه از دستگاه اندازه‌گیری C.M.M مدل POLI:winner استفاده شده است. برای رسیدن به ماکزیم ابعاد پلیسه، اندازه‌گیری با دامنه جابجایی 0.02mm انجام شده است. در هر نمونه برای رسیدن به اندازه مطمئن، اندازه‌گیری در سه مقطع در طول لبه قطعه‌کار انجام شده است.

## ۲-۵-۳- انجام آزمایشها برای مدلسازی ریاضی

در این بخش با توجه به نتایج حاصل از قسمت قبل، پارامترهای مهمتر از نظر تأثیر بر ابعاد پلیسه تشخیص داده شده است. پارامترها به شرح ذیل می‌باشند:

- سرعت برشی  $(V$  (m/min))،

- زاویه خروج لبه اصلی ابزار  $(EXA$  (Rad))،

- زاویه براده شعاعی  $(RRA$  (Rad))،

- عمق محوری  $(a_p$  (mm))،

## ۲-۶- مدلسازی ریاضی

مدلسازی ریاضی بر اساس این چهار کمیت مهمتر انجام می‌شود. دلیل کم کردن تعداد پارامترهای بررسی شده، کم کردن تعداد آزمایشها برای نیل به مدل ریاضی در روش آماری است [۶] و [۷].

برای بررسی تأثیرات متغیرهای مستقل و برقراری ارتباط منطقی و ریاضی بین آنها، از تکنیکهای آماری استفاده می‌شود. در این قسمت، از تکنیک آماری تقریب خطی چندگانه<sup>۱</sup> استفاده شده است. تابع هدف برای تقریب زدن نتایج معادله درجه اول است.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{24}x_2x_4 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{34}x_3x_4 \quad (1)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} \quad (2)$$

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N K_{iu} \cdot Y_i}{N} \quad (3)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^N K_{iu} \cdot K_{ju} \cdot Y_i}{N} \quad (4)$$

$Y_i$ : نتیجه حاصل از آزمایش Iام

$K_{iu}$ : ضریب دامنه در آزمایش Iام برای متغیر Iام

$X_1, X_2, X_3, \dots$ : متغیرهای مستقل

$b_0, b_1, b_2, \dots$ : ضرایب ثابت معادله

$K_i$ : ضرایب وزنی متغیرهای مستقل

$N$ : تعداد آزمایشها

تعداد آزمایشها برای به‌دست آوردن تقریب نوع اول،  $2^n$  است که در آن،  $n$  تعداد متغیرهای مستقل می‌باشد. در جدول ۱ سطوح وزنی متغیرهای مستقل درج شده است. سطوح وزنی متغیرهای مستقل  $X_1, X_2, X_3$  و  $X_4$  به روش زیر تعریف می‌شوند:

$$X_1 = \frac{V - 204.25}{47.15},$$

$$X_2 = \frac{RRA - 1.04}{0.52},$$

$$X_3 = \frac{EXA - 0.26}{0.26},$$

$$X_4 = \frac{a_p - 1}{0.5}.$$

**جدول (۱): سطوح وزنی پارامترهای مستقل.**

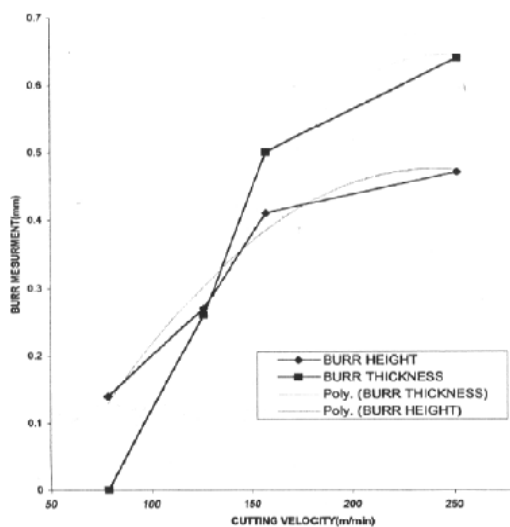
متغیرهای مستقل	-1	0	1	دامنه
V (mm/min)	157.1	204.25	251.4	47.15
$a_p$ (mm)	0.5	1	1.5	0.5
EXA (Rad)	0	0.26	0.52	0.26
RRA (Rad)	0.52	1.04	1.56	0.52

پس از اعمال ضرایب وزنی برای چهار متغیر مستقل سرعت برشی، عمق محوری برش، زاویه خروج ابزار و زاویه براده شعاعی بایستی ۱۶ آزمایش برای به دست آوردن معادلات ارتفاع و ضخامت پلیسه انجام داد.

