



## پرداخت لنزهای کروی با استفاده از ابزار کروی به کمک ماشین کنترل عددی سه محوره

سید حسین هاشمی<sup>1</sup>، پیمان مصدق<sup>2\*</sup>، رسول کوشا<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
 2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
 \* mosadegh@cc.iut.ac.ir, 84156-83111 صندوق پستی

## اطلاعات مقاله

## چکیده

پرداخت به عنوان آخرین و مهم‌ترین مرحله از تولید قطعات اپتیکی بشمار می‌رود. روش‌های پرداخت تحت کنترل کامپیوتر معمولاً به منظور پرداخت سطوح پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن مقدار براده‌برداری در هر نقطه از قطعه کار بسته به خطای سطح در آن نقطه کنترل می‌گردد. در روش‌های تماسی پرداخت اغلب از روش کنترل سرعت پیشروی ابزار به منظور رفع ایرادهای محلی قطعه‌کار استفاده می‌شود که در آن سرعت پیشروی زیاد ابزار منجر به براده‌برداری کمتر و سرعت پیشروی کمتر منجر به براده‌براری بیشتر از سطح می‌شود. الگوی نرخ براده‌برداری ابزار از پارامترهای مهم فرایند پرداخت تحت کنترل کامپیوتر است که قابل پیش‌بینی بودن آن منجر به حصول نتایج بهتر می‌شود. در این تحقیق، ابزار جدید کروی ارائه شده که می‌تواند با استفاده از یک ماشین کنترل عددی سه محوره، سطوح کروی را پرداخت کند. نرخ براده‌برداری ابزار به علت تغییر زاویه درگیری محور ابزار کروی با سطح کروی و در نتیجه تغییر سرعت نسبی ابزار در حین حرکت ابزار متغیر می‌شود. الگوی براده‌برداری ابزار که وابسته به زاویه درگیری ابزار و قطعه‌کار می‌باشد، مدل‌سازی شده و سپس با روش جدید ماتریسی فرایند پرداخت شبیه‌سازی و سرعت‌های خطی ابزار با هدف کاهش خطای سطح بهینه شد. به منظور بررسی عملکرد ابزار و توانایی روش مدل‌سازی شده در پرداخت سطوح، سطح لنزی کروی به قطر 130 میلی‌متر و با صافی سطح اولیه 1/114 میکرومتر برای PV و با استفاده از یک ماشین کنترل عددی سه محوره پرداخت شد و به صافی سطح 395 نانومتر برای PV رسید.

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 08 آریهشت 1393  
 پذیرش: 08 تیر 1393  
 ارائه در سایت: 16 مهر 1393  
 کلید واژگان:  
 پرداخت تحت کنترل کامپیوتر  
 الگوی براده‌برداری ابزار  
 روش کنترل سرعت پیشروی  
 لنزهای کروی  
 ابزار کروی

## Polishing of spherical lenses using spherical tool on a 3-axis CNC machine

Seyed Hosein Hashemi, Peiman Mosaddegh\*, Rasoul Koosha

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
 \*P.O.B.84156-83111 Isfahan, Iran, mosadegh@cc.iut.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 28 April 2014  
 Accepted 29 June 2014  
 Available Online 08 October 2014

Keywords:  
 Computer Control Polishing  
 Tool Influence Function  
 Feed rate control method  
 Spherical lens  
 Spherical tool

## ABSTRACT

Polishing is considered as the last and most important step in the manufacturing of optical components. Computer control polishing (CCP) methods are usually used to polish complex surfaces. In this method, material removal is controlled at each point, depending on error at that point. In contact polishing mechanism, tool feed rate is often controlled to eliminate local errors. It means that the higher the tool feed rate, the lower the material removal would be and vice versa. Tool influence function (TIF), which is defined as the instantaneous material removal under the polishing tool for a given tool motion, is the most important parameter in CCP and its predictability during the polishing process leads to reliable result. In this study, a new spherical tool which can polish complex surfaces by using a 3-axis CNC machine is presented. Because of spherical geometry of both tool and workpiece, tool, material removal rate is variable because of changing the angle between tool axis and surface normal vector which leads to variation of relative speed. Tool influence function which depends on tool engagement's angle was modeled based on Preston equation. Moreover, the simulation is modeled based on discretization of tool path. To evaluate the methodology, some polishing experimental tests were performed. The experimental results show that a 130 mm spherical convex lens with initial surface roughness of 1.114 micrometer for PV was decreased to 395 nm for PV using the CCP method developed in this study.

## 1- مقدمه

سطح آن‌ها است. روش‌های پرداخت تحت کنترل کامپیوتر<sup>1</sup> اصولاً به منظور پرداخت سطوح غیرکروی توسعه یافتند. در سطوح غیرکروی به علت متغیر بودن شعاع سطح از روش‌های سنتی پرداخت نمی‌توان استفاده کرد.

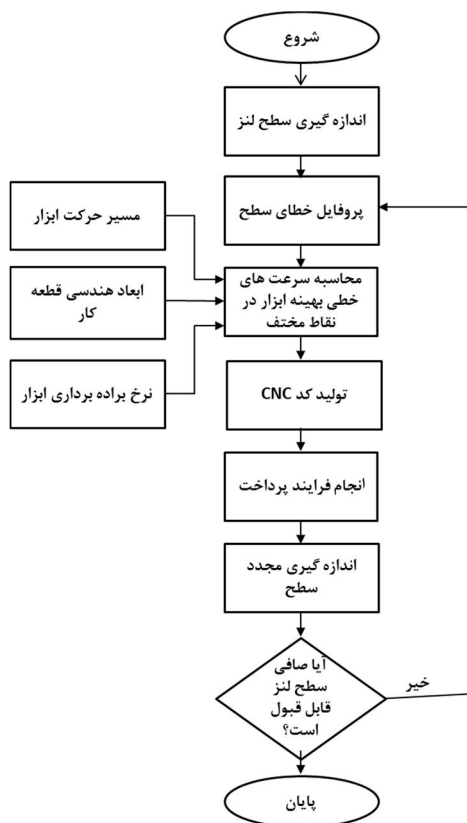
در روش‌های سنتی پرداخت لنزها، سطح لنز با حرکت متناوب ابزاری با شعاع برابر با شعاع سطح لنز، در حضور مایع ساینده، پرداخت می‌شود. این روش محدود به سطوح تخت و کروی بوده و علت آن ثابت بودن شعاع انحنای

