

اندازه گیری میدان کرنش و نرخ کرنش در حین ماشین کاری بر پایه روش همربطی تصاویر

داوود کریمی ، محمد مهدی ملکیان

استادیار، پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، تهران * تهران، صندوق پستی d_karimi@irost.ir ،33535111

چکیدہ

کرنش و نرخ کرنش از موثرترین پارامترهای فرآیند ماشین کاری به شمار میروند که تاثیر مسقیم بر رفتار ماده در حین شکل گیری براده دارند. مطالعه تشکیل براده، بررسی رفتار ماده حین ماشین-کاری در نواحی مختلف برش، توسعه مدلهای تحلیلی و شناخت صحیح فرآیند ماشین کاری وابسته به اندازه گیری کرنش و نرخ کرنش است. از جمله پارامترهایی از رفتار ماده که به شدت تحت تاثیر کرنش و نرخ کرنش قرار دارد تنش سیلان است که از آزمون میله اسپلیت هاپکینسون به دست میآید. نشان داده شده است که داده های به دست آمده از این آزمون، نتایج دقیقی برای فرآیند ماشین کاری به دست نمیدهد چرا که دامنه کرنش و نرخ کرنش در این آزمون نسبت به موارد مشابه در ماشین کاری با سرعتهای مرسوم قابل قیاس نیست. این امر لزوم ایجاد تجهیزات آزمونی را گوشزد می کند که توسط آن بتوان کرنش و نرخ کرنش در این آزمون نسبت به موارد مشابه در ماشین کاری با سرعتهای مرسوم قابل قیاس نیست. این امر لزوم ایجاد تجهیزات آزمونی را گوشزد می کند که توسط آن بتوان کرنش و نرخ کرنش در این آزمون نسبت به موارد مشابه در ماشین کاری با سرعتهای مرسوم قابل قیاس نیست. این امر لزوم ایجاد تجهیزات آزمونی را گوشزد می کند که توسط آن بتوان کرنش و نرخ کرنش در این آزمون نسبت به موارد مثابه در ماشین کاری با سرعتهای مرسوم برای محاسبه کرنش و نرخ کرنش، مانند نصب سنسورهای مرش سنج، در حین فرآیند ماشین کاری میسر نمی باشد. در این تحقیق روش اندازه گیری کرنش و نرخ کرنش بر پایه روش هم ربطی تصاویر حین فرآیند ماشین کاری ارائه شده است، که به کمک آن می توان به مطالعه رفتار ماده حین ماشین کاری پرداخت.

كليد واژگان: روش حساسيت گسسته، روش متغير مختلط، روش نيمه تحليلي، روش هاي آناليز حساسيت

In-situ measurement of strain and strain rate during machining based on image correlation analysis

Davoud Karimi*, Mohammad Mehdi Malekian

Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran * P.O.B. 33535111, Tehran, Iran, d_karimi@irost.ir

ABSTRACT

Strain and strain rate are two of the most important parameters of machining. They directly affect the material behavior during chip formation. The study of chip formation, consideration of material behavior in different shear zones during machining, developing analytical models and understanding the process is highly dependent on the measurement of strain and strain rate. Flow stress, as an instance of material behavior, is the function of strain and strain rate. Flow stress is measured using Split Hopkinson bar test. It is shown that the data obtained using this test cannot be accurately employed for machining simulations as the strain and strain rate ranges are far different during machining. This fact indicates the necessity of developing a test set-up by which direct measurement of strain and strain rate during machining is possible. In this paper, a non-contact method based on image correlation analysis is employed to directly measure the strain and strain rate during the machining process, by means of which the material behavior could be more accurately studied. *Keywords:* Image Correlation, Machining, Strain, Strain Rate.

1- مقدمه

در فرآیند ماشین کاری، کرنش و نرخ کرنش مقادیر بزرگی به خود اختصاص میدهند. اندازه گیری این مقادیر و دستیابی به اطلاعاتی که حاوی این دو کمیت باشد، به منظور شبیه سازی المان محدود، مدل سازی پدیده های مرتبط با این فرآیند مانند تشکیل براده و پیش بینی نیرو، سایش ابزار، دما و غیره لازم و ضروری است. از طرفی دقت ماشین کاری، کیفیت سطح، عمر ابزار، و تنش های پسماند ارتباط نزدیکی با متغیرهای ماشین کاری دارد و برای بهینه سازی این فرآیند لازم است اطلاعات دقیقی از پارامترهایی نظیر کرنش و نرخ کرنش در اختیار باشد [1]. برای به دست آوردن داده های کمی از میدان کرنش، نرخ آن و دما در نواحی تغییر شکل اولیه، ثانویه، و ثالثیه¹، که در

این مدلها تنها از طریق دادههای ماکروسکوپی مانند نیروی برشی، مرفولوژی
براده و طول درگیری ابزار و براده مورد ارزیابی قرار گرفته و اعتبار سنجی
میشوند. به سبب دشواری در اندازه گیری در حین انجام آزمایش های ماشین-
کاری جزئیات کافی در خصوص رفتار ماده در ناحیه برشی بهصورت منطقهای
در دسترس نیست. این درحالی است که کرنش، نرخ کرنش، و دما از عواملی
هستند که موجب تغییر در رفتار و خواص مکانیکی مواد به صورت موضعی در
ناحیههای تغییر شکل و شکل گیری براده میشود. به همین دلیل است که
استفاده از دادههای آزمونهای استاندارد مانند کشش و غیره معتبر نمیباشد.

1. Primary, secondary and tertiary deformation zones

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

D. Karimi, M. M. Malekian, In-situ measurement of strain and strain rate during machining based on image correlation analysis, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings* of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 526-530, 2015 (in Persian فارسى)

اندازه گیری مستقیم کمیتهای مرتبط با میدان تغییر شکل'، مانند سرعت سیلان ماده²، کرنش و نرخ کرنش عمدتا به کمک دستگاه توقف سريع³ انجام شده است. ايده اصلي، بيرون كشيدن و دور كردن سريع ابزار از قطعه کار در حین ماشین کاری [7] و یا شتاب دادن به قطعه کار برای جدا كردن آن از ابزار است [8] كه اين كار اصطلاحا موجب منجمد شدن فرآيند شده و می توان از ناحیه تغییر شکل یافته در مقابل ابزار به منظور انجام اندازه گیری میدان تغییر شکل و کرنش استفاده کرد. کوماندوری و براون [9] به مطالعه مکانیک شکست براده در حین ماشین کاری یک فولاد پرلیتی-فریفی با استفاده از دستگاه توقف سریع پرداختند. جاسبر و داتزنبرگ [7] با استفاده از روش به دست آوردن کرنش برشی که در [10] ارائه شده است، کرنش ناحیه تغییر شکل اولیه را پیشبینی کردند. روش دیگری که برای تقریب کرنش بکار رفته است، استفاده از شبکهبندی ماده روی سطح قطعه کار با سایش مکانیکی [11]، سایش شیمیایی یا روش اچینگ [12] است. سرعت و مقادیر کرنش از طریق بهمریختگی میکروشبکهها تخمینزده میشوند. تکنیکی توسط چادهیری [13] بر پایه تغییرات به هم ریختگی شبکه ارائه شد که می توان از آن برای تحلیل ماشین کاری استفاده کرد. او از شبکه دانه بندی فلز پایه استفاده کرد و از تغییر شکل آن بهمنظور اندازه گیری و تخمین کرنش استفاده کرد. اشکال عمده دستگاه توقف سریع مدت زمانی است که لازم است ابزار و قطعه از هم جدا شوند و نیز جدا شدن آنها ممکن است تغییراتی در ناحیه تغییر شکل براده ایجاد کند. روش جایگزین برای دستگاه توقف سريع استفاده از دوربينهاى سرعت بالا است. عملكرد مناسب اين دوربين ها از حيث فركانس دادهبرداري، زمان بازبودن لنز، رزولوشن تصوير، و نسبت سیگنال به نویز در آنها امکان استفاده از این ابزار را در کاربردهایی مانند اندازه گیری کرنش در فرآیند ماشین کاری فرآهم کرده است. پوجانا و همکاران او [12] از این روش برای تحلیل قطعه ای فولادی که شبکهای مربعی روی آن اعمال شده بود استفاده کردند. آنها موفق شدند فرآیند را تا سرعت برشی 300 متر بر دقیقه تحلیل کرده و کرنش و نرخ آن را اندازه-گیری کنند. لیست و همکاران او [14] روشی ارائه کردند که در آن خطوط جریان جایگزین شبکه در روش قبلی شده است. آنها چهار خط به موازات سرعت برشی روی وجه قطعه به روش خراش مکانیکی ایجاد کردند و سرعت، کرنش و نرخ کرنش را به کمک آنها اندازه گیری نمودند. روشهای اشاره شده بر پایه تحلیل الگوی تغییر شکل شبکه استوار میباشند. در کنار این دسته از روشها، روشهای دیگری بر پایه پردازش تصاویر دیجیتال ارائه شده که کاربرد آنها در تحلیل کرنش ناحیه تغییر شکل براده بسیار موثر و کارآمد گزارش شده است. این روشها شامل روش سرعتسنجی تصویر ذره ⁴، سرعت سنجى تعقيب ذره⁵، و روش همربطى تصاوير ديجيتال⁶ مىشوند كه نسبت به روشهای قبلی دقیقتر و قابل اعتمادتر است. گنانامانیکام و همکاران او [15] از تلفیق روشهای سرعتسنجی تصویر ذره و سرعتسنجی تعقیب ذره برای اندازه گیری میدان تغییر شکل در فرآیندهای با کرنش زیاد مانند ماشین کاری استفاده کردند. پوتیر و همکاران او [16] از روش همربطی تصاویر دیجیتال برای اندازه گیری کرنش ها با قابلیت تفکیک کمتر از میلی متر استفاده کردند. در این روش با استفاده از تابع همربطی که از اختلاف شدت نور ثبت شده توسط سنسورهای دروبین دیجیتال برای تصاویر تغییر شکل یافته ثبت شده

است، میدان تغییر شکل، کرنش و نرخ آن به دست می آید.

تجربه تحقيقات نويسنده اين مقاله نشان مىدهد روش همربطى تصاوير دیجیتال اگرچه کارآمد و دقیق است ولی از آنجایی که بر پایه بهینهسازی استوار است بسیار وابسته به مقدار اولیه بوده و در شرایط متعددی به جواب صحیح همگرا نمی شود. در این مقاله از روش سرعت سنجی تصویر ذره برای تعیین مقدار اولیه و ورودی روش همربطی تصاویر دیجیتال استفاده شده است که نشان میدهد راهکاری مطمئن تر از روشهای ارائه شده تاکنون می-باشد.

2- تئورى همربطى تصاوير

روش تحلیل همربطی تصاویر، با مقایسه دو تصویر دیجیتال، تصویر نمونه پیش از تغییر شکل را به عنوان تصویر مرجع و تصویر نمونه پس از تغییر شكل بهعنوان تصوير هدف مقايسه مي گردند. الگوريتم تحليل همربطي تصاویر با تطابق چگالی پیکسلهای محیط مورد بررسی در تصویر هدف با یک الگوی تصویر یکتا در تصویر مرجع، به دنبال یکی از نقاط (پیکسلهای) مرتبط در هر دو تصویر می گردد. این چنین ارتباطی تنها می تواند تغییر مکان یا ترکیبی از تغییر مکان و گرادیان آن را بهدست دهد. نوع پرکاربردی از تصاویر که در همربطی تصاویر استفاده می شوند، تصاویر خاکستری با الگوی خالدار تصادفی هستند. تصاویر خاکستری وابسته بهدقت ابزار تصویربردار می توانند 8، 12، 16 یا 32 بیتی باشد. اندازه خطهای تصادفی معمولاً بسیار ریز در حدود 1-100 میکرون است و می تواند خطهای سیاهی در زمینه سفید یا بالعکس باشد. مزیت عمده استفاده از روش تحلیل همربطی تصاویر در اندازه گیری میدان کرنش های بزرگ است که امکان نصب تجهیزات اندازه گیری مانند کرنشسنج وجود ندارد. ماشین کاری یکی از نمونه مواردی است که این روش تحلیلی برای اندازه گیری کرنش در آن میتواند بسیار کارآمد باشد.

ایده اصلی در تئوری همربطی تصاویر یافتن تابع میدان تغییر شکل به گونهای است که رابطه همربطی بین دو تصویر مرجع و تغییر شکل یافته کمینه شود. اگر (x,y) در تصویر مرجع به نقطه متناظر آن در تصویر تغییر شکل یافته (x, ý) تصویر شود، آنگاه با فرض در نظر گرفتن تابع تغییر شکل (x,y) در راستای x و V(x,y) در راستای y، میتوان رابطه (1) را نوشت. $\tilde{x} = x + U(x, y)$ (1) $\tilde{y} = y + V(x, y)$ با در نظر گرفتن بسط تیلور توابع تغییر شکل U و V حول (x_0, y_0) می-

$$\tilde{x} = x_0 + U_0 + U_x \Delta x + U_y \Delta y + \frac{1}{2} U_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} U_{yy} \Delta y^2 + U_{xy} \Delta x \Delta y$$

$$\tilde{y} = y_0 + V_0 + V_x \Delta x + V_y \Delta y + \frac{1}{2} V_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} V_{yy} \Delta y^2 + V_{xy} \Delta x \Delta y$$
(2)

g(x,y) را میتوان توابع میانیاب اسپلاین تصویر مرجع و تصویر تغییر شکل یافته در نظر گرفت. استفاده از تابع میانیاب یک تصویر این امکان را فراهم میآورد که تصویر بهصورت پیوسته تحلیل شود و لذا میتوان از آن در الگوریتمهای بهینهسازی استفاده کرد و نیز دقت، محدود به ابعاد یک پیکسل نخواهد بود و می توان دقت کمتر از یک پیکسل را نیز به دست آورد. توابع میان یاب اسیلاین دومکعبی⁷ برای تصاویر مرجع و تغییر شکل یافته به صورت توابع رابطه (3) در نظر گرفته می شود.

7. Bicubic Spline interpolant

- 1. Deformation field
- 2. Material flow
- 3. Quick-stop device
- 4. Particle image velocimetry (PIV)
- 5. Particle tracking velocimetry (PTV)
- 6. Digital image correlation (DIC)

مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1394، دوره 15، شماره 13، ویژهنامه مجموعه مقالات کنفرانس CAMMT

اندازه گیری میدان کرنش و نرخ کرنش در حین ماشین کاری بر پایه روش همربطی تصاویر

ربطی براساس [18] به صورت رابطه (4) تعریف میشود.

$$C = \frac{\sum_{S_{p} \in \Omega_{im}} \{f(S_{p}) - g(S_{p}, P)\}^{2}}{\sum_{S_{n} \in S} f^{2}(S_{n})}$$
(4)

بین تصاویر مرجع و تغییر شکل یافته در نظر گرفته شده است. ضریب هم-

مولفه های پارامتر P در فرآیند کمینه سازی ضریب همربطی C به دست میآید. ($S_p = (x, y)$ و Ω_{im} دامنه تصویرهای مرجع و تغییر شکل یافته است. به این منظور از رابطه نیوتن-رافسون مطابق رابطه (5) می توان استفاده نمود. (5) حک[$P - P_0$ ($P - P_0$) ($P - P_0$)

که در آن P_0 حدس اولیه و $\nabla \nabla$ گرادیان مرتبه دوم ضریب همربطی است. برای روش فوق درصورتی که مقدار حدس اولیه به درستی انتخاب نشود حصول جواب و همگرایی آن به شدت مورد تردید است. برای حل این مشکل در این مقاله از روش کراس-کوریلیشن نرمال¹ شده استفاده شده است. این روش که مناسب برای انطباق الگو² در پردازش تصویر و یا تعقیب شی³ در یک تصویر است، قادر است تا مکان یک الگو را در زمینه تصویر مادر بیابد. این کار توسط ضریب همربطی که در رابطه (6) تعریف شده است انجام می پذیرد [19].

$$\gamma(u,v) = \frac{\sum_{(x,y)\in\Omega_{\rm im}}[h(x,y)-\bar{h}][t(x-u,y-v)-\bar{t}]}{\sqrt{\sum_{(x,y)\in\Omega_{\rm im}}[h(x,y)-\bar{h}]^2[t(x-u,y-v)-\bar{t}]^2}}$$
(6)

که در آن، $h \ \bar{h}$ به ترتیب بیانگر تصویر مرجع و مقدار متوسط بخشی از تصویر مرجع که توسط الگو پوشش داده شده است. منظور از تصویر مرجع تصویری است که الگو درون آن جای دارد. $t \ \bar{t}$ نیز به ترتیب بیانگر تصویر الگو و مقدار متوسط آن است. $x \ e \ q$ محدودهای را مشخص می کنند که توسط تصویر الگو پوشیده می شود. $u \ e \ v$ نیز مکان قرار گیری الگو روی تصویر مرجع می باشد. $\gamma \ z$ ماتریس دوبعدی است که اندیس درایه بیشینه آن مکان بهترین انطباق تصویر الگو با تصویر مرجع را دراختیار می گذارد.

3- آزمایش عملی

دستگاه فرز مورد استفاده در این تحقیق در شکل (1- الف) نشان داده شده است. چرخش ابزارگیر در این فرز نیز مقید شده و در واقع فرز مثل صفحه تراش عمل می کند. ابزار مورد استفاده دارای زاویه برش صفر و زاویه آزاد 6 درجه است. در این آزمایش به منظور تصویربرداری از یک میکروسکوپ با قابلیت اتصال به کامپیوتر که دارای سرعت فیلم برداری 15 فریه بر ثانیه می باشد، استفاده شده است. ابزار برشی و دوربین در حال فیلم برداری در شکل (1- ب) به تصویر کشیده شده است. نمونه آزمایشی از جنس آلومینیوم است. از عمق بار به منظور کالیبراسیون پیکسل ها استفاده شده است. به این ترتیب که عمق بار که 1 میلی متر بوده است در تصویر معادل 75 پیکسل است در نتیجه هر پیکسل بیانگر 13



الف) ماشین فرز و کامپیوتر برای ثبت داده



ب) ابزار و میکروسکوپ در حال فیلم برداری م

شکل 1 تجهیزات آزمایش عملی

میکرومتر است. سرعت برشی نیز معادل 0/6 میلیمتر بر ثانیه درنظر گرفته شده است. پهنای ابزار 10 میلیمتر است و چون این بعد نسبت به ابعاد عمق بار زیاد است میتوان فرآیند را کرنش صفحهای فرض کرد.

4- نتايج و بحث

همان گونه که در شکل 2 مشاهده می شود گوشه بالای سمت چپ تصویر مرجع به عنوان مرجع مختصات در تحلیل به کار گرفته شده است. ابزار برشی

Normalized cross correlation
 Pattern matching
 Object tracking

مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1394، دوره 15، شماره 13، ویژهنامه مجموعه مقالات کنفرانس CAMMT



شکل 2 تصویر مرجع تحلیل همربطی ماشین کاری

4. Shear zone

نيز سمت راست تصوير مشخص است.

انجام تحلیل همربطی تصاویر روی دو تصویر مرجع و تغییرشکلیافته، میدان تغییرشکل را به دست می دهد. شکلهای g(x, y) و u(x, y) که میدان تغییرشکل را به دست می دهد. شکلهای $x \in y$ می باشند، را به تصویر می کشد. شکلهای g(x, y) که میدانهای تغییر شکل در راستاهای $x \in y$ می باشند، را به تصویر می کشد. شکلهای g(x, y) نشان می دهند که گرادیان تغییر شکل نرمال در امتداد صفحه برش و کمی دور از نوک ابزار تقریبا برابر صفر است که نشان می دهد در این اتفاق می افتد.

نمودار کانتوری سرعت جریان ماده که از رابطه (7) محاسبه گردیده در شکل 5 نمایش داده شده است. این شکل نشان می دهد کمترین سرعت جریان در ناحیه نوک ابزار اتفاق می افتد که این امر به سبب چسبیدن ماده نوک ابزار و تشکیل لبه انباشته در ماشین کاری آلومینیوم رخ داده است. لذا می توان نشان داد که روش تحلیل هم ربطی تصاویر چگونه می تواند حین فرآیند ماشین کاری تشکیل لبه انباشته را تشخیص دهد.

$$V(x,y) = \sqrt{\left(\frac{u(x,y)}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{v(x,y)}{\Delta t}\right)^2}$$
(7)

که در ان (Δt **= 0.13(sec** بازه زمانی بین دو فریم مرجع و تغییرشکل یافته است.

مولفههای کرنش شامل کرنشهای طولی (در راستای محور x) (\mathcal{E}_x)، عرضی (در راستای محور y) (\mathcal{F}_y) و برشی (γ_{xy}) از جمله کمیتهایی است که با استفاده از میدان تغییرشکل بهدست آمده از تحلیل همربطی تصاویر محاسبه میشوند. مولفههای کرنش از روابط (8) بهدست میآیند.

$$\varepsilon_{x}(x,y) = \frac{\partial u(x,y)}{\partial x}$$

$$\varepsilon_{y}(x,y) = \frac{\partial v(x,y)}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy}(x,y) = \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x,y)}{\partial x}$$
(8)





شکل 6 کرنش طولی را به تصویر می کشد. این تصویر نشان میدهد کرنش طولی اواسط ناحیه برش به صفر میل می کند. کرنش عرضی در شکل 7 نشان داده شده است. کرنش برشی در شکل 8 نشان داده شده است. این شکل نشان میدهد کرنش برشی اطراف نوک ابزار بیشینه است و این نقطه آغاز شکل گیری ناحیه برشی است.



شكل 5 نمودار كانتورى سرعت جريان ماده حين ماشين كارى برحسب ميلىمتر بر ثانيه







مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1394، دوره 15، شماره 13، ویژهنامه مجموعه مقالات کنفرانس CAMMT

528

داوود کریمی و محمد مہدی ملکیان

of the behavior of steels over large temperature and strain rate ranges, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 67, pp. 108–122, 2013.

- [6] B. Shi, H. Attia, N. Tounsi, Identification of material constitutive laws for machining - part I: An analytical model describing the stress, strain, strain rate, and temperature fields in the primary shear zone in orthogonal metal cutting, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 132, 2010.
- [7] S. Jaspers, J. Dautzenberg, Material behaviour in metal cutting: Strains, strain rates and temperatures in chip formation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, pp. 123–135, 2002.
- [8] M. G. Stevenson, P. L. B. Oxley, An experimental investigation of the influence of speed and scale on the strain-rate in a zone of intense plastic deformation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 184, pp. 561-576, 1969.
- [9] R. Komanduri, R. Brown, On the mechanics of chip segmentation in machining, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 103, pp. 33-51, 1981.
- [10] E. Lee, B. Shaffer, The theory of plasticity applied to a problem of machining, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 405–413, 1951.
- [11] T. Childs, A new visio-plasticity technique and a study of curly chip formation, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 13, pp. 375– 387, 1971.
- [12] J. Pujana, P. Arrazola, J. Villar, In-process high-speed photography applied to orthogonal turning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 202, pp. 475–485, 2008.
- [13] M. Chaudhri, Subsurface deformation patterns around indentation in workhardened mild steel, *Philosophical Magazine Letters*, Vol. 67, pp. 107–115, 1993.
- [14] G. List, G. Sutter, X. Bi, A. Molinari, A. Bouthiche, Strain, strain rate and velocity fields determination at very high cutting speed, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, pp. 693-699, 2013.
- [15] E.P. Gnanamanickam, S. Lee, J. P. Sullivan, S. Chandrasekar, direct measurement of large-strain deformation fields by particle tracking, *measurement science and technology*, Vol. 20, 2009.
- [16] T. Pottier, G. Germain, M. Calamaz, A. Morel, D. Coupard, Sub-millimeter measurement of finite strains at cutting tool tip vicinity, *Experimental Mechanics*, Vol. 54, pp. 1031-1042, 2014.
- [17] G. Vendroux, W.G. Knauss, Submicron diformation field measurements : Part 2. Improved digital image correlation, *Experimental Mechanics*, Vol. 38, pp. 86-91, 1998.
- [18] H. Lu, P.D. Cary, Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient, *Experimental Mechanics*, Vol. 40, pp. 393-400, 2000.
- [19]J.P. Lewis, Fast template matching, *vision interface 95*, Canadian Image Processing and Pattern Recognition Society, Quebec City, pp. 120-123, 1995.
- [20] N. Tounsi, J. Vincenti, A. Otho, M.A. Elbestawi, From the basic mechanics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1373–1383, 2002.

تونسی و همکاران او [20] پارامتر نرخ کرنش موثر را مطابق رابطه (9) معرفی کردند.

$$\dot{\varepsilon}_{\rm eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{\partial V_{\rm y}}{\partial x} \right| \tag{9}$$

آنها از این پارامتر برای مطالعه ناحیه برش اولیه استفاده کردند. ایشان اشاره کردند که نرخ کرنش موثر در امتداد صفحه برش بیشینه است. شکل 9 نرخ کرنش موثر که از رابطه (9) به کمک تحلیل همربطی تصاویر بهدست آمده است را نشان میدهد. از این شکل مشخص است که در امتداد عمود بر صفحه برشی، با نزدیک شدن به آن نرخ کرنش موثر افزایش مییابد.



5- نتيجه گيري

در این مقاله روشی بسیار موثر و غیرتماسی برای اندازه گیری کرنش و نرخ کرنش معرفی گردید. این روش برای ماشین کاری یک قطعه آلومینیومی به-خدمت گرفته شد. نتایج برای میدان سرعت، تغییرشکل، کرنش و نرخ کرنش ارائه شد. نشان داده شد که می توان به کمک میدان سرعت، کرنش و نرخ کرنش در ناحیه تغییرشکل اولیه که به این روش بهدست میآید رفتار ماده را نسبت به روشهای مرسوم با دقت بهتر و دقیق تری مورد بررسی قرار داد. روش ارائه شده تنها روشی است که میتواند مقادیر کرنش و نرخ آن را در هر نقطه از ناحیه تغییر شکل اولیه به صورت تجربی و عملی اندازه گیری نماید و لذا می توان با به خدمت گرفتن آن در تحلیل ماشین کاری از محدودیت های ناشی از سادهسازی تئوریهای موجود که ناحیه تغییر شکل اولیه را یک صفحه یا ناحیهای محصور بین دو خط موازی فرض می کند، رهایی یافت. از نتایج بهدست آمده در این مقاله می توان به تشخیص تشکیل لبه انباشته حین ماشین کاری، توزیع غیریکنواخت کرنش در ناحیه تغییر شکل اولیه، و اندازه گیری کرنش موثر در این ناحیه اشاره کرد که تاکنون با روشهای مرسوم امکان پذیر نبوده است. در ادامه این تحقیق می توان با استفاده از روش معرفی شده در این مقاله برای محاسبه پارامترهای مدل جانسون کوک از طریق ازمایش تجربی ماشین کاری استفاده کرد.

529

6- مراجع

- [1] T. Mabrouki, J.F. Rigal, A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, pp. 214–221, 2006.
- [2] S. Bahi, M. Nouari, A. Moufki, M. El Mansori, A. Molinari, A new friction law for sticking and sliding contacts in machining, *Tribology International*, Vol. 44, pp. 764–771, 2011.
- [3] T. Childs, Friction modelling in metal cutting, *Wear*, Vol. 260, pp. 310-318, 2006.
- [4] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot, Numerical simulation of titanium alloy dry machining with a strain softening constitutive law, *Machining Science and Technology*, Vol. 14, pp. 244-257, 2010.
- [5] A. Hor, F. Morel, J.L. Lebrun, G. Germain, An experimental investigation

مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1394، دوره 15، شماره 13، ویژهنامه مجموعه مقالات کنفرانس CAMMT