**جدول (۲): سطوح وزنی و نتایج حاصل از آزمایشهای بخش مدلسازی.**

	K1	K2	K3	K4	V(mm/min)	RRA(Rad)	EXA(Rad)	$a_p$ (mm)	Burr Height(mm)	Burr Thickness (mm)
1	-1	-1	-1	-1	157.1	0	0.52	0.5	0.09	0.07
2	1	-1	-1	-1	251.4	0	0.52	0.5	0.1	0.08
3	-1	1	-1	-1	157.1	0.52	0.52	0.5	0.28	0.27
4	1	1	-1	-1	251.4	0.52	0.52	0.5	0.29	0.28
5	-1	-1	1	-1	157.1	0	1.57	0.5	0.41	0.44
6	1	-1	1	-1	251.4	0	1.57	0.5	0.47	0.64
7	-1	1	1	-1	157.1	0.52	1.57	0.5	1.19	0.94
8	1	1	1	-1	251.4	0.52	1.57	0.5	0.25	0.31
9	-1	-1	-1	1	157.1	0	0.52	1.5	0.13	0.08
10	1	-1	-1	1	251.4	0	0.52	1.5	0.17	0.11
11	-1	1	-1	1	157.1	0.52	0.52	1.5	0.3	0.31
12	1	1	-1	1	251.4	0.52	0.52	1.5	0.24	0.2
13	-1	-1	1	1	157.1	0	1.57	1.5	0.58	0.61
14	1	-1	1	1	251.4	0	1.57	1.5	1.15	0.87
15	-1	1	1	1	157.1	0.52	1.57	1.5	1.19	1.21
16	1	1	1	1	251.4	0.52	1.57	1.5	1.31	2.03

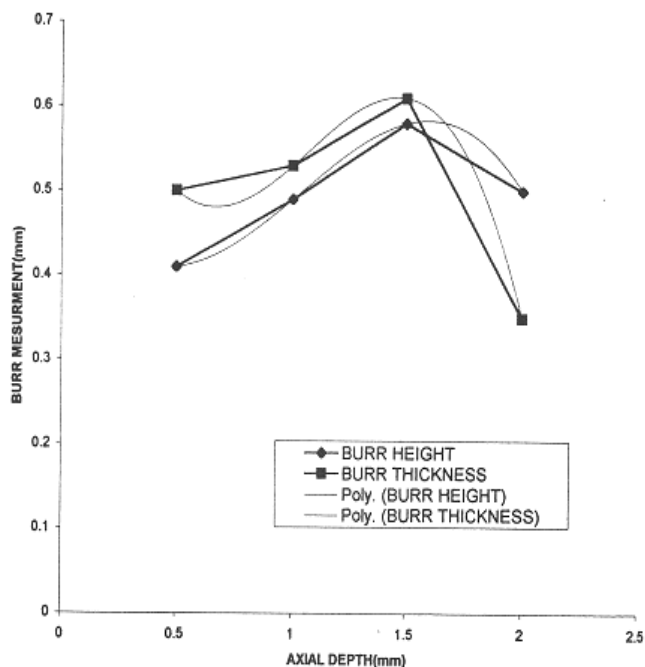
در جدول ۲ سطوح وزنی، مقادیر پارامترهای مستقل، نتایج آزمایشات (ارتفاع و ضخامت پلیسه مربوط به هر آزمایش) و ضرایب وزنی هر یک از متغیرهای مستقل در هر یک از آزمایشات، ارائه شده است. با استفاده از برنامه کامپیوتری نوشته شده، معادلات مربوط به ارتفاع و ضخامت پلیسه بدست آمده است.