1- Computer Control Polishing

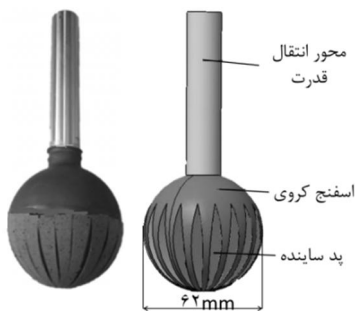
هوشمند می‌شود. الگوریتم نشان داده‌شده در شکل 1 فرایند پرداخت به کمک کامپیوتر برای ابزارهای تماسی را نشان می‌دهد که در آن سرعت‌های مناسب حرکت ابزار با توجه به خطای سطح، مسیر حرکت ابزار، هندسه قطعه‌کار و نرخ براده‌برداری ابزار محاسبه و به کمک ماشین کنترل عددی تبدیل شده است و به ماشین ارسال می‌گردد و نهایتاً عملیات پرداخت انجام می‌گیرد. سپس سطح مجدداً اندازه‌گیری شده و در صورت قابل قبول نبودن صافی سطح، عملیات فوق دوباره انجام می‌پذیرد.

### 3- ابزار کرووی

ابزار کرووی طراحی شده در این تحقیق جهت پرداخت سطوح کرووی و غیر کرووی کاربرد دارد. ابزار شامل یک کره اسفنجی با ضریب سختی مشخص می‌باشد که به یک شافت آلومینیومی متصل بوده و پد ساینده بر روی آن چسبیده شده است. شکل 2 نشان دهنده شماتیک و ابزار ساخته شده می‌باشد. مزیت این ابزار اولاً توانایی کار بر روی لنت‌های عمیق بوده و ثانیاً اینکه می‌توان با تغییر میزان فشردگی اسفنج قطر موثر درگیر با قطعه کار را تغییر داد.



شکل 1 الگوریتم فرایند پرداخت تحت کنترل کامپیوتر



شکل 2 ابزار کرووی

روش‌های پرداخت تحت کنترل کامپیوتر، فرایند پرداخت هوشمند شده و مقدار براده برداری در هر نقطه متغیر بوده و وابسته به خطای سطح در آن نقطه است. روش‌های پرداخت به کمک کامپیوتر را می‌توان به دو دسته کلی تماسی و غیر تماسی تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های تماسی ابزار به طور مستقیم با سطح قطعه‌کار در تماس می‌باشد و ذرات ساینده بین آن‌ها عامل اصلی براده‌برداری است. ابزار تماسی در این روش معمولاً انعطاف‌پذیر بوده و ابعاد آن در مقایسه با ابعاد قطعه‌کار کوچک است تا بتواند خود را در هنگام حرکت در هر نقطه به سطح منطبق کند [1]. ابزارهای تماسی را می‌توان به چهار دسته‌ی صلب، نیمه صلب، انعطاف‌پذیر و ابزار ویسکوالاستیک دسته‌بندی کرد [2]. در روش‌های غیر تماسی اصولاً بین ابزار و قطعه‌کار تماسی صورت نمی‌گیرد و عامل براده‌برداری می‌تواند حرارتی، مانند پرداخت به کمک لیزر [3]، پرداخت با استفاده از میدان مغناطیسی [4]، میدان الکتریکی [5] و روش‌های نوین دیگری باشد [6-9]. روش کنترل مقدار براده برداری در فرایند پرداخت تحت کنترل کامپیوتر بسته به روش و مکانیزم براده‌برداری متفاوت می‌باشد. به طور مثال در روش‌های تماسی با تغییر سرعت پیشروی ابزار در هر نقطه، فشار ابزار و یا ترکیب آن‌ها مقدار براده‌برداری در هر نقطه از سطح کنترل می‌گردد [10]. در سال 1972 رونالد اسپدن با استفاده از روش کنترل مسیر ابزار، مقدار براده برداری را در فرایند پرداخت کنترل کرد [11]. رابرت جونز یکی از توسعه دهندگان روش تماسی پرداخت تحت کنترل کامپیوتر می‌باشد و مقالات متعددی در این زمینه از وی به چاپ رسیده است. وی با استفاده از انتگرال کانولوشن<sup>4</sup>، فرایند پرداخت را مدل‌سازی کرده و با استفاده از دی‌کانولوشن<sup>5</sup> زمان مکث بهینه را محاسبه کرد [12-14]. تابع نرخ براده برداری ابزار در روش شبیه‌سازی کانولوشن باید در تمامی نقاط مسیر مقداری ثابت داشته باشد و نمی‌تواند تابعی از مسیر حرکت نیز باشد. در این تحقیق ابزاری جدید کرووی از نوع انعطاف‌پذیر ارائه شده که در حین حرکت بر روی سطوح به علت تغییر در زاویه درگیری آن با قطعه‌کار و در نتیجه تغییر در سرعت نسبی، تابع نرخ براده‌برداری آن تغییر می‌کند و وابسته به زاویه درگیری می‌باشد. در این تحقیق تابع نرخ براده‌برداری ابزار کرووی که وابسته به زاویه درگیری ابزار و قطعه‌کار می‌باشد، با استفاده معادله پرستون و توزیع تنش هرترزین مدل‌سازی شد و با استفاده از آزمایش عملی، ثابت پرستون مجموعه ابزار و قطعه‌کار به دست آمد. سپس با استفاده از روش جدید گسسته‌سازی مسیر حرکت ابزار [15]، که در آن می‌توان تابع نرخ براده برداری متغیر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود، فرایند پرداخت، شبیه‌سازی شده و با استفاده از روش‌های عددی، سرعت‌های بهینه ابزار به منظور کاهش خطای سطح محاسبه شد. شاخص کیفیت سطح لنت‌ها معمولاً ماکزیمم ارتفاع قله تا دره<sup>6</sup> و جذر میانگین مربعات خطاها<sup>7</sup> RMS می‌باشد.

