



## توسعه مدل المان محدود جوانه زنی و رشد ترک میانی در میکرو ماشین‌کاری شیشه BK7

محمد امین اصغری<sup>۱</sup>، جواد اکبری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، akbari@sharif.edu

### چکیده

از جمله آسیب‌هایی که حین براده‌برداری مکانیکی از مواد ترد و به طور خاص شیشه ایجاد می‌شود ترک‌های سطحی و زیر سطحی در قطعه است که می‌تواند از عمر مفید قطعات بکاهد. از این رو در این پژوهش تلاش بر این است که بتوان مدل عددی ارائه کرد که مقدار ترک‌های میانی ناشی از ماشین‌کاری را که به عنوان مخرب‌ترین نوع ترک در سطح شیشه BK7 در میکروماشین‌کاری ایجاد می‌شود، پیش‌بینی کرد. به منظور شبیه‌سازی ترک و خواص آن از روش ناحیه چسبنده دو-خطی استفاده شده است که با انجام آزمایش‌های میکرو-ویکرز مقادیر آن حاصل و کالیبره می‌شود و با آزمون‌های میکروخرایش صحت‌یابی می‌شود. آزمایش میکروخرایش و مدل المان محدود آن نشان می‌دهد در نقطه تغییر رژیم از شکل‌پذیر به ترد ترک‌های ایجاد شده به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابند. پس از اعتبارسنجی این مدل در میکروخرایش، نتایج حاصل از این مدل المان محدود در مرحله آخر مدل‌سازی که شبیه‌سازی براده‌برداری متعامد در مقیاس میکروماشین‌کاری است استفاده می‌شود تا در نهایت عمق ترک‌های زیر سطحی با توجه به عمق نفوذ ابزار قابل پیش‌بینی شود.

کلید واژگان: میکروماشین‌کاری، شیشه BK7، ترک میانی، المان محدود، مدل ناحیه چسبناک

## Finite-element model developing of median crack nucleation and growth in BK7 glass micro-machining

Mohammad Amin Asqari, Javad Akbari\*

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran  
\*P.O. B. 11155-9567, Tehran, Iran, akbari@sharif.edu

### ABSTRACT

Surface and subsurface cracks in part are induced by mechanical cutting of brittle material specially glass which decrease part's life-cycle. The goal of this research is to present a finite element model for predicting induced median cracks as the most deterministic cracks on the BK7 glass subsurface in micromachining. Bilinear Cohesive Zone Method (CZM) was used for simulation of crack and its specifications. CZM's parameters were obtained and calibrated by micro-Vickers experiment and the results were validated by micro-scratch test. Finite element model demonstrated median cracks dramatically increase from ductile-to-brittle-changing-regime point in micro-scratch. Finally, the validated finite element model facilitated the prediction of the depth of median cracks with respect to tool cutting depth in micromachining.

**Keywords:** BK7 glass, Cohesive Zone Method (CZM), Finite Element Model, Median Crack, Micromachining

شکل‌پذیر رخ خواهد داد. پوتیک و همکاران تحلیل مکانیک شکست را انجام دادند تا ثابت کنند مقدار حد بحرانی برای براده‌برداری بدون ایجاد ترک وجود دارد [۳]. بیفانو و همکاران مدل تغییر رژیم ترد به شکل‌پذیر ارائه کردند که در آن مقدار براده تغییر شکل نیافته بحرانی براساس خصوصیات ذاتی ماده که موجب شکست ترد می‌شود تعیین می‌گردد [۴]. یان و همکاران مکانیزم تشکیل براده و کیفیت سطوح ماشین‌کاری در شرایط شکل‌پذیر را از دیدگاه تغییر شرایط تنش‌ی توضیح داده‌اند [۵]. سیوا و همکاران مدلی براساس استحکام شکست ارائه کردند که نقطه تغییر از ترد به شکل‌پذیر را در تشکیل براده در ماشین‌کاری مواد ترد پیش‌بینی می‌کند [۶]. پژوهش‌های انجام شده در مورد سایر مواد ترد مانند سرامیک‌ها نیز قابل استناد است و می‌توان از آن‌ها نیز بهره گرفت تا با دید وسیع‌تری مسئله رشد ترک را بررسی کرد. در پژوهش‌های رشد ترک یکی از تحقیقاتی که اخیراً انجام شده است تلاش‌های فنگ در زمینه بررسی میکروسنگ‌زنی سرامیک‌ها است که از روش ناحیه چسبنده<sup>۳</sup> استفاده کرده است [۷]. او در مطالعه خود ماده سرامیکی آلومینا را

### ۱- مقدمه

ماشین‌کاری مواد ترد و به خصوص شیشه به شیوه براده‌برداری مکانیکی موجب ایجاد ترک در سطح و زیر سطح آن قطعه می‌شود که این نقیصه در کارایی قطعه خلل ایجاد می‌کند. به‌عنوان نمونه عمق و مقدار ترک در سطح پوشش‌های ایمپلنت‌های پزشکی که از مواد سرامیکی و یا کامپوزیت‌های فلزی-سرامیکی مانند هیدروکسی‌آپتیت-منیزیم-کلسیم ساخته می‌شود بر روی عمر خوردگی آن پس از کاشت در بدن تأثیر بسزایی دارد [۱]. در تحقیقات انجام شده هنگامی که عمق برش در ماشین‌کاری شیشه از حد مشخصی کمتر باشد رژیم براده‌برداری از ترد<sup>۱</sup> به شکل‌پذیر<sup>۲</sup> تغییر می‌کند و ماده از خود رفتار پلاستیک نشان می‌دهد. از اولین تحقیقات معتبر انجام شده بر روی رفتار پلاستیک شیشه در فرآیند برش کاری است که توسط جیووانولا و فیینی انجام شده است [۲]. آن‌ها گزارش دادند که در ماشین‌کاری برخی از شیشه‌ها در صورتی که اندازه برش به اندازه کافی کوچک باشد رفتار

1. Brittle
2. Ductile

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

3. Cohesive Zone Method

Please cite this article using:

M.A. Asqari, J. Akbari, Finite-element model developing of median crack nucleation and growth in BK7 glass micro-machining, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 24-28, 2015 (in Persian) (فارسی)

## ۲-۱- تعیین پارامترهای چسبناکی

برخی پارامترهای اولیه شیشه BK7 از مقالات قابل استخراج است. با داشتن ضریب پواسون، استحکام شکست و مدول الاستیسیته می‌توان انرژی شکست را بدست آورد و براساس معیار انرژی شکست مساحت زیر نمودار محدود می‌شود. استحکام شکست مورد استفاده در این پژوهش مبتنی بر استحکام شکست بدست آمده در آزمایش سختی میکرو-ویکرز<sup>۵</sup> انجام شده بر روی نمونه شیشه BK7 است که با مقادیر موجود در مقالات مطابقت خوبی دارد. مقدار حاصله در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$E = 82 \text{GPa}, \nu = 0.203, K_{IC} = 0.72 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \rightarrow \tau = 8.65 \text{Pa} \cdot \text{m} \quad (2)$$

از سوی دیگر فرض محدودیت توسعه ترک نیز باید لحاظ شود تا بتوان رشد ناحیه ترک را به صورت خطی در نظر گرفت، زیرا توسعه این عبارات براساس توسعه ترک الاستیک خطی بنا شده است. منطقه رشد ترک چسبