تدوين يک سيستم CAM براي شبيه سازي فرآيند تصحيح پروفيل خطاي سطحي توسط ماشينکاري با جت سيال ساينده

حسين اميرآبادي، محسن شاکري، سيد عيسي وطن پور و محمد بخشي

دانشکده فني، مهندسي بابل،گروه مهندسي مکانيک، دانشگاه مازندران

چکيده

اين تحقيق با ايجاد يک نرم افزار CAM، روش ماشينکاري با جت سيال ساينده براي تبديل پروفيل خطاي اوليه موجود بر روي سطح به يک فرم ايده‌آل، شبيه سازي شده است. قطعه کار، يک عدسي نوري است که سطح آن پيش پرداخت شده است. پارامترهاي زيادي در فرآيند ماشينکاري با جت سيال ساينده دخالت دارند. در اين مقاله الگوريتمي جهت شبيه سازي فرآيند ماشينکاري با جت سيال ساينده با استفاده از يک پروفيل برش که در يک شرايط معين فرآيند بدست آمده، ارايه شده است. بر اساس الگوريتم تدوين شده، يک سيستم نرم افزاري CAM در محيط نرم افزار اتوکد، توسعه داده شده است. پروفيل خطاي اوليه و فرم ايده‌آل به شکل يک پلي‌لاين در محيط اتوکد ترسيم مي‌شود. با شبيه سازي فرآيند با استفاده از سيستم تدوين شده ملاحظه شده که مي‌توان مقادير مطلوب پارامترهاي فرآيند را در زمان کمتر بدون صرف هزينه اضافي آزمايشات بدست آورد. الگوريتم تدوين شده براي يک خطاي سينوسي اجرا و نتايج آن با آزمايشات واقعي، مقايسه گرديد. بر اين اساس، يک خطاي سينوسي معادل ۱۹۰ نانومتر، اصلاح و به ۳۵ نانومتر تقليل يافت.

واژه هاي کليدي: ماشينکاري با جت سيال ساينده، شکل دهي اصلاحي، عدسي، کنترل عددي، اپتيک

Design of a CAM system for simulation of surface error profile correction process by abrasive water jet machining (AWM)

H. Amirabadi, M. shakeri, S. E. Vatanpoor and M. Bakhshi

Department of Mechanic Engineering, Mazandaran University

Abstract- A simulation method for abrasive water jet machining is presented in this work in order to convert the initial error profile existing on the surface to an ideal form by a CAM system. The work piece is an optical glass with a pre-polished surface. Several parameters are effective in abrasive water jet machining. In this paper, an algorithm for simulation of abrasive water jet machining process is developed with a removal spot profile obtained in a specific qualification of process parameter. According to the developed algorithm, a CAM system was developed in Auto CAD environment. Optimum values of the process parameters are predicted by the developed simulation CAM system and resulting in time-saving and economical real experimental method. This algorithm was applied for a sinusoidal error and their result was compared with experimental results. Base on the result, a sinusoidal error equal to 190 nm, was corrected and reduced to 35 nm by the parameter values predicted by the simulation CAM system.

Keywords*: Abrasive water jet machining, Corrective figuring, glass, Numerical control, Optic*