### 2- پرداخت تحت کنترل کامپیوتر

در روش‌های سنتی پرداخت سطوح لنت‌ها، کنترلی بر روی میزان براده برداری وجود نداشت و ابزار پرداخت معمولاً طی یک حرکت رفت و برگشتی بر روی سطح لنز حرکت کرده و طی زمان چندین ساعته صافی سطح را به مقدار مطلوب می‌رساند. در روش‌های پرداخت به کمک کامپیوتر، فرایند پرداخت

1- Laser Beam Polishing  
2- Magneto Rheological Polishing  
3- Electro Rheological Polishing  
4- Convolution  
5- De-convolution  
6- Peak to Valley  
7- Root Mean Square

4- مدل سازی الگوی براده برداری ابزار

بنا بر رابطه پرستون [16] که در معادله (1) آورده شده است، نرخ براده برداری در پرداخت، تابع فشار و سرعت نسبی بین ابزار و قطعه کار در هر نقطه و ثابت پرستون می باشد که در آن ثابت پرستون به شرایط پرداخت مانند جنس قطعه کار، نوع و اندازه ذرات ساینده و پد ساینده بستگی دارد.

$$\beta = \frac{dh(x,y)}{dt} = k\rho(x,y)v(x,y) \quad (1)$$

که در این معادله  $\beta$  نرخ براده برداری در هر نقطه،  $h(x,y)$  ارتفاع هر نقطه سائیده شده،  $k$  ثابت پرستون،  $p(x,y)$  فشار بین ابزار و قطعه کار در هر نقطه و  $v(x,y)$  سرعت نسبی بین ابزار و قطعه کار در هر نقطه می باشد. شکل 3 شماتیک فشردگی ابزار بر روی سطح قطعه کار را نشان می دهد که در آن شعاع ابزار کرووی،  $R'$  شعاع سطح قطعه کار کرووی،  $\omega$  سرعت چرخشی ابزار،  $F$  نیروی عمودی وارده به سطح،  $q$  میزان فشردگی اسفنج و شعاع دایره ایجاد شده در اثر فشردگی ابزار بر روی قطعه کار می باشد. به منظور ثابت نگه داشتن نیروی عمود به سطح در حین حرکت ابزار، همانطور که در شکل نشان داده شده است، مرکز ابزار کرووی در یک مسیری با فاصله ثابت از سطح حرکت می کند که این باعث ثابت ماندن فشردگی اسفنج کرووی و در نتیجه ثابت ماندن نیروی عمود به سطح می شود. عمود بودن نیرو سبب ایجاد توزیع فشار یکنواخت در طول مسیر حرکت ابزار بر روی قطعه کار می شود و طبق معادله پرستون تنها عامل تأثیرگذار بر نرخ براده برداری در این حالت، سرعت نسبی بین ابزار و قطعه کار می شود.

توزیع فشار بین ابزار کرووی و قطعه کار، از رابطه توزیع تنش هرتزین که در معادله (2) آمده است، به دست می آید [17].

$$P(r) = \frac{3F}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

که در آن  $F$  نیروی اعمالی،  $a$  شعاع دایره تماس ابزار و قطعه کار و  $r$  فاصله نقطه دلخواه از مرکز دایره تداخل بوده و از رابطه (3) به دست می آید.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

شعاع دایره درگیری از رابطه (4) به دست می آید.

$$a^3 = \frac{3FR^*}{4E^*} \quad (4)$$

در رابطه (4)  $R^*$  شعاع معادل و  $E^*$  ضریب یانگ معادل بوده و از روابط

$$(5) \text{ و } (6) \text{ به دست می آید [17].}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \quad (5)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \quad (6)$$

در معادله (6)  $E1$  و  $1v$  به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون اسفنج کرووی و  $E2$  و  $2v$  به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون قطعه کار می باشد. ناحیه درگیری ابزار کرووی با قطعه کار در حین حرکت بر روی سطح لنز تغییر می کند که این باعث متغیر شدن سرعت خطی ابزار در نقاط مختلف می شود. نیروی عمود به سطح به دلیل ثابت ماندن میزان فشردگی اسفنج، ثابت می ماند. شکل 4 به صورت شماتیک ابزاری که در زاویه  $\theta$  درگیر است را نشان می دهد. شعاع دایره تداخل ابزار و قطعه کار،  $C(x,y)$  نقطه دلخواه در دایره درگیری ابزار،  $e$  فاصله عرضی نقطه دلخواه  $C$  از محور دوران و  $x$  و  $y$  فاصله نقطه دلخواه  $C$  از مرکز دستگاه مختصات محلی می باشد. دستگاه مختصات محلی همیشه در مرکز دایره تداخل ابزار و قطعه کار قرار دارد.

