



# 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 پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 33535111، d\_karimi@irost.ir

## چکیده

کرنش و نرخ کرنش از موثرترین پارامترهای فرآیند ماشین کاری به شمار می روند 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 مدل های 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 می آید. نشان داده شده است که داده های به دست آمده از این آزمون، نتایج دقیقی برای فرآیند ماشین کاری به دست نمی دهد چرا که دامنه کرنش و نرخ کرنش در این آزمون نسبت به موارد مشابه در ماشین کاری با سرعت های مرسوم قابل قیاس نیست. این امر لزوم ایجاد تجهیزات آزمونی را گوشزد می کند که توسط آن بتوان کرنش و نرخ کرنش را حین عملیات ماشین کاری اندازه گیری کرد. استفاده از روش های تماسی مرسوم برای محاسبه کرنش و نرخ کرنش، مانند نصب سنسورهای کرنش سنج، در حین فرآیند ماشین کاری میسر نمی باشد. در این تحقیق روش اندازه گیری کرنش و نرخ کرنش بر پایه روش همربطی تصاویر حین فرآیند ماشین کاری ارائه شده است، که به کمک آن می توان به مطالعه رفتار ماده حین ماشین کاری پرداخت.

کلید واژگان: روش حساسیت گسسته، روش متغیر مختلط، روش نیمه تحلیلی، روش های آنالیز حساسیت

## 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

جبهه جلوی ابزار تشکیل می شود، شبیه سازی های عددی به صورت گسترده به کار گرفته شده است. در این روش نتایج تنها در صورتی قابل اعتماد است که از مدل اصطکاکی و متریالی مناسبی استفاده شود [2-6]. در حال حاضر این مدل ها تنها از طریق داده های ماکروسکوپی مانند نیروی برشی، مرفولوژی براده و طول درگیری ابزار و براده مورد ارزیابی قرار گرفته و اعتبار سنجی می شوند. به سبب دشواری در اندازه گیری در حین انجام آزمایش های ماشین کاری جزئیات کافی در خصوص رفتار ماده در ناحیه برشی به صورت منطقه ای در دسترس نیست. این در حالی است که کرنش، نرخ کرنش، و دما از عواملی هستند که موجب تغییر در رفتار و خواص مکانیکی مواد به صورت موضعی در ناحیه های تغییر شکل و شکل گیری براده می شود. به همین دلیل است که استفاده از داده های آزمون های استاندارد مانند کشش و غیره معتبر نمی باشد.

در فرآیند ماشین کاری، کرنش و نرخ کرنش مقادیر بزرگی به خود اختصاص می دهند. 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 ثالثیه<sup>1</sup>، که در

1. Primary, secondary and tertiary deformation zones

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

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 فارسی)

است، میدان تغییر شکل، کرنش و نرخ آن به دست می‌آید. تجربه تحقیقات نویسنده این مقاله نشان می‌دهد روش هم‌ربطی تصاویر 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 نمی‌شود. در این مقاله از روش سرعت‌سنجی تصویر ذره برای تعیین مقدار اولیه و ورودی روش هم‌ربطی تصاویر دیجیتال استفاده شده است که نشان می‌دهد راهکاری مطمئن‌تر از روش‌های ارائه شده تاکنون می‌باشد.

## 2- تئوری هم‌ربطی تصاویر

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 شکل به عنوان تصویر هدف مقایسه می‌گردند. الگوریتم تحلیل هم‌ربطی 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 می‌گردد. این چنین ارتباطی تنها می‌تواند تغییر مکان یا ترکیبی از تغییر مکان و گرادیان آن را به دست دهد. نوع پرکاربرد از تصاویر که در هم‌ربطی تصاویر استفاده می‌شوند، تصاویر خاکستری با الگوی خال‌دار تصادفی هستند. تصاویر خاکستری وابسته به دقت ابزار تصویربرداری می‌توانند 8، 12، 16 یا 32 بیتی باشد. اندازه خط‌های تصادفی معمولاً بسیار ریز در حدود 1-100 میکرون است و می‌تواند خط‌های سیاهی در زمینه سفید یا بالعکس باشد. مزیت عمده استفاده از روش تحلیل هم‌ربطی تصاویر در اندازه‌گیری میدان کرنش‌های بزرگ است که امکان نصب تجهیزات اندازه‌گیری مانند کرنش‌سنج وجود ندارد. ماشین‌کاری یکی از نمونه مواردی است که این روش تحلیلی برای اندازه‌گیری 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  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  تصویر شود، آنگاه با فرض در نظر گرفتن تابع تغییر شکل  $U(x, y)$  در راستای  $x$  و  $V(x, y)$  در راستای  $y$ ، می‌توان رابطه (1) را نوشت.

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x + U(x, y) \\ \tilde{y} &= y + V(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن بسط تیلور توابع تغییر شکل  $U$  و  $V$  حول  $(x_0, y_0)$  می‌توان رابطه (1) را به صورت رابطه (2) بازنویسی نمود.

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_0 + U_0 + U_x \Delta x + U_y \Delta y + \frac{1}{2} U_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} U_{yy} \Delta y^2 + U_{xy} \Delta x \Delta y \\ \tilde{y} &= y_0 + V_0 + V_x \Delta x + V_y \Delta y + \frac{1}{2} V_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} V_{yy} \Delta y^2 + V_{xy} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن  $\Delta x = x - x_0$  و  $\Delta y = y - y_0$  می‌باشد. توابع  $f(x, y)$  و  $g(x, y)$  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 به صورت پیوسته تحلیل شود و لذا می‌توان از آن در الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرد و نیز دقت، محدود به ابعاد یک پیکسل نخواهد بود و می‌توان دقت کمتر از یک پیکسل را نیز به دست آورد. توابع میان‌یاب اسپلاین دوم‌کعبی<sup>7</sup> برای تصاویر مرجع و تغییر شکل یافته به صورت توابع رابطه (3) در نظر گرفته می‌شود.

اندازه‌گیری مستقیم کمیت‌های مرتبط با میدان تغییر شکل<sup>1</sup>، مانند سرعت سیلان ماده<sup>2</sup>، کرنش و نرخ کرنش عمدتاً به کمک دستگاه توقف سریع<sup>3</sup> انجام شده است. ایده اصلی، بیرون کشیدن و دور کردن سریع ابزار از قطعه‌کار در حین ماشین‌کاری [7] و یا شتاب دادن به قطعه‌کار برای جدا کردن آن از ابزار است [8] که این کار اصطلاحاً موجب منجمد شدن فرآیند شده و می‌توان از ناحیه تغییر شکل یافته در مقابل ابزار به منظور انجام اندازه‌گیری میدان تغییر شکل و کرنش استفاده کرد. کومان‌دوری و براون [9] به مطالعه مکانیک شکست براده در حین ماشین‌کاری یک فولاد پرلیتی-فریفی با استفاده از دستگاه توقف سریع پرداختند. جاسبر و داتزبرگ [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 قطعه‌کار با سایش مکانیکی [11]، سایش شیمیایی یا روش اچینگ [12] است. سرعت و مقادیر کرنش از طریق بهم‌ریختگی میکروشبکه‌ها تخمین زده می‌شوند. تکنیکی توسط چادهیری [13] بر پایه تغییرات به هم ریختگی شبکه ارائه شد که می‌توان از آن برای تحلیل ماشین‌کاری استفاده کرد. او از شبکه دانه بندی فلز پایه استفاده کرد و از تغییر شکل آن به منظور اندازه‌گیری 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 سریع استفاده از دوربین‌های سرعت بالا است. عملکرد مناسب این دوربین‌ها از حیث فرکانس داده‌برداری، زمان بازبودن لنز، رزولوشن تصویر، و نسبت سیگنال به نویز در آن‌ها امکان استفاده از این ابزار را در کاربردهایی مانند اندازه‌گیری کرنش در فرآیند ماشین‌کاری فراهم کرده است. پوجانا و همکاران او [12] از این روش برای تحلیل قطعه‌ای 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 اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری 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<sup>4</sup>، سرعت‌سنجی تعقیب ذره<sup>5</sup>، و روش هم‌ربطی تصاویر دیجیتال<sup>6</sup> می‌شوند که 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 اندازه‌گیری میدان تغییرشکل در فرآیندهای با کرنش زیاد مانند ماشین‌کاری استفاده کردند. پوتیر و همکاران او [16] از روش هم‌ربطی تصاویر دیجیتال برای اندازه‌گیری کرنش‌ها با قابلیت تفکیک کمتر از میلی‌متر 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

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)

7. Bicubic Spline interpolant



الف) ماشین فرز و کامپیوتر برای ثبت داده



ب) ابزار و میکروسکوپ در حال فیلم برداری

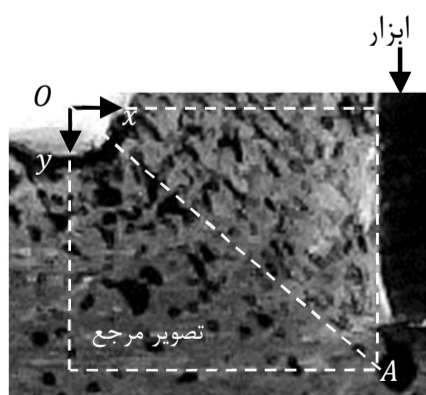
شکل 1 تجهیزات آزمایش عملی

میکرومتر است. سرعت برشی نیز معادل 0/6 میلی‌متر بر ثانیه در نظر 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- نتایج و بحث

دو تصویر مرجع و تغییر شکل یافته به فاصله زمانی 2 فریم معادل با 0/13 ثانیه از یکدیگر برای انجام تحلیل هم‌ربطی تصاویر انتخاب شده‌اند. تصویر مرجع از فریم اول و تصویر تغییر شکل یافته از فریم دوم بدست آمده است. فریم اول که نمایی از قطعه در حین ماشین‌کاری را نشان می‌دهد در شکل 2 به تصویر کشیده شده است. بخشی از این شکل همان‌گونه که نشان داده شده است به عنوان تصویر مرجع انتخاب شده است. به منظور صحت‌سنجی تحلیل هم‌ربطی تصاویر از جابجایی ناحیه دور از ناحیه برش استفاده شده است. در ناحیه‌ای دور از ناحیه برش می‌توان از کرنش صرف نظر کرد و در نظر گرفت که ماده دارای جابجایی صلب است. با توجه به این که سرعت پیشروی در ماشین‌کاری 0/6 میلی‌متر بر ثانیه بوده است، انتظار می‌رود حرکت صلب قطعه‌کار در ناحیه‌ای دور از ناحیه برش<sup>4</sup> 0/08 میلی‌متر بین هر دو فریم متوالی در نظر گرفته شده باشد. استفاده از تحلیل هم‌ربطی تصاویر برای این ناحیه همین مقدار جابجایی را به دست داده است.

همان‌گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود گوشه بالای سمت چپ تصویر مرجع به عنوان مرجع مختصات در تحلیل به کار گرفته شده است. ابزار برشی



شکل 2 تصویر مرجع تحلیل هم‌ربطی ماشین‌کاری

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{mn} x^m y^n$$

$$g(\tilde{x}, \tilde{y}, P) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \beta_{mn} \tilde{x}^m \tilde{y}^n + w \quad (3)$$

که در آن  $P$  برداری با سیزده مولفه شامل پارامترهای توابع میان‌یاب و  $w$  است که به پیشنهاد وندروسکس و کناس [17] برای جبران شیفت شدت نور بین تصاویر مرجع و تغییر شکل یافته در نظر گرفته شده است. ضریب هم‌ربطی براساس [18] به صورت رابطه (4) تعریف می‌شود.