Archive of SID

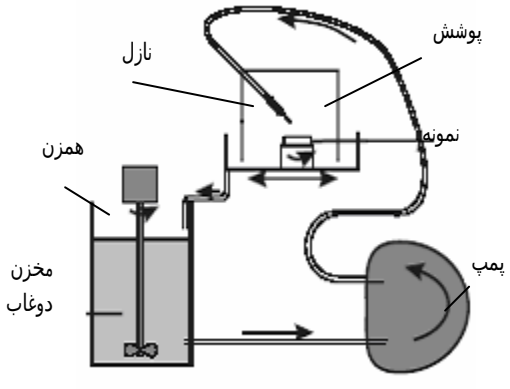
www.SID.ir

مقدمه

به تازگي پیشرفت‌هاي زیادي در ماشینکاري بسیار دقیق Ultra precision بدست آمده است. فرآیند ماشینکاري که در آن خطاي نهایي حاصله روي سطح قطعه، فقط چند نانومتر خواهد بود. عدسي‌ها از جمله قطعاتي هستند که امروزه در صنایع گوناگوني از آنها استفاده مي‌شود. با توجه به اینکه همواره تلاش براین است که کیفیت تصاویر دریافتي از عدسي‌ها، روز به روز بهتر شود، لذا استفاده از روشهاي ماشینکاري موثر و طراحي تکنیک‌هایي که این خواسته را برآورده کند، ضروري به نظر مي‌رسد. یکي از روش‌هاي موجود، روش ماشینکاري با جت سیال ساینده (AWM) مي‌باشد. این روش یک روش Sub Aperture است یعني مي‌تواند به شکل موضعي از روي سطح قطعه کار برداشت انجام دهد. در این روش، ذرات موجود در آب، تحت فشار بالایي از یك نازل خارج شده و با سرعت زیادي به سطح قطعه کار اصابت مي‌کند (شکل۱). در این روش، پارامترهاي مختلفي دخالت دارندکه بخاطر وسعت مطالب از ذکر آنها در این مقاله خودداري مي‌کنیم [۱و۲و۳و۴و۵و۷].

با مراجعه به آزمایشات انجام شده توسط فیني و شلدون اگر انرژي برخورد ضعیف باشد و زاویه برخورد نیز اندك، نرخ سایش به چند نانومتر در دقیقه تقلیل خواهد یافت [۶].

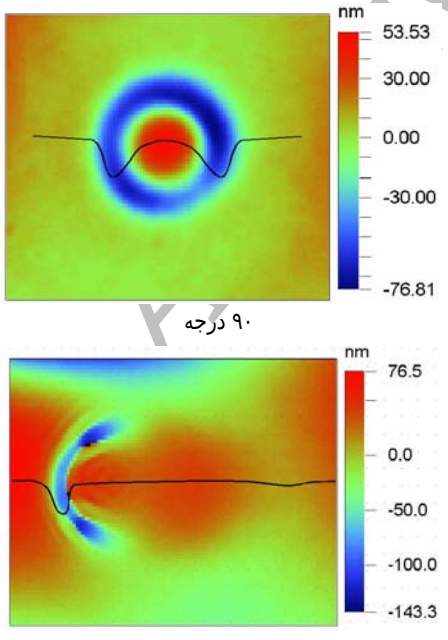
با فرض ثابت بودن بعضي از پارامترها، با انجام آزمایشات به شکل عملي مي‌توان اثر پارامترهاي دیگر را روي فرآیند بدست آورد. اما این کار مستلزم هزینه و اتلاف زمان زیادي است، لذا یک شبیه سازي کامپیوتري مي‌تواند براي پیش بیني مقادیر مطلوب پارامترهاي فرآیند، مفید باشد و از هزینه‌هاي اضافي آزمایش‌ها بکاهد.



شکل(۱): تجهیزات **AWM** [۱]

روش کار

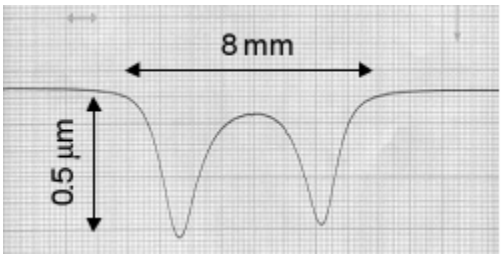
در فرآیند AWM، چنانچه زاویه نازل نسبت به سطح قطعه کار به ترتیب °۴۵و °۹۰ باشد پروفیل عمقي نقطه برداشت مطابق شکل (۲) خواهد بود [۱]. هوریچي، فرآیند AWM را تحت زاویه نازل °۹۰ به اجرا درآورد و یک پروفیل متقارن W شکل را براي عملیات تصحیح توسط ماشینکاري با جت سیال ساینده بدست آورد (شکل(۳))[۸].



شکل(۲): پروفیل عمقي نقطه برداشت تحت زواياي نازل °۴۵و °۹۰ [۱]

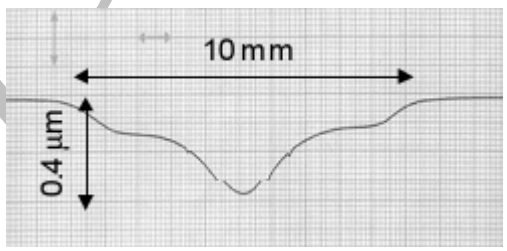
Archive of SID

www.SID.ir



شکل(۳): پروفیل **W** شکل [۸]

براي برداشت موضعي در شکل‌دهي اصلاحي Corrective figuring یک نقطه برداشت دایروي و متقارن و V شکل، به‌واسطه مدل سازي آسان‌تر، مناسب‌تر است.