با توجه به هندسه شکل 4 می توان  $e$  فاصله عرضی نقطه  $C$  از محور دوران را از رابطه (7) محاسبه کرد.

$$e = |x \cos(\theta) + (R - q) \sin(\theta)| \quad (7)$$

اگر  $L$  فاصله نقطه دلخواه  $C$  از محور دوران باشد می توان آن را از رابطه (8) به دست آورد.

$$L = \sqrt{e^2 + y^2} \quad (8)$$

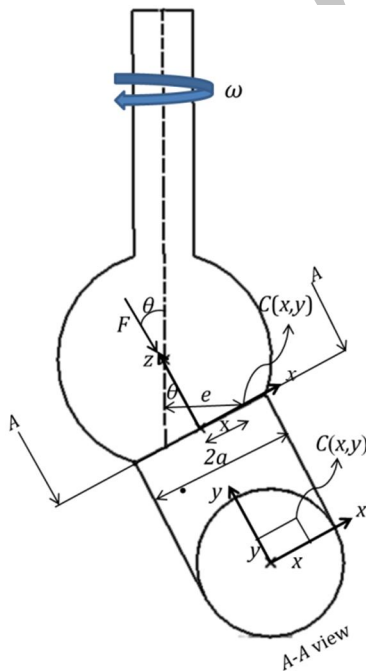
سپس سرعت خطی نقطه  $C$  از رابطه (9) به دست می آید.

$$V = L \cdot \omega \quad (9)$$

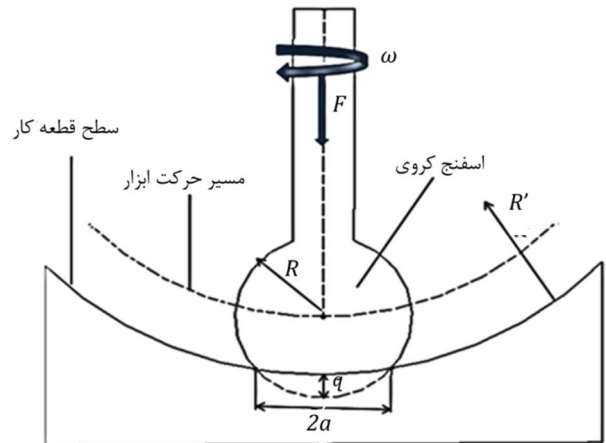
با جایگذاری روابط (7) و (8) در رابطه (9) داریم:

$$V = (\sqrt{(x \cos(\theta) + (R - q) \sin(\theta))^2 + y^2}) \omega \quad (10)$$

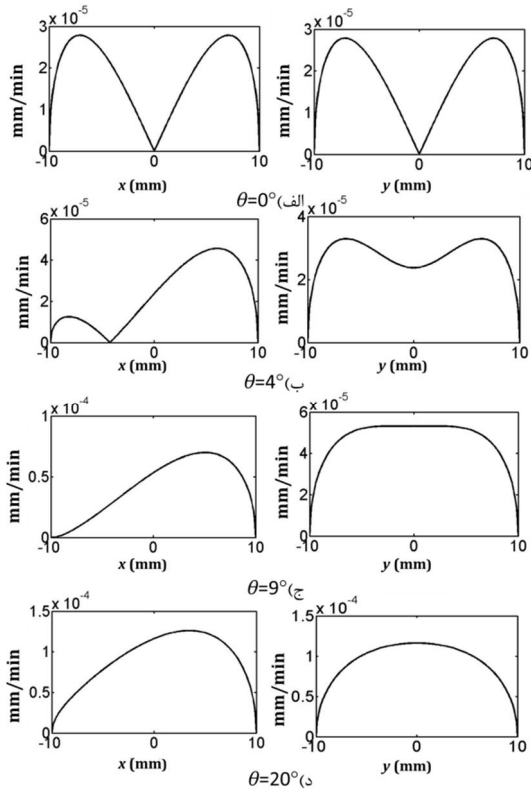
با جایگذاری رابطه (2) و (10) در معادله پرستون (1) نرخ براده برداری ابزار  $\beta$  به دست می آید. طبق معادله (11) داریم:



شکل 4 شماتیک ابزار در زاویه درگیری  $\theta$



شکل 3 شماتیک فشردگی ابزار بر روی قطعه کار



شکل 5 منحنی نرخ براده برداری ابزار کرووی در زوایای مختلف  $\theta$

### 5- شبیه‌سازی فرایند پرداخت و بهینه‌سازی زمان مکث

شبیه‌سازی فرایند پرداخت در محیط مجازی اصولاً جهت پیش‌بینی سطح بعد از پرداخت و محاسبه و بهینه‌سازی سرعت‌های حرکتی ابزار در نقاط مختلف مسیر و به منظور کاهش خطای سطح انجام می‌شود. در این تحقیق با استفاده از روش گسسته‌سازی مسیر ابزار و تبدیل فرایند پرداخت به یک روش ماتریسی که در آن علاوه بر کاهش زمان محاسبات، محدودیت‌های مسیر حرکت و لزوم ثابت بودن منحنی نرخ براده‌برداری در طول شبیه‌سازی فرایند پرداخت را در مقایسه با استفاده از انتگرال کانونوشن در شبیه‌سازی فرایند ندارد، استفاده شد [15]. در این روش می‌توان نرخ براده برداری متغیر که وابسته به زاویه درگیری ابزار می‌باشد را در شبیه‌سازی فرایند اعمال کرد. در شبیه‌سازی، حرکت پیوسته ابزار تبدیل به حرکت گسسته در نقاطی که با یکدیگر فاصله  $ds$  دارند، می‌شود. در واقع به منظور شبیه‌سازی حرکت ابزار، ابزار بر روی نقاط مسیر قرار گرفته و به هر کدام از نقاط مسیر، زمان مکثی اختصاص داده می‌شود. زمان مکث<sup>2</sup> یکی از مفاهیم اساسی در شبیه‌سازی فرایند پرداخت است. اگر ابزار فاصله بین دو نقطه از مسیر ( $ds$ ) را با سرعت  $v$  طی کند، در این صورت زمان مکثی که به نقطه بین این دو نقطه اختصاص داده می‌شود از معادله (14) به دست می‌آید. به عبارت دیگر مدت زمان عبور ابزار از دو نقطه از مسیر، زمان مکث نام دارد.

$$t = \frac{ds}{v} \quad (14)$$

در صورتی که مختصات درگیری ابزار با هر نقطه از سطح در طول مسیر حرکت ابزار مشخص شود، نرخ براده‌برداری در آن نقطه از معادله (11) به دست می‌آید. با ضرب نرخ براده‌برداری ابزار در زمان مکث اختصاص داده شده

$$\beta = \frac{dh(x, y)}{dt} = k \cdot \frac{3F}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{(x^2 + y^2)}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{(x \cos(\theta) + (R - q) \sin(\theta))^2 + y^2} \omega \quad (11)$$

با انتگرال‌گیری از طرفین معادله (11) مقدار براده برداری در هر نقطه به دست می‌آید. طبق معادله (12) داریم:

$$\int dh(x, y) = \int k \frac{3F}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{(x^2 + y^2)}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{(x \cos(\theta) + (R - q) \sin(\theta))^2 + y^2} \omega dt \quad (12)$$

با توجه به مستقل بودن پارامترها نسبت به زمان در رابطه (13) داریم:

$$\Delta h(x, y) = k \cdot \frac{3F}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{(x^2 + y^2)}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{(x \cos(\theta) + (R - q) \sin(\theta))^2 + y^2} \omega t \quad (13)$$

که در آن  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع قبل و بعد از براده‌برداری می‌باشد.