**نمودار (۱): نمودار تأثیر پارامتر سرعت برشی بر ابعاد پلیسه.**

### ۳- نتایج و بحث و اظهار نظر

نتایج حاصل از بخش اول آزمایشها به صورت نمودار نشان داده شده است. در نمودارهای ۱ تا ۷ تأثیر هر یک از پارامترهای مستقل بر ارتفاع و ضخامت پلیسه نشان داده شده است. در نمودار ۱ مشاهده می شود که با افزایش سرعت برشی، ابعاد هندسی پلیسه یعنی ارتفاع و ضخامت آن افزایش می یابد. علت آن، افزایش دما در منطقه برش با افزایش سرعت برشی است که باعث تغییر خواص مکانیکی قطعه کار و تغییر رفتار ماده از حالت ترد به نرم می شود.

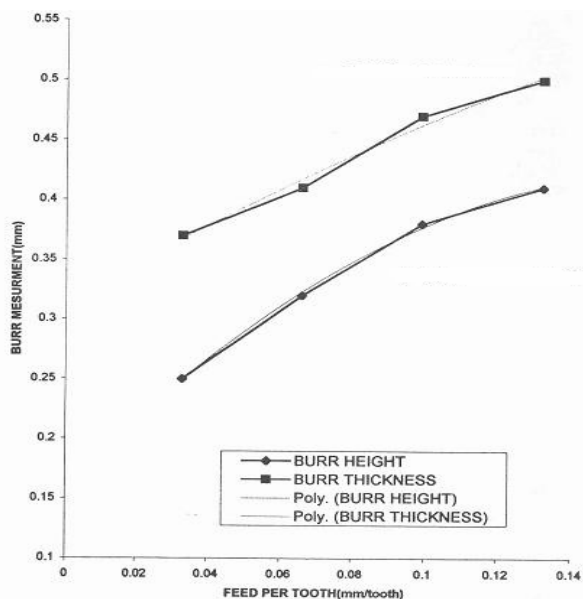
عمق برش، این زاویه افزایش یافته و در نتیجه میزان مواد باقیمانده و ابعاد پلیسه حاصله کاهش می‌یابد [۲].



نمودار (۳): نمودار تأثیر پارامتر عمق محوری برش بر ابعاد پلیسه.

در نمودار ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه خروج لبه اصلی ابزار، ارتفاع و ضخامت پلیسه افزایش می‌یابد. علت این است که در زوایای خروج ابزار بیشتر (تا ۹۰ درجه) مکانیسم شکل‌گیری پلیسه تغییر می‌یابد. در زوایای خروج لبه اصلی بیش از ۹۰ درجه، یک پلیسه بزرگ چسبیده به لبه افقی قطعه کار، باقی می‌ماند که نوعی پلیسه موجی شکل است. تشکیل این پلیسه ناشی از آن است که در مقطع برش کم، مواد قطعه کار به جای جدا شدن از قطعه کار و چسبیدن به براده، به زیر ابزار هدایت می‌شوند و با هر خروج ابزار، اضافه شدن مواد رخ می‌دهد که نتیجه آن ایجاد پلیسه اولیه موجی شکل است. در زوایای خروج ابزار کمتر از ۹۰ درجه، شکست باعث جدایش براده در انتهای عمل برش می‌شود و پلیسه ثانویه کوچکی در مقابل ابزار باقی می‌ماند.

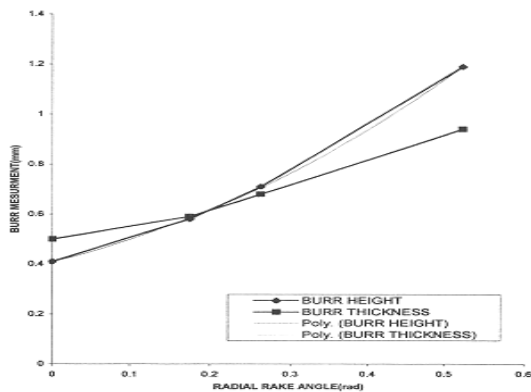
در نمودار ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی به ازای هر دندانه، ارتفاع و ضخامت پلیسه افزایش می‌یابد. علت این رفتار این‌گونه توجیه می‌شود که میزان تأثیر لبه ثانویه ابزار افزایش می‌یابد. در این حالت میزان مواد باقی‌مانده از قطعه کار در جلوی لبه ثانویه پس از برش و جدایش براده افزوده می‌شود. این مواد باقیمانده پس از خروج ابزار بر لبه افق قطعه کار خم خواهد شد [۲].