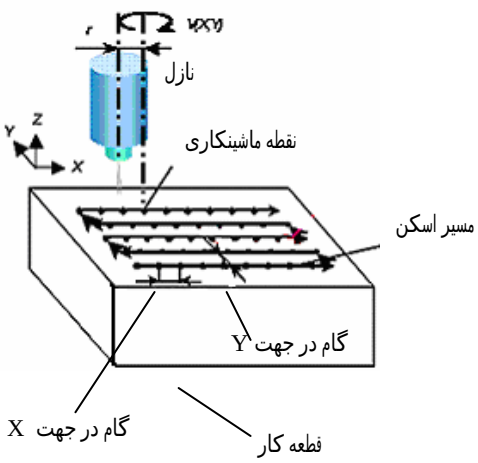
شکل(۴) : پروفیل **V** شکل [۸]

هوریچي با حرکت دایروي نازل پاشش در ماشینکاري با جت سیال ساینده موفق به ایجاد این پروفیل V شکل شد(شکل(۴)) [۸]. بدین صورت که نازل پاشش را در حالیکه سیال ساینده با فشار به سیستم تغذیه مي‌شد با شعاع ۱ *mm* حول یک نقطه ثابت، دوران داد.

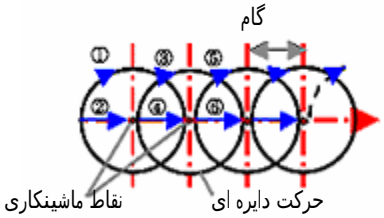
بعد از بدست آوردن پروفیل V شکل مطلوب، هوریچي مسیر حرکت نازل (نقاط اسکن) را روي سطح قطعه کار بسط داد و روشي براي اصلاح سطح پیشنهاد کرد (شکل۵).

وي با استفاده از این تکنیک، سرعت‌هاي مختلف حرکت دوراني نازل در نقاط مختلف اسکن را از طریق شبیه‌سازي، بدست آورد و عملاً بکار گرفت. به این ترتیب، او یک فرم خطاي محدب را از روي قطعه کار تخت (از جنس BK7) برداشت.

در این تحقیق، الگوریتمي طراحي شده که به واسطه



شکل(۵) : نقاط اسکن وحرکت دایره اي نازل [۸]



ادامه شکل(۵): نقاط اسکن وحرکات دایره اي [۸]

آن شرایط بهینه براي اصلاح سطح حاصل مي‌گردد. سطح داراي یک فرم خطاي دلخواه به شکل موضعي است و هدف، تبدیل این فرم خطا به یک فرم ایده‌آل مي‌باشد. در طراحي الگوریتم، فرض کردیم که این فرم خطا و فرم ایده‌آل، داراي تقارن محوري است، لذا مسأله را به‌شکل دوبعدي در نظر گرفتیم.

سرعت بهینه حرکت دوراني نازل حول هر نقطه اسکن و محاسبه و نمایش خطاي نهایي حاصله، هدف اصلي این شبیه سازي مي‌باشد. در این روش فرم ایده‌آل، با دقت نسبتاً بالایي حاصل مي‌شود.

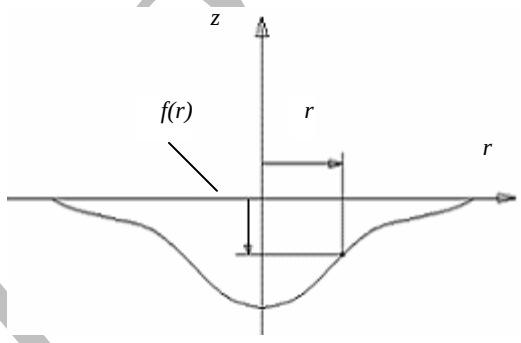
طراحي الگوریتم

با توجه به آزمایشات تجربي انجام شده در یک شرایط فرآیند معین، پروفیل عمقي نقطه برداشت V شکل بدست آمده است. این پروفیل برش را به عنوان پروفیل برش

Archive of SID

www.SID.ir

استاندارد در نظر گرفتیم که توسط حرکت نسبي دایره‌اي نازل و قطعه کار حاصل شده است. براي شبیه‌سازي عملیات، از یک تابع درجه بالا استفاده مي‌کنیم. وسط پروفیل را مبدا مختصات و محور افقي را فاصله نسبت به مرکز پروفیل(r) و محور قائم را عمق نقاط ($Z=f(r)$) در نظر گرفتیم (مطابق شکل۶).



شکل(۶) : پروفیل استاندارد اولیه ونحوه استعمال آن

از نکات اساسي در مدل سازي این فرآیند، ارتباط معکوس عمق نقطه برداشت با سرعت حرکت نازل در آن نقطه است. به عبارت دیگر با افزایش سرعت حرکت نازل، عمق نقطة برداشت کاهش مي‌یابد و بالعکس. پس مي‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$f_{v_i}(r_0)\times v_i = f_{\bar{v}}(r_0)\times \bar{v} \qquad (۱)$$

بطوري که $\bar{v}$، سرعت حرکت دایره اي، r_0 فاصله نسبت به مرکز در پروفیل استاندارد است.

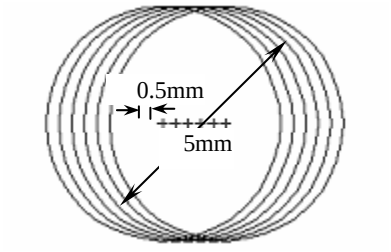
در این صورت خواهیم داشت:

$$f_{v_i}(r_0) = \frac{\bar{v}}{v_i} f_{\bar{v}}(r_0) \qquad (۲)$$

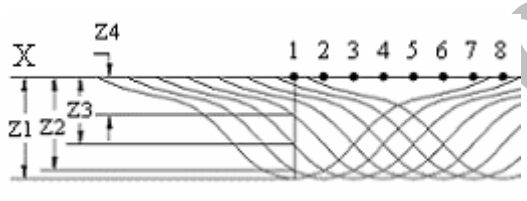
در این رابطه $\bar{v}$ و $f_{\bar{v}}(r_0)$ به ترتیب سرعت استاندارد و عمق استاندارد در نقطة r_0 است. و v_i سرعت اعمالي در نقطه اسکن i ام مي‌باشد. سرعت استاندارد همان سرعتي است که طبق آن پروفیل نقطه برداشت استاندارد ایجاد شده است.

با توجه به اینکه شعاع منطقه برداشت در هر نقطه، $5mm$ و گام در محدودة mm ۰/۵ است تداخل نقاط برداشت را شاهد خواهیم بود. (شکل ۷).

شکل (۸) نشان مي‌دهد که در این فرآیند از نقطة فرضي۱ در یک ردیف از نقاط اسکن در امتداد X ها چندین بار برداشت صورت مي‌گیرد.



شکل(۷) : تداخل نقاط در عملیات برداشت



شکل(۸): برداشت مکرر ناشي از عملیات اسکن در نقاط همسایگي

نقاط ۱، ۲، ۳ و ... نقاط اسکن نام دارند و مرکز نازل در این نقاط قرار گرفته و برداشت صورت مي‌دهد. برداشت از طریق نقاط همسایگي تا زماني ادامه دارد که فاصله آن نقطه تا نقطه مورد نظر، کمتر از شعاع پروفیل نقطه برداشت باشد. پس مي‌توان گفت که مقدار برداشت در نقطه ۱ برابر است با مقدار برداشت ناشي از برداشت نازل از نقطه ۱ به علاوه مقدار برداشت ناشي از برداشت در نقطة ۲ به علاوه مقدار برداشت ناشي از برداشت در نقطه ۳ و ... . به عبارت دیگر:

$$R = \sqrt{(i-i_0)^2 + (j-j_0)^2} \times a$$

کل در نقطه ۱ $Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \ldots$

Archive of SID

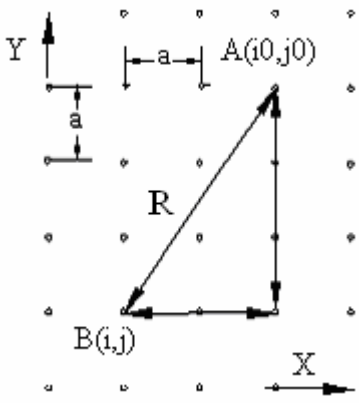
www.SID.ir

$$= \frac{\bar{v}}{v_1} f_{\bar{v}}(0) + \frac{\bar{v}}{v_2} f_{\bar{v}}(a) + \frac{\bar{v}}{v_3} f_{\bar{v}}(2a) + \frac{\bar{v}}{v_4} f_{\bar{v}}(3a) + \ldots$$

$$= \sum_{i=0}^{n} \frac{\bar{v}}{v_{i+1}} f_{\bar{v}}(ia) \qquad (۳)$$

که در آن a گام (فاصله بین هردو نقطه اسکن متوالي) و n نسبت شعاع منطقه برداشت در هر نقطه به گام است.

با توجه به شکل (۵) ملاحظه مي‌شود که نقاط برداشت روي یک (سطح) انتشار مي‌یابد، لذا با در نظر گرفتن اثرات همسایگي در جهت Y، مقدار عمق برداشت در نقطه فرضي $A(i_0, j_0)$ را بر اساس شکل (۹) مي‌توان محاسبه کرد.



شکل(۹): تأثیر اثرات همسایگي در جهت *x,y*

بر این اساس، مقدار عمق برداشت در نقطه فرضي $A(i_0, j_0)$ را مي‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$Z \text{ کل در نقطه } A = \sum_i \sum_j \frac{\bar{v}}{v_{i,j}} f_{\bar{v}}(R) \qquad (۴)$$

که در آن:

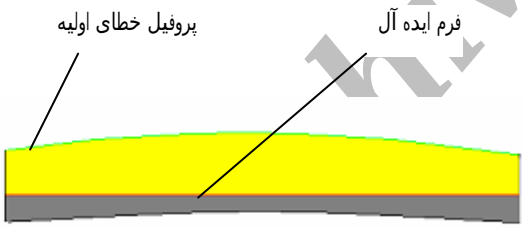
$$R = \sqrt{(i-i_0)^2 + (j-j_0)^2} \times a$$

با فرض ثابت بودن سرعت حرکت دایره‌اي نازل در تمام نقاط خواهیم داشت:

$$Z \text{ کل در نقطه } A = \frac{\bar{v}}{v_{new}} \sum_i \sum_j f_{\bar{v}}(R) \qquad (۵)$$

که در آن v_{new} سرعت جدید در تمام نقاط است. v_{new} را مي‌توان با قرار دادن معادلة اخیر در داخل یك حلقه در برنامه بدست آورد. حلقه بکار گرفته شده، یك حلقه معکوس بین صفر تا ۴۰۰ میلیمتر بر دقیقه با گام ۰/۱ مي‌باشد زیرا محدودة سرعت روي دستگاه *mm/min* ۰-۴۰۰ است.

در درون حلقه با در نظر گرفتن یك گام مشخص، نقاط روي پروفیل خطاي اولیه خوانده شده (شکل۱۰) و طبق رابطه (۳)، مقدار ارتفاع (Z) براي هر نقطه با توجه به v_{i+1} معین شده درون حلقه، محاسبه مي‌گردد.

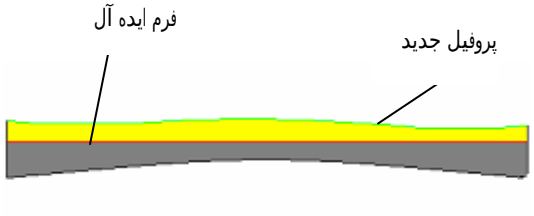


شکل(۱۰) : پروفیل خطاي اولیه سطح و فرم ایده آل

با محاسبه فواصل نقاط روي پروفیل جدید و نقاط متناظر آن روي فرم ایده آل، چنانچه حداقل فاصله، صفر شود مي‌توان سرعت جاري را به عنوان سرعت جدید (v_{new}) انتخاب کرد. با اعمال v_{new} و محاسبه ارتفاع جدید هر نقطه از پروفیل خطاي اولیه و عبور یك خط از هر دو نقطه متوالي، مي‌توان پروفیل جدید را ترسیم نمود (شکل۱۱).

Archive of SID

www.SID.ir

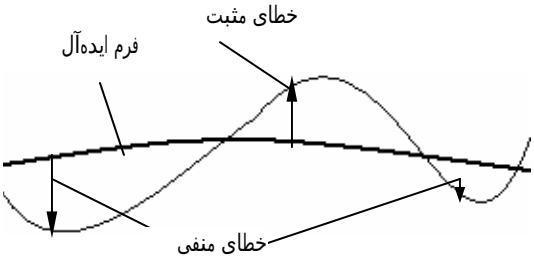


شکل(۱۱) : پروفیل جدید ایجاد شده

با بدست آوردن این سرعت، عمده عملیات، انجام شده و در مرحله بعد نقاطي که بیشترین فاصله را نسبت به فرم ایده‌آل دارند در سمت بالاي فرم ایده‌آل (خطاهاي مثبت) کشف و اصلاح مي‌گردد. به این صورت که اثر سرعت جدید (v_{new}) روي آن نقاط حذف شده و با کاهش سرعت پیشروي در این نقاط به سرعت مطلوب نایل مي‌شویم. با مشاهده عیني دقت حاصله مي‌توان تعداد نقاط مورد اصلاح و سرعت حرکت نازل (سرعت بهینه) را در این نقاط بدست آورد.

در پایان، با انتخاب نقاطي در زیر فرم ایده‌آل روي پروفیل جدید که بیشترین فاصله را نسبت به فرم ایده‌ال دارند (خطاهاي منفي) و حذف اثر سرعت جدید (v_{new}) و افزایش سرعت در این نقاط، مي‌توان به پروفیل نهایي با دقت بالایي دست یافت (شکل۱۲). فلوچارت الگوریتم طراحي شده در شکل (۱۳) و همچنین واسط اصلي برنامه تدوین شده در شکل (۱۴) مشاهده مي‌شود.

در پایان مي‌توان با فشردن آیکن Gcode، کد NC



شکل(۱۲) : خطاهاي مثبت و منفي

لازم براي تصحیح سطح مورد نظر را تولید کرد. نمونه‌اي از شبیه‌سازي انجام شده به شکل سه بعدي در شکل (۱۵) مشاهده مي‌گردد.

یافته‌ها

الگوریتم تدوین شده براي یک خطاي سینوسي اجرا و نتایج آن با آزمایشات واقعي، مقایسه گردید. هوریچي [۸] یک خطاي سینوسي را که در سطح یک عدسي تخت وجود داشت، بطور موضعي اصلاح و تلاش کرد که آن را به صفر برساند. وي یک خطاي سینوسي معادل ۱۸۵ نانومتر را ماشینکاري و به حدود ۲۵ نانومتر رسانده است.

پروفیل خطاي اولیه این نمونه (پروفیل قبل از ماشینکاري)، توسط سیستمي که تدوین کرده‌ایم، آزمایش شد. بر اساس این آزمایش، خطاي حاضر به ۳۵ نانومتر رسید که دقت بسیار بالایي را نشان مي‌دهد. در شکل (۱۶)، مقایسه‌اي بین نتیجه کار آزمایشگاهي هوریچي و شبیه سازي صورت گرفته توسط الگوریتم تدوین شده این پروژه، ارایه شده است.

در نمودار شکل (۱۶)، اختلاف اندکي بین منحني حاصل از شبیه سازي و منحني حاصل از آزمایش عملي، مشاهده مي‌شود. علت این امر سه مورد زیر است:

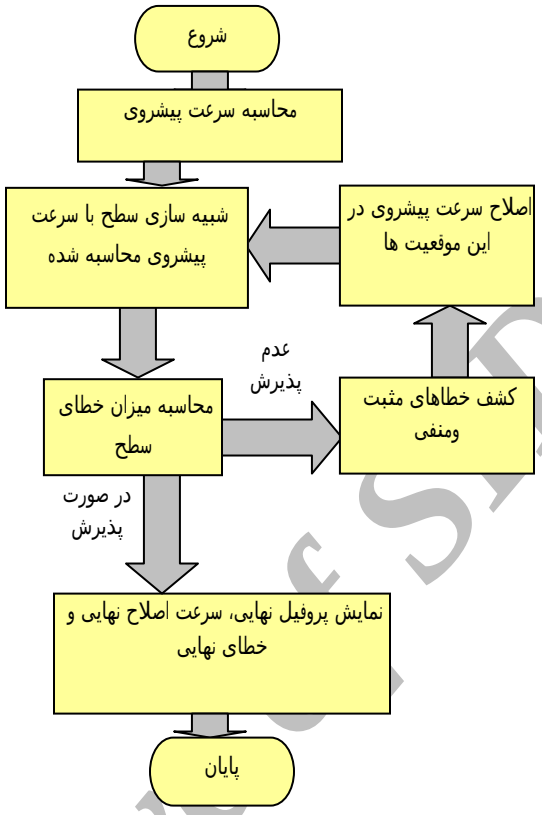
۱- چند جمله اي مرتبه بالاي تخمین زده شده براي محاسبه وشبیه سازي، دقیق نیست (در این تحقیق از یک چند جمله اي درجه هشت استفاده شده است).

۲- در شبیه سازي، در حرکت نازل پاشش از یک نقطه اسکن به نقطه مجاورش، هیچگونه برداشتي محاسبه نشده است در حالیکه عملاً برداشت صورت مي‌گیرد.

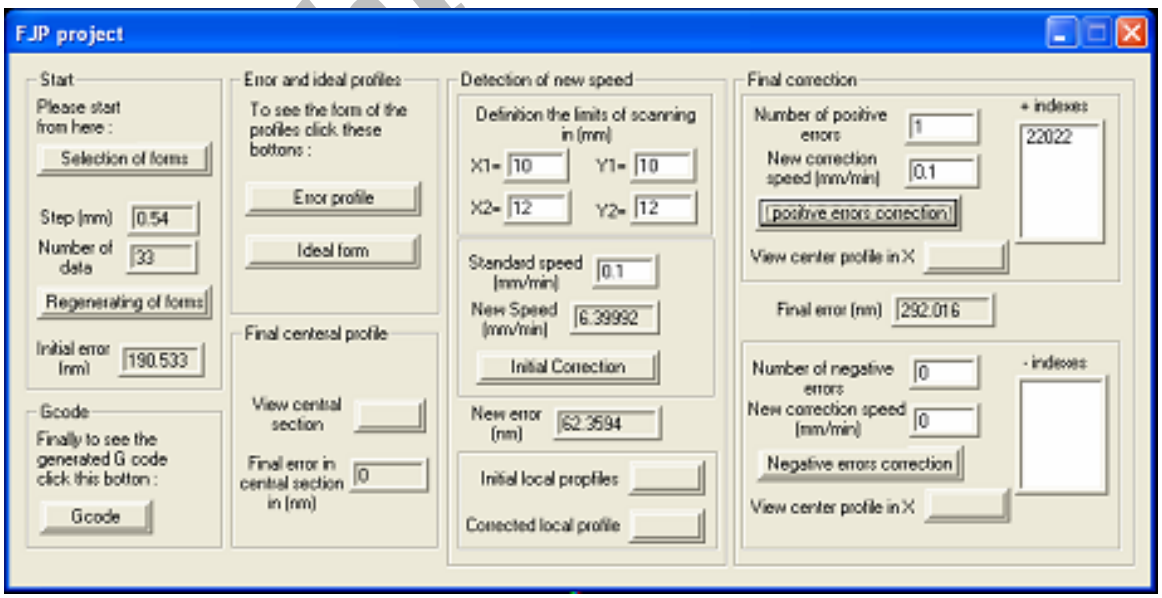
۳- کاهش درجه خلوص سیال ساینده در ضمن عملیات نیز

Archive of SID

www.SID.ir

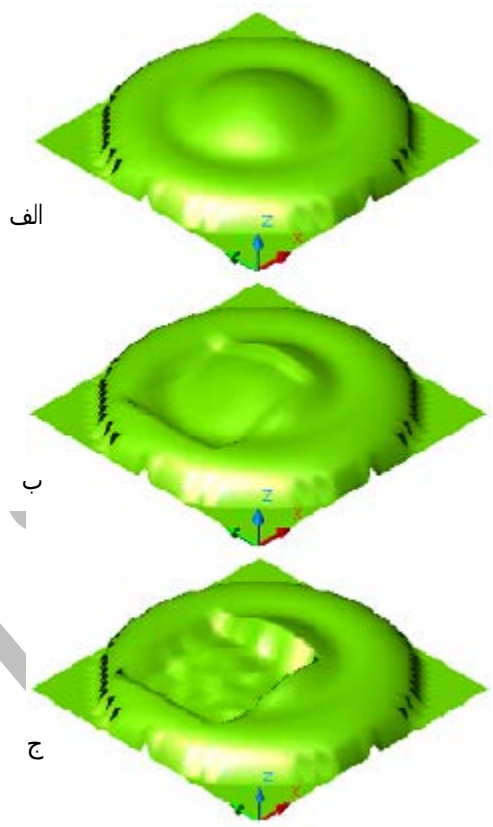


شکل(۱۳) : فلوچارت الگوریتم تدوین شده



شکل(۱۴) : واسط اصلي برنامه تدوین شده

www.SID.ir



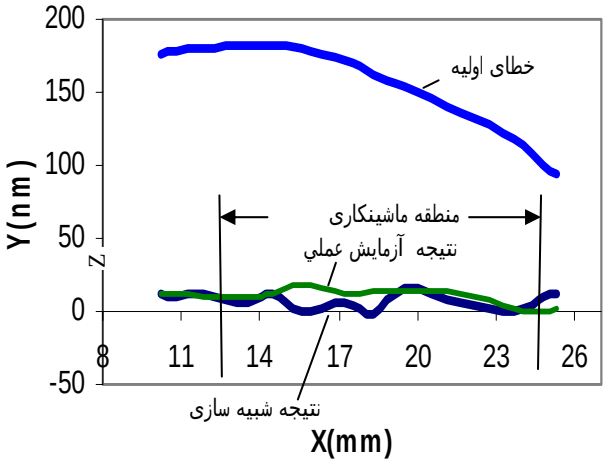
شكل(١٥): الف) پروفيل خطاي اوليه ب)اصلاح اوليه خطا ج)اصلاح نهايي خطا

نتيجه‌گيري

روش ماشينكاري با جت سيال ساينده (AWM)، به سبب انعطاف‌پذيري بالا و مزاياي زيادي كه دارد، براي صيقل كاري به شكل موضعي و ايجاد پروفيل هاي سطحي مرتبه بالا مناسب مي‌باشد، لذا در اين تحقيق از روش مذكور براي صيقل‌كاري وتصحيح پروفيل خطاي سطحي موجود روي سطح قطعه كار به شكل موضعي استفاده شده است. در اين تحقيق، الگوريتمي بر اساس يک آزمايش واقعي طراحي شده و نشان مي‌دهد كه روش شبيه سازي با دقت بسيار بالايي قادر به پيش بيني عمق برش در عمل خواهد بود و همچنين در تعيين شرايط بهينه فرآيند بسيار موثر است. توسط الگوريتم طراحي شده، مي‌توان سرعت حركت دوراني نازل را در نقاط مختلف اسكن بدست آورده و به اين ترتيب يک پروفيل خطاي دلخواه را با دقت نسبتاً بالايي به يک فرم ايده‌آل تبديل كرد. قطعاتي كه در اين تحقيق از آنها استفاده مي‌شود قطعاتي هستند كه سطح آنها قبلا تا دقت نسبتاً بالايي، صيقل‌كاري شده است. تلاش كرديم كه فرم خطاي اوليه موجود روي سطح قطعه (در اينجا يک عدسي تخت نوري) را به شكل موضعي تصحيح و بر فرم ايده آل منطبق كنيم. فرم ايده‌آل هر شكلي را مي‌تواند داشته باشد.

تخمين‌هاي مختلف نشان داده كه اگر فرم اوليه بسيار ناموزون باشد، دقت بسيار بالايي بدست نخواهد آمد. درضمن ملاحظه شده كه فرم نهايي حاصل شده بعد از عمليات تصحيح، بر فرم ايده‌آل كاملاً منطبق نمي‌شود. علت آن اين است كه عمليات برداشت مختص يک نقطه نيست بلكه نقاط همسايگي را نيز شامل مي‌شود.

نتيجه ديگر اين كه در مرحله نهايي تصحيح، در



شكل(١۶) : مقايسه منحني تجربي و شبيه سازي

Archive of SID

www.SID.ir

تصحیح خطاهاي مثبت، هر چه تعداد قله‌هاي بیشتري انتخاب شود و سرعت حرکت نازل در این نقاط نیز بیشتر شود، خطاي حاصله کمتر خواهد شد. اما در تصحیح خطاهاي منفي، این امر صدق نمي‌کند و باید تعداد نقاط و سرعت آنها را جستجو کرد زیرا چنانچه سرعت افزایش پیدا کند ارتفاع قله هاي بالايي افزایش پیدا کرده در نتیجه احتمال افزایش خطا وجود خواهد داشت.

مراجع

1. Silvia Maria BOOIJ, *Fluid jet polishing*, Netherlands (2003).
2. I. Finnie, *Erosion of surfaces by solid particles, Wear, 3(1960)87-103.*
3. John C. Lambropoulos, Su Xu and Tong Fang, *Loose abrasive lapping hardness of optical glasses and its interpretation*, Appl.Opt, 36(1997)1501-1516.
4. J. B. Zu, G. T. Burstein and Hutchings, *A comparative study of the slurry erosion and free-fall particle erosion of aluminum*, Wear, 149(1991)73-84.
5. T. G. Bifano, T. A. Dow and R. O. Scattergood, *ductile regime grinding: a new technology for machining brittle materials*, J. of Eng. for Ind., Trans, 113(1991)184-189.
6. M. Buijs and K. Korpel-van Houten, *A model for lapping of glass*, J. of Mat Sci., 28(1993)3014-3020.
7. G. L. Sheldon and I. Finnie, *On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting*, Transactions of the ASME, J. Of Eng. For Ind., (1966)387-392.
8. Osamu Horiuchi, Shuji Yamaguchi, Akihiro Suyama, Hideo Shibutani and Hirofumi Suzuki, *Corrective figuring of optical glass by Nano-Abrasion Machining* , Toyohashi university of technology, Japan(2003).

Archive of SID

www.SID.ir