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

مولفه‌های پارامتر  $P$  در فرآیند کمینه سازی ضریب هم‌ربطی  $C$  به دست می‌آید.  $S_p = (x, y)$  و  $\Omega_{im}$  دامنه تصویرهای مرجع و تغییر شکل یافته است. به این منظور از رابطه نیوتن-رافسون مطابق رابطه (5) می‌توان استفاده نمود.

$$[\nabla \nabla C(P_0)(P - P_0)] = -[\nabla C(P_0)] \quad (5)$$

که در آن  $P_0$  حدس اولیه و  $\nabla \nabla C$  گرادیان مرتبه دوم ضریب هم‌ربطی است. برای روش فوق در صورتی 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 نرمال<sup>1</sup> شده استفاده شده است. این روش که مناسب برای انطباق الگو<sup>2</sup> در پردازش تصویر و یا تعقیب شی<sup>3</sup> 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 می‌پذیرد [19].

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

که در آن،  $h$  و  $\bar{h}$  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.  $t$  و  $\bar{t}$  نیز به ترتیب بیانگر تصویر الگو و مقدار متوسط آن است.  $x$  و  $y$  محدوده‌ای را مشخص می‌کنند که توسط تصویر الگو پوشیده می‌شود.  $u$  و  $v$  نیز مکان قرار گیری الگو روی تصویر مرجع می‌باشد.  $\gamma$  یک ماتریس دوبعدی است که اندیس درایه بیشینه آن مکان بهترین انطباق تصویر الگو با تصویر مرجع را در اختیار می‌گذارد.

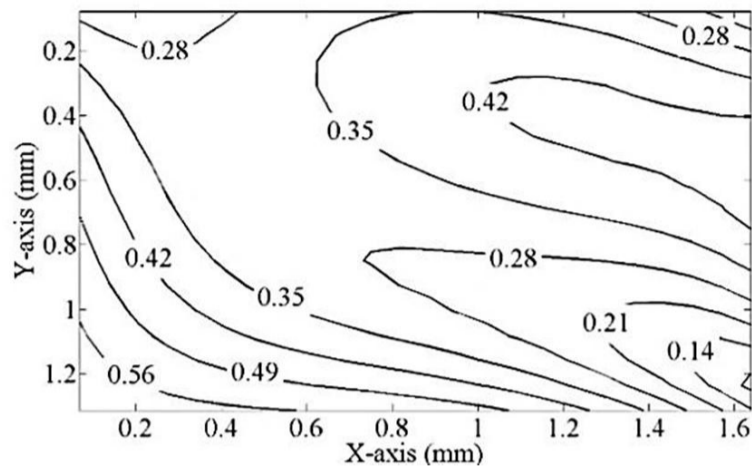
#### 3- آزمایش عملی

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 می‌کند. 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 فیلم‌برداری 15 فریم بر ثانیه می‌باشد، استفاده شده است. ابزار برشی و دوربین در حال فیلم‌برداری در شکل (1- ب) به تصویر کشیده شده است.

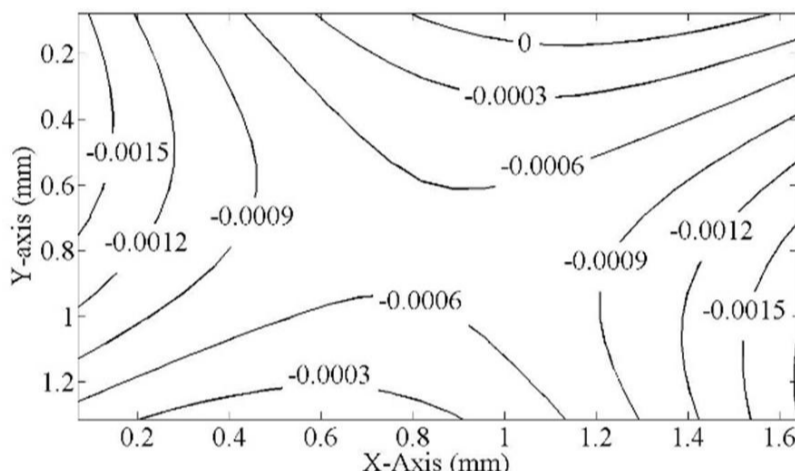
نمونه آزمایشی از جنس آلومینیوم است. از عمق بار به منظور کالیبراسیون پیکسل‌ها استفاده شده است. به این ترتیب که عمق بار که 1 میلی‌متر بوده است در تصویر معادل 75 پیکسل است در نتیجه هر پیکسل بیانگر 13

1. Normalized cross correlation  
2. Pattern matching  
3. Object tracking

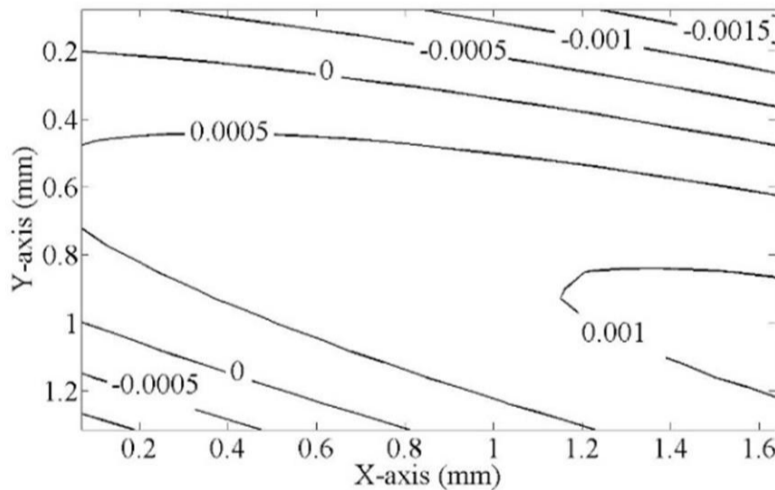
شکل 6 کرنش طولی را به تصویر می‌کشد. این تصویر نشان می‌دهد کرنش طولی اواسط ناحیه برش به صفر میل می‌کند. کرنش عرضی در شکل 7 نشان داده شده است. کرنش برشی در شکل 8 نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد کرنش برشی اطراف نوک ابزار بیشینه است و این نقطه آغاز شکل‌گیری ناحیه برشی است.



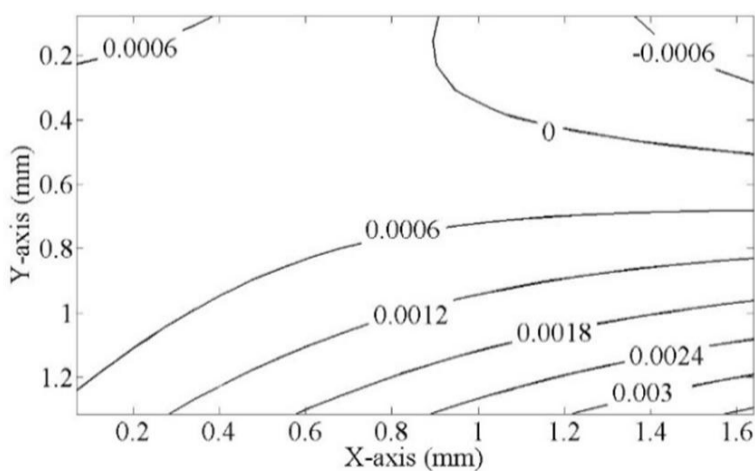
شکل 5 نمودار کانتوری سرعت جریان ماده حین ماشین‌کاری برحسب میلی‌متر بر ثانیه



شکل 6 میدان کرنش طولی ( $\epsilon_x$ )



شکل 7 میدان کرنش عرضی ( $\epsilon_y$ )



شکل 8 میدان کرنش عرضی ( $\gamma_{xy}$ )

نیز سمت راست تصویر مشخص است. انجام تحلیل هم‌ربطی تصاویر روی دو تصویر مرجع و تغییرشکل‌یافته، میدان تغییرشکل را به دست می‌دهد. شکل‌های 3 و 4 به ترتیب  $u(x,y)$  و  $v(x,y)$  که میدان‌های تغییرشکل در راستاهای  $x$  و  $y$  می‌باشند، را به تصویر می‌کشد. شکل‌های 3 و 4 نشان می‌دهند که گرادینان تغییر شکل نرمال در امتداد صفحه برش و کمی دور از نوک ابزار تقریباً برابر صفر است که نشان می‌دهد در این ناحیه عمدتاً کرنش به شکل برشی اتفاق می‌افتد.

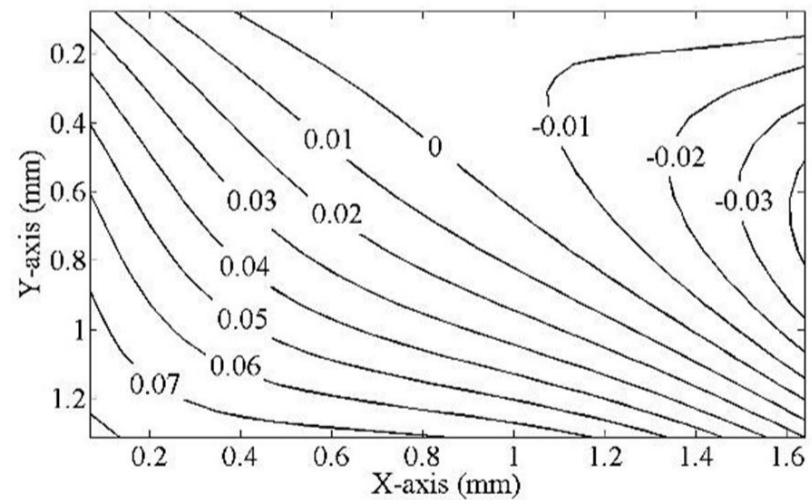
نمودار کانتوری سرعت جریان ماده که از رابطه (7) محاسبه گردیده در شکل 5 نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد کمترین سرعت جریان در ناحیه نوک ابزار اتفاق می‌افتد که این امر به سبب چسبیدن ماده نوک ابزار و تشکیل لبه انباشته در ماشین‌کاری آلومینیوم رخ داده است. لذا می‌توان نشان داد که روش تحلیل هم‌ربطی تصاویر چگونه می‌تواند حین فرآیند ماشین‌کاری تشکیل لبه انباشته را تشخیص دهد.

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

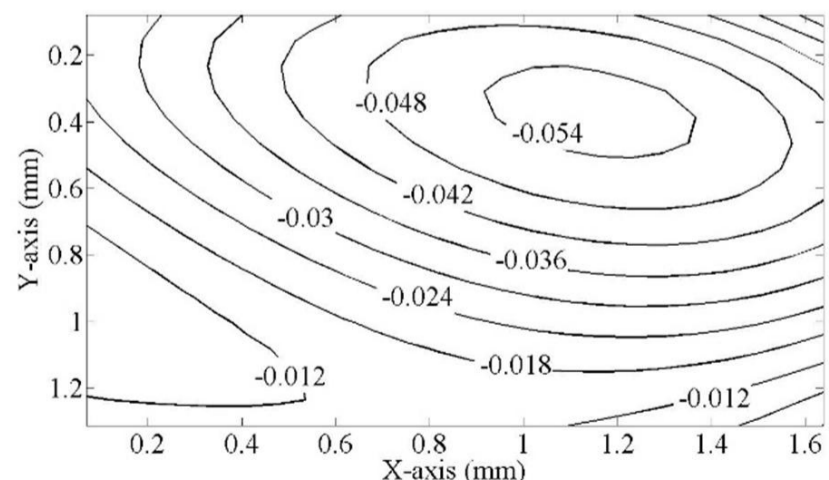
که در آن  $\Delta t = 0.13(\text{sec})$  بازه زمانی بین دو فریم مرجع و تغییرشکل یافته است.