در رابطه (13) ضریب پرستون  $k$  مجهول می‌باشد و باید از آزمایش به دست آید. به منظور دستیابی به ثابت پرستون  $k$  ابزار کرووی به صورت درجا طی مدت زمان مشخص با شرایط جدول 1 بر روی سطح لنز کار کرده و توپوگرافی سطح قبل و بعد از انجام آزمایش توسط دستگاه تداخل سنج<sup>1</sup> اندازه‌گیری شد. خروجی تداخل سنج یک ماتریس مربعی بوده که درایه‌های آن معرف ارتفاع نقاط سطح نسبت به سطح مبنا می‌باشد و واحد اعداد آن طول موج لیزر هلیوم-نئون مورد استفاده در تداخل سنج است ( $\lambda = 632 \text{ nm}$ ). پس از کسر کردن ماتریس سطح بعد از آزمایش از سطح اولیه، میزان براده برداری هر نقطه ( $\Delta h(x, y)$ ) به دست آمد و سپس با استفاده از رابطه (13) عدد  $7/633 \times 10^{-6} \text{ (mm}^2/\text{N)}$  برای میانگین ثابت پرستون به دست آمد.

شکل 5 منحنی نرخ براده‌برداری ابزار مدل‌سازی شده را در محورهای  $x$  و  $y$  و در زوایای مختلف  $\theta$ ، با جایگذاری ضریب پرستون به دست آمده از آزمایش و برای حالتی که شعاع دایره درگیری ابزار و قطعه‌کار برابر با 10 میلی‌متر می‌باشد را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار متلب رسم شده است. محور عمودی نشان دهنده نرخ براده‌برداری و محور افقی فاصله از دایره تداخل در راستای محور  $x$  و  $y$  می‌باشد. دستگاه مختصات محلی با تغییر زاویه  $\theta$  جابجا می‌شود و منحنی نرخ براده‌برداری ابزار نسبت به آن رسم می‌شود. همان‌طور که در شکل 4-الف مشخص است، در حالت  $\theta = 0$  به دلیل صفر بودن سرعت در مرکز ابزار، نرخ براده‌برداری در مرکز صفر می‌باشد. با افزایش زاویه درگیری، نرخ براده برداری افزایش می‌آید و تقارن منحنی در محور  $x$  به دلیل عدم تقارن سرعت نسبت به مرکز مختصات محلی به هم می‌خورد. در زاویه بیشتر از 9 درجه نرخ براده‌برداری صفر در دایره درگیری وجود نداشته و با افزایش زاویه درگیری، حجم براده‌برداری افزایش یافته و تقارن نرخ براده‌برداری در راستای محور  $x$  افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش زاویه درگیری، بازده براده‌برداری بیشتر می‌شود.

جدول 1 شرایط آزمایش برای تعیین ضریب پرستون

نوع ماده ساینده	نیروی پرداخت (N)	سرعت دورانی ابزار (rpm)	شعاع لنز (mm)	زاویه قطعه‌کار $\theta$	جنس
سریم اکساید	4	250	320	0	BK7

$$dt_{\min} = \frac{ds}{Feed_{\max}} \quad (17)$$

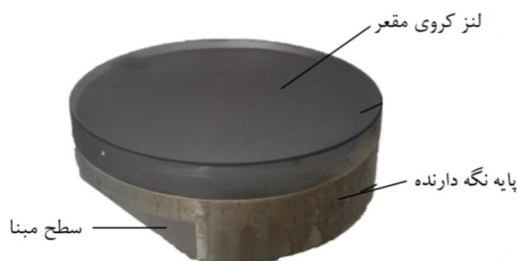
3- تغییر سرعت در دو نقطه متوالی از مسیر باعث ایجاد شتاب در میز می‌شود و اگر این تغییرات سرعت، زیاد باشد شتاب حاصله باعث ضربه زدن و آسیب دیدن دستگاه می‌شود. کما اینکه در صورت زیاد بودن این تغییرات سرعت، دستگاه توانایی پاسخگویی و اجرای آن را نداشته باشد. پس شیب تغییرات سرعت و یا زمان مکث نباید از حدی بیشتر باشد. در این تحقیق حداکثر تغییرات سرعت در دو نقطه متوالی 100 میلی‌متر بر دقیقه است.

با توجه به محدودیت‌هایی که در محاسبه زمان مکث بیان شد در اینجا از روش حل عددی و با استفاده از الگوریتمی تکرارشونده، زمان‌های مکث بهینه به دست آمد. در این الگوریتم، در هر چرخه از حل، نقطه‌ای که بیش‌ترین ارتفاع را دارد شناسایی شده و زمان‌های مکث متناسب با  $\beta$  نظیر آن  $(t_i = \alpha\beta_{ij})$  به نقاط مسیر اختصاص داده می‌شود به گونه‌ای که دو درصد از ارتفاع آن نقطه کاسته شود. سپس عملیات پرداخت به صورت مجازی انجام شده و دوباره نقطه‌ای که بیش‌ترین ارتفاع را در سطح جدید دارد شناسایی شده و عملیات فوق دوباره انجام می‌پذیرد. این چرخه تا رسیدن به PV با کمترین مقدار ممکن ادامه می‌یابد و در انتها زمان‌های مکث محاسبه شده در هر چرخه برای تمامی نقاط مسیر با یکدیگر جمع می‌شود و زمان مکث نهایی برای تک تک نقاط مسیر به دست می‌آید.

### 6- آزمایش پرداخت با ابزار کرووی

به منظور بررسی عملکرد ابزار و توانایی روش هوشمند فوق در پرداخت سطوح آزمایشی انجام شد، لنزی مقعر به شعاع سطح 320 میلی‌متر و قطر 130 میلی‌متر که در شکل 6 نشان داده شده است با ابزار کرووی ساخته شده و با استفاده از یک ماشین کنترل عددی سه محوره به روش کنترل سرعت پرداخت شد. سطح اولیه لنز، توسط تداخل سنج لیزری هلیوم-نئون با طول موج 632 نانومتر اندازه‌گیری شد. ماتریس و فرانس‌های سطح در شکل 7 نشان داده شده است که در آن واحد اعداد ماتریس سطح، 632 نانومتر می‌باشد و همچنین واحد محورهای  $x$  و  $y$  در ماتریس سطح، بسته به نسبت قطر لنز به تعداد درایه‌های ماتریس می‌باشد. با توجه به اینکه ابعاد ماتریس سطح اخذ شده از دستگاه تداخل سنج برابر با 200 و قطر لنز 130 میلی‌متر می‌باشد، لذا هر واحد در محور افقی و عرضی ماتریس برابر با 0/72 میلی‌متر در طول و عرض سطح لنز هستند. سطح اولیه خطایی برابر با  $1/1764$  (1/114 میکرومتر) برای PV و  $0/278$  (175 نانومتر) برای RMS دارد.

فرایند پرداخت با توجه به الگوی براده‌برداری مدل‌سازی شده، شبیه‌سازی شد و زمان‌های مکث بهینه در نقاط مختلف مسیر حرکت ابزار محاسبه شد. مسیر حرکتی استفاده شده، اسپیرال<sup>1</sup> بوده و از مرکز لنز شروع



شکل 6 لنز کرووی مقعر

به آن نقطه از مسیر که در آن ابزار با نقطه سطح درگیر می‌باشد، مقدار براده برداری از آن نقطه از سطح به دست می‌آید. اگر کل نقاط درگیری ابزار با یک نقطه از سطح در طول مسیر حرکت ابزار مشخص شود و در زمان‌های مکث مربوطه ضرب شود و نهایتاً با یکدیگر جمع شود، میزان کاهش ارتفاع آن نقطه از سطح در کل مسیر حرکت ابزار به دست می‌آید. اگر این میزان براده برداری از ارتفاع اولیه نقطه سطح کسر شود، ارتفاع نهایی آن بعد از عملیات پرداخت به دست می‌آید. و اگر این کار برای تمامی نقاط سطح انجام شود، ارتفاع نقاط سطح بعد از فرایند پرداخت به دست می‌آید. اگر ماتریس ارتفاعات سطح را به صورت بردار بنویسیم، سطح بعد از پرداخت، از معادله (15) به دست می‌آید که می‌توان آن را به فرم ماتریسی معادله (16) نوشت.

$$h = h_0 - \beta * T \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{0_1} \\ h_{0_2} \\ h_{0_3} \\ \vdots \\ h_{0_n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \dots & \beta_{1k} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} & \dots & \beta_{2k} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} & \dots & \beta_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \beta_{n3} & \dots & \beta_{nk} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_k \end{bmatrix} \quad (16)$$

که در آن بردار  $h_0$  ارتفاع نقاط سطح اولیه و بردار  $h$  ارتفاع نقاط سطح بعد از فرایند پرداخت می‌باشد. ماتریس  $\beta$ ، نرخ براده برداری ابزار را برای نقاط مختلف سطح زمانی که ابزار در نقاط مختلف مسیر حرکت قرار دارد، نشان می‌دهد و از معادله (11) به دست می‌آید. به عبارت دیگر  $\beta_{ij}$  نشان‌دهنده نرخ براده برداری تأثیرگذار بر نقطه  $i$ ام سطح می‌باشد زمانی که مرکز ابزار در نقطه‌ی  $i$ ام مسیر حرکت می‌باشد. در صورتی که نقطه  $i$ ام سطح، تحت تأثیر ابزار که در نقطه‌ی  $j$ ام مسیر حرکت است نباشد، مقدار  $\beta_{ij}$  صفر می‌باشد. بردار  $T$  زمان مکث اختصاص داده شده به نقاط مختلف مسیر حرکت ابزار را نشان می‌دهد که در آن  $t_j$  زمان مکث اختصاص داده شده به نقطه  $i$ ام از مسیر حرکت می‌باشد. با ضرب ماتریس  $\beta$  در بردار زمان مکث ( $T$ ) مقدار براده برداری از سطح به دست می‌آید. به طور مثال ضرب سطر  $i$ ام از ماتریس  $\beta$  در بردار زمان مکث، میزان تغییر ارتفاع نقطه  $i$ ام سطح را نشان می‌دهد و در صورتی که از ارتفاع اولیه آن نقطه کم شود، ارتفاع آن نقطه پس از پرداخت به دست می‌آید. در معادله فوق  $n$  تعداد نقاط سطح و  $k$  تعداد نقاط مسیر حرکت می‌باشد که به ترتیب بیانگر تعداد معادلات و تعداد مجهولات هستند. هدف از شبیه‌سازی فرایند پرداخت یافتن زمان‌های مکثی می‌باشد که خطای سطح را کاهش دهد. در معادله فوق سه حالت امکان رخ دادن دارد: 1- تعداد نقاط سطح از تعداد نقاط مسیر حرکت بیشتر باشد ( $n > k$ ) در این صورت تعداد معادلات از مجهولات ( $t_i$ ) بیشتر است. 2- تعداد نقاط سطح و مسیر برابر باشد ( $n = k$ ) 3- تعداد نقاط مسیر بیشتر از نقاط سطح باشد ( $n < k$ ). با توجه با بزرگ بودن ابعاد معادله فوق و اینکه ماتریس  $\beta$  معمولاً مربعی نیست، نمی‌توان از روش‌های معمول برای حل دستگاه معادلات فوق استفاده کرد. همچنین سه قید برای زمان مکث وجود دارد که در زیر آورده شده است.

1- زمان مکث نباید منفی باشد چرا که تعبیر فیزیکی ندارد

2- از آنجایی که سرعت پیشروی بی‌نهایت وجود ندارد و ماشین کنترل عددی، یک حداکثر سرعت پیشروی را می‌تواند اجرا کند، لذا زمان مکث صفر وجود نداشته و باید از مقدار کمترین زمان مکث ممکنه بیشتر باشد. اگر  $ds$  فاصله بین دو نقطه از مسیر باشد و  $Feed_{\max}$  بیش‌ترین سرعت پیشروی قابل اجرا در ماشین باشد، در این صورت کمترین زمان مکث ممکنه در معادله (17) آورده شده است.

1- Spiral

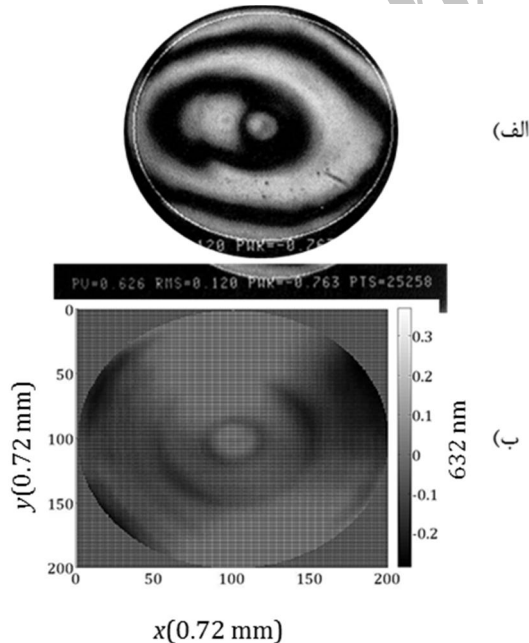
زمان‌های مکث محاسبه شده، با توجه به فواصل بین نقاط مسیر حرکت، به سرعت پیشروی تبدیل شده و سپس اطلاعات مسیر حرکت و سرعت پیشروی به کد تبدیل شده و به ماشین ارسال می‌شود. شکل 10 فرایند پرداخت را با استفاده از ابزار کروی ساخته شده بر روی ماشین کنترل عددی سه محوره نشان می‌دهد و شکل 11 ماتریس و فرایج‌های سطح را پس از عملیات پرداخت نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است، صافی سطح به  $0/626\lambda$  (395 نانومتر) برای PV و 75 (120/0 نانومتر) برای RMS رسید.

### 7- نتیجه‌گیری

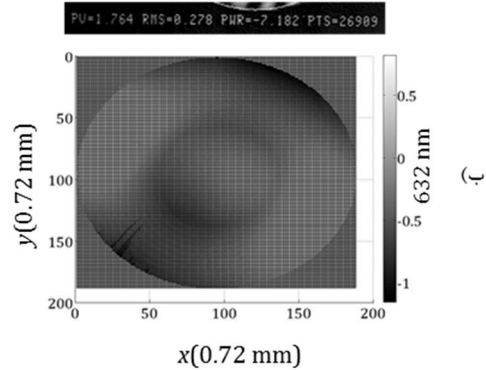
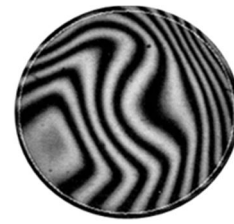
در این تحقیق ابزار جدیدی به منظور پرداخت سطوح اپتیکی ارائه شد. ابزار ارائه شده توانایی پرداخت سطوح را با استفاده از یک ماشین کنترل عددی سه محوره در ضمن حفظ کردن نیروی عمود به سطح دارد. نرخ براده‌برداری ابزار در حین حرکت بر روی سطح، به علت تغییر سرعت نسبی بین



شکل 10 فرایند پرداخت با ابزار کروی

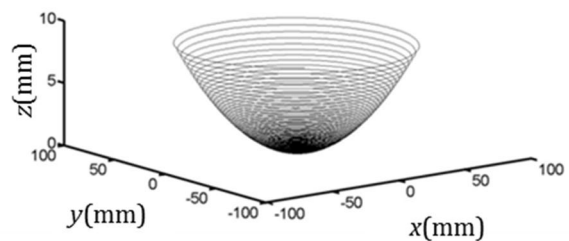


شکل 11 الف) فرایج‌های سطح بعد از پرداخت ب) ماتریس سطح بعد از پرداخت (با بزرگنمایی  $\frac{1}{0.72}$ )

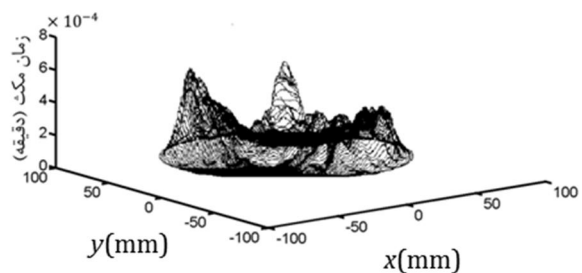


شکل 7 الف) فرایج‌های سطح اولیه ب) ماتریس اولیه سطح (با بزرگنمایی  $\frac{1}{0.72}$ )

شده و در لبه لنز خاتمه می‌یابد. شکل 8 نشان‌دهنده مسیر اسپیرال استفاده شده و شکل 9 زمان‌های مکث محاسبه شده در هر نقطه از مسیر حرکت را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های 7 ب و 9 مشاهده می‌شود که زمان مکث تقریباً منطبق به پروفایل اولیه سطح می‌باشد، به این معنی که در مناطقی که ارتفاع اولیه سطح زیاد می‌باشد زمان مکث در آن نواحی بیشتر شده و در مناطقی که ارتفاع سطح کم می‌باشد زمان مکث در آنجا کم می‌باشد و این باعث می‌شود که براده‌برداری از مناطق مرتفع تر به دلیل زمان مکث بیشتر و یا سرعت پیشروی کمتر ابزار در آن نواحی بیشتر شود.