نمودار (۲): نمودار تأثیر پارامتر پیشروی به ازای هر دندانه بر ابعاد پلیسه.

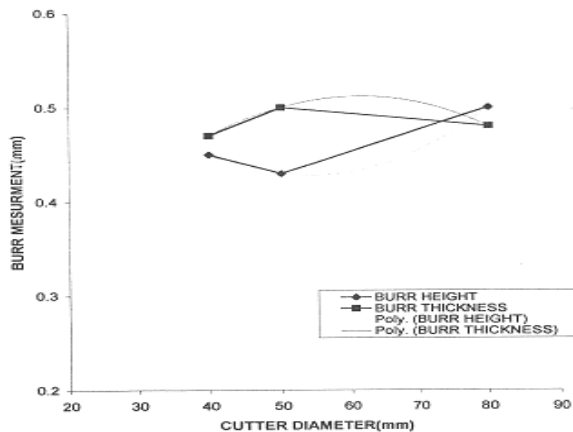
در نمودار ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش عمق برش تا  $ap < 1.5$  mm ارتفاع و ضخامت پلیسه افزایش می‌یابد. پس از آن با افزایش عمق برش، کاهش ارتفاع و ضخامت پلیسه رخ می‌دهد. ماکزیمم ابعاد پلیسه در محدوده  $1.5 < ap < 1.7$  mm رخ می‌دهد. علت این پدیده آن است که در عمق کم، پلیسه اولیه ناشی از عمل برش توسط لبه ثانویه اینسرت ایجاد می‌شود. در این حالت با افزایش عمق برش، ابعاد پلیسه افزایش می‌یابد. در عمق بیشتر، لبه اصلی ابزار و شعاع نوک ابزار سهم بیشتری در عمل برش ایفا می‌کنند. در این حالت، براده زاویه‌ای با لبه افق قطعه کار می‌سازد و در انتهای عمل برش مواد باقیمانده متصل به لبه قطعه کار، پلیسه ثانویه را تشکیل می‌دهند. حال با افزایش

در نمودار ۶ مشاهده می‌شود که افزایش زاویه براده شعاعی تأثیر بسزایی بر افزایش ابعاد پلیسه دارد. علت آن است که در شرایط برش با عمق محوری  $ap=0.5\text{ mm}$ ، لبه ثانویه ابزار بیشترین نقش را در برش ایفاء می‌کند و تغییر در زاویه براده شعاعی در نحوه خروج لبه ثانویه ابزار تأثیر دارد، با افزایش این زاویه، لبه ثانویه دیرتر از قطعه کار خارج شده و اجازه می‌دهد ماده باقیمانده از براده، بتواند کرنش پلاستیک بیشتری یافته و بر لبه اصلی قطعه کار خم شود [۳].

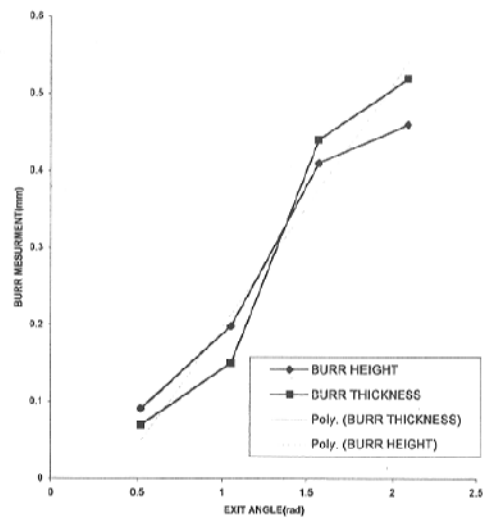


نمودار (۶): نمودار تأثیر پارامتر زاویه براده شعاعی بر ابعاد پلیسه.

در نمودار ۷ مشاهده می‌شود که با تغییر قطر ابزار برش، تغییر محسوسی در ابعاد پلیسه روی نمی‌دهد. می‌توان گفت که با تغییر قطر ابزار، چون پارامترهای برش ثابت باقی می‌ماند، تغییری در شرایط برش و ایجاد پلیسه روی نمی‌دهد و ابعاد پلیسه تغییر چندانی نمی‌کند.

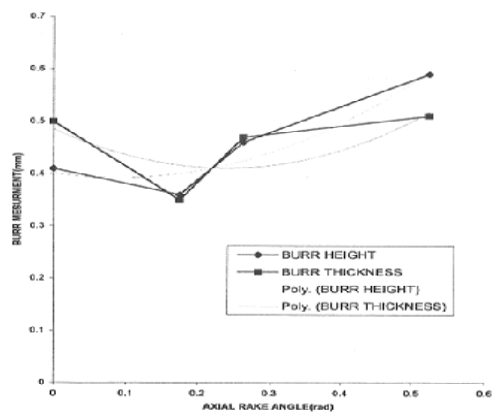


نمودار (۷): نمودار تأثیر پارامتر قطر ابزار برش بر ابعاد پلیسه.



نمودار (۴): نمودار تأثیر پارامتر زاویه خروج ابزار بر ابعاد پلیسه.

نمودار ۵ نشان‌دهنده آن است که با تغییر زاویه براده محوری تغییر ناچیزی در ابعاد هندسی پلیسه بوجود می‌آید. علت این گونه توضیح داده می‌شود که در این شرایط برشی با عمق برش  $ap=0.5\text{ mm}$  عمل برش بیشتر توسط لبه ثانویه ابزار انجام می‌گیرد. زاویه براده محوری بر لبه اصلی ابزار تأثیر می‌گذارد. با افزایش زاویه براده محوری، لبه ثانویه ابزار زودتر خارج شده و امکان تغییر فرم پلاستیک مواد جهت شکل‌گیری پلیسه داده نمی‌شود و بنابراین پلیسه حاصله کوچکتر می‌گردد. افزایش ناچیز در ابعاد پلیسه در مقادیر بیشتر از  $ARA=10(\text{deg})$  مربوط به تغییر در مکانیسم شکل‌گیری بر اثر شکست مثبت است [۳].



نمودار (۵): نمودار تأثیر پارامتر زاویه براده محوری بر ابعاد پلیسه.



نتایج حاصل از بهینه‌سازی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Opt h = 0.026 \text{ mm},$$

$$Opt Th = 0.067 \text{ mm},$$

$$Opt V = 157.1, \text{ m/s}$$

$$Opt RRA = 0 \text{ Rad},$$

$$Opt Exa = 0.52 \text{ Rad},$$

$$Opt ap = 1 \text{ mm}.$$

#### ۵- نتیجه‌گیری

در بخش اول، نتایج حاصل از تأثیرات مستقل هر یک از پارامترهای برشی و هندسی بر ابعاد پلیسه بررسی گردید. برای کاهش ابعاد پلیسه می‌توان روش‌های زیر را به کار برد:

- کاهش سرعت برشی یا کاهش دمای منطقه برش با استفاده از خنک کار
- کاهش پیشروی به ازای هر دندانه
- در خصوص عمق برش باید با توجه به شرایط کاری عمقی انتخاب نمود که در محدوده  $1.5 \leq ap \leq 1.7 \text{ mm}$  قرار نگیرد زیرا حداکثر ابعاد پلیسه مربوط به ایجاد هر دو نوع پلیسه اولیه و ثانویه در آن ناحیه روی می‌دهد
- کاهش زاویه خروج لبه اصلی ابزار
- افزایش زاویه براده محوری
- کاهش زاویه براده شعاعی

در بخش دوم، یک مدل ریاضی برای پیشگویی ارتفاع و ضخامت پلیسه ارائه شد. مدل ساخته شده بر اساس چهار پارامتر سرعت برشی، زاویه خروج ابزار، زاویه براده شعاعی و عمق برش می‌باشد و دارای حداکثر خطای ۱۶٪ است. قابل پیش‌بینی است که اگر تعداد پارامترهای در نظر گرفته شده در ایجاد مدل افزایش یابد، مدل ریاضی دقیق‌تر بوده و می‌توان به نتایج قابل قبول‌تری دست یافت.

با استفاده از بهینه‌سازی مدل ریاضی، مقادیر بهینه پارامترهای مستقل در محدوده کاری موردنظر به دست می‌آیند.

در بخش دوم مدل‌سازی ریاضی انجام گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از آزمایشها و برنامه کامپیوتری نوشته شده، معادلات زیر برای پیشگویی ارتفاع و ضخامت پلیسه حاصل گردیده است:

$$\begin{aligned} h &= 0.43435 - 0.00176 \times V + 1.69724 \times RRA \\ &+ 0.16124 \times EXA - 1.03689 \times ap \\ &- 0.00783 \times V \times RRA - 0.00044 \times V \times EXA \\ &+ 0.00402 \times V \times ap + 0.32234 \times RRA \times EXA \\ &+ 0.0307 \times RRA \times ap + 0.43428 \times EXA \times ap \\ Th &= 1.17037 - 0.00429 \times V - 0.24610 \times RRA \\ &+ 0.40115 \times EXA - 1.24557 \times ap \\ &- 0.00203 \times V \times RRA - 0.00177 \times V \times EXA \\ &+ 0.00373 \times V \times ap + 0.54945 \times RRA \times EXA \\ &+ 0.72307 \times RRA \times ap + 0.56761 \times EXA \times ap \end{aligned}$$

که  $h$  و  $Th$  به ترتیب ارتفاع و ضخامت پلیسه می‌باشد. با مقایسه مدل ریاضی و نتایج حاصل از آزمایشها خطای، پیشگویی معادلات حداکثر ۱۶٪ خواهد بود. گفتنی است که برای پیش‌بینی ابعاد پلیسه، در مقالات مختلف تاکنون رابطه‌ای ارائه نشده است. برای افزایش دقت در اینجا، می‌توان از شبکه عصبی و روابط غیرخطی استفاده کرد و میزان خطای موجود در روش خطی را کاهش داد؛ ولی ملاحظه گردید که با در نظر گرفتن رابطه خطی نیز، مقدار خطای به دست آمده قابل قبول می‌باشد.

#### ۴- بهینه‌یابی

با توجه به روابط مربوط به ارتفاع و ضخامت پلیسه و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی معادلات و در نظر گرفتن معادلات محدود کننده، می‌توان مناسب‌ترین پارامترها را برای داشتن حداقل ارتفاع پلیسه به دست آورد [۷]:

معادلات محدود کننده به شرح زیر است:

$$0.05 \leq Th \leq 1 \text{ (mm)},$$

$$157.1 \leq V \leq 251.4 \text{ (m/min)},$$

$$0 \leq RRA \leq 0.52 \text{ (Rad)},$$

$$0.52 \leq EXA \leq 1.57 \text{ (Rad)},$$

$$0.5 \leq ap \leq 1.5 \text{ (mm)}.$$

مراجع:

1. Gillespie, L.K. and Blooter P.T., "The Formation and Properties of Machining Burrs", ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 1, No. 2, pp. 5-10, 1997.
2. Olvera, O. and Barrow, G., "An Exprimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling", Int. J. Mach. Tools M'F., Vol. 36, No. 9, pp. 1005-1020, 1996.
3. Hashima, M., Hassamontr, J., and D.A. Dornfeld, "Effect of in Plane Exit Angle and Rake Angle on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation", J. of M'F. Science and Eng., Vol. 121, No. 3, pp. 13-19, 1996.
4. Hashima, M., Changem Y.P., and Dornfeld, D.A., "Analysis of Burr Formation Mechanism in Ortogonal Cutting", J. Manufacturing Science and Eng., Vol. 121, No. 1, pp. 1-7, 1999.
5. Donaldson, C. and Hlecain, G., "Tool Design", McGraw-Hill, pp. 344-357, 1989.
6. Rao, S.S., "Theory and Application of Optimization", John Wiley & Sons, New York, pp. 256-340, 1977.
7. Mendenhall, W., Reinmuth, J.E., "Statistics for Management and Economics", Wadsworth Publishing, Massachusetts, 1989.