مولفه‌های کرنش شامل کرنش‌های طولی (در راستای محور  $x$ ) ( $\epsilon_x$ )، عرضی (در راستای محور  $y$ ) ( $\epsilon_y$ ) و برشی ( $\gamma_{xy}$ ) از جمله کمیت‌هایی است که با استفاده از میدان تغییرشکل به دست آمده از تحلیل هم‌ربطی تصاویر محاسبه می‌شوند. مولفه‌های کرنش از روابط (8) به دست می‌آیند.

$$\begin{cases} \epsilon_x(x,y) = \frac{\partial u(x,y)}{\partial x} \\ \epsilon_y(x,y) = \frac{\partial v(x,y)}{\partial y} \\ \gamma_{xy}(x,y) = \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x,y)}{\partial x} \end{cases} \quad (8)$$



شکل 3 میدان تغییر شکل در راستای محور افقی ( $u(x,y)$ ) برحسب میلی‌متر



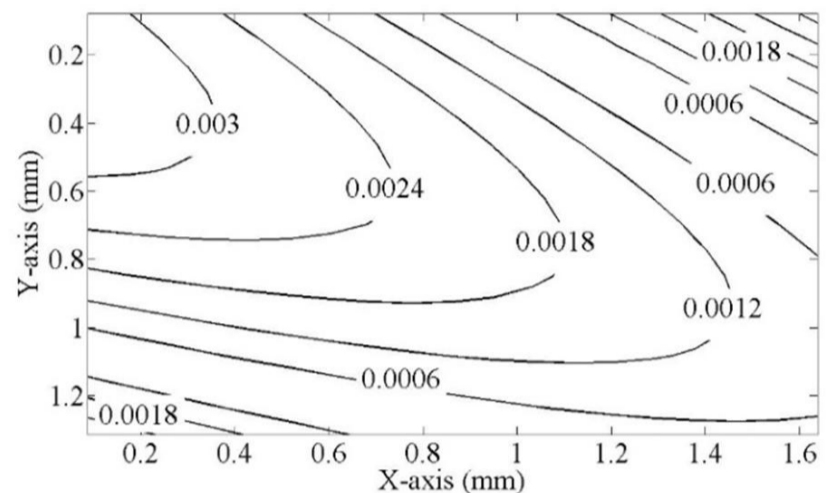
شکل 4 میدان تغییر شکل در راستای محور عمودی ( $v(x,y)$ ) برحسب میلی‌متر

- 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.

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

$$\dot{\epsilon}_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{\partial V_y}{\partial x} \right| \quad (9)$$

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 به دست 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.



شکل 9 نرخ کرنش موثر بر حسب (1/sec)

## 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی بسیار موثر و غیرتماسی برای اندازه‌گیری کرنش و نرخ کرنش معرفی گردید. این روش برای ماشین‌کاری یک قطعه آلومینیومی به خدمت گرفته شد. نتایج برای میدان سرعت، تغییرشکل، کرنش و نرخ کرنش ارائه شد. نشان داده شد که می‌توان به کمک میدان سرعت، کرنش و نرخ کرنش در ناحیه تغییرشکل اولیه که به این روش به دست 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 اندازه‌گیری نماید و لذا می‌توان با به خدمت گرفتن آن در تحلیل ماشین‌کاری از محدودیت‌های ناشی از ساده‌سازی تئوری‌های موجود که ناحیه تغییر شکل اولیه را یک صفحه یا ناحیه‌ای محصور بین دو خط موازی فرض می‌کند، رهایی یافت. از نتایج به دست آمده در این مقاله می‌توان به تشخیص تشکیل لبه انباشته حین ماشین‌کاری، توزیع غیریکنواخت کرنش در ناحیه تغییر شکل اولیه، و اندازه‌گیری کرنش موثر در این ناحیه اشاره کرد که تاکنون با روش‌های مرسوم امکان‌پذیر نبوده است. در ادامه این تحقیق می‌توان با استفاده از روش معرفی شده در این مقاله برای محاسبه پارامترهای مدل جانسون کوک از طریق آزمایش تجربی ماشین‌کاری استفاده کرد.

## 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