شکل 8 مسیر حرکت ابزار



شکل 9 زمان‌های مکث اختصاص داده شده به نقاط مسیر حرکت ابزار

- visco-elastic effect, *Opt. Express*, Vol. 18, No. 3, pp. 2242–2257, 2010.
- [3] J. Hildebrand, K. Hecht, J. Blüedner, H. Müller, Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces, *Physics Procedia*, Vol. 12, pp. 452–461, 2011.
- [4] A. Bruce Shorey, *Mechanism of Material Removal in Magnetorheological Finishing (MRF) of Glass*, PhD Thesis, University of Rochester, Rochester, 2000.
- [5] T. Kuriyagawa, M. Saeki, K. Syoji, Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts, *Precision Engineering*, Vol. 26, pp. 370–380, 2002.
- [6] H. Susuki, Ultra-precision finishing of micro-aspheric surface by ultrasonic two-axis-vibration assisted polishing, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 59, pp. 347–350, 2002.
- [7] F. Zhang, H. Wang, J. Liu, D. Luan, Y. Zhang, Study on the Surface Quality of Optical Glass in Ultrasonic-Magnetorheological Compound Finishing, *Key Engineering Materials*, Vol. 389, pp. 181–186, 2008.
- [8] L. Allen, R. E. Keim, An ion figuring system for large optic fabrication, in *Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics*, in *Proceeding of SPIE* PP. 1168, 1989, 1989.
- [9] H. Amirabadi, M. Shakeri, O. Horiuchi, J. Imen, Mist-Abration Machining of Brittle Material and Its Application in Corrective Figuring of Optical Parts, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, 2008.
- [10] M. Schinhaerl, R. Rascher, R. Stamp, L. Smith, G. Smith, P. Sperber, E. Pitschke, Utilization of Time-Variant Influence Functions in the Computer Controlled Polishing, *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 47–64, 2008.
- [11] R. Aspden, R. McDonough, R. Nitchie, Computer assisted optical surfacing, *Applied Optics*, Vol. 11, No. 12, pp. 2739–2747, 1972.
- [12] R. Jones, Optimization of Computer Control polishing, *Applied Optics*, Vol. 16, No. 1, pp. 218–224, 1977.
- [13] R. Jones, Grinding and polishing with small tools under computer control, *Opt. Eng.*, Vol. 18, No. 4, pp. 1834–1837, 1979.
- [14] R. Jones, Computer controlled polishing of telescope mirror segments, *Opt. Eng.*, Vol. 22, pp. 236–240, 1983.
- [15] R. Koosha, *Modeling and Identification of the Computer Controlled Polishing Process for Optical Lenses*, Ms Thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 2014. (In Persian)
- [16] F. W. Pereston, The theory and design of plate glass polishing machine, *J. Soc. Glass Technol.*, Vol. 11, pp. 214–256, 1927.
- [17] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

ابزار و قطعه کار تغییر می‌کند که این تغییر وابسته به زاویه بین محور ابزار و بردار عمود به سطح قطعه کار می‌باشد. الگوی براده برداری ابزار که وابسته به زاویه درگیری آن با قطعه کار می‌باشد، با استفاده از معادله پرستون و توزیع تنش هرترزین مدل‌سازی شده و ثابت پرستون با استفاده از آزمایش به دست آمد. در کارهای گذشته تابع نرخ براده برداری، با ثابت نگه داشتن زاویه درگیری ابزار و قطعه کار در طول مسیر به منظور ثابت نگه داشتن سرعت نسبی، ثابت نگه داشته می‌شده است. این کار با استفاده از تجهیزات گران قیمت مانند ماشین‌های کنترل عددی پنج محوره انجام می‌شود. پس از مدل‌سازی تابع نرخ براده برداری ابزار، فرایند پرداخت توسط روش جدید ماتریسی شبیه‌سازی شد. در این روش شبیه‌سازی می‌توان نرخ براده برداری متغیر که وابسته به زاویه درگیری ابزار است را در حین فرایند پرداخت، اعمال کرد. سپس با استفاده از روش حل عددی زمان‌های مکث نقاط مختلف مسیر حرکت ابزار، به منظور کاهش خطای سطح PV محاسبه شد. در انتها به منظور بررسی عملکرد ابزار و همچنین بررسی توانایی روش هوشمند فوق در پرداخت لنزها، عملیات پرداخت در محیط واقعی انجام شد. لنزی مقعر با شعاع 320 میلی‌متر با استفاده از ماشین سه محوره پرداخت شد و پس از 90 دقیقه پرداخت صافی سطح از  $1/764\lambda$  (1/114 میکرومتر) برای PV و  $0/278\lambda$  (175 نانومتر) برای RMS به  $0/626\lambda$  (395 نانومتر) برای PV و  $0/120\lambda$  (75 نانومتر) برای RMS رسید. ( $\lambda$  طول موج لیزر هلیم-نئون و برابر 632 نانومتر می‌باشد) صافی سطح  $0/626\lambda$  برای PV معمولاً عددی مناسب در قطعات اپتیکی می‌باشد. نتایج حاکی از کاهش 70 درصدی خطای سطح می‌باشد که قابلیت روش جدید مورد استفاده در پرداخت را نشان می‌دهد.

## 8- مراجع

- [1] H. Burge, B. Anderson, S. Benjamin, M. Cho, K. Smith, M. Valente, Development of optimal grinding and polishing tools for aspheric surfaces, *SPIE*, Vol. 445, pp. 153–164, 2001.
- [2] D. W. Kim, J. H. Burge, Rigid conformal polishing tool using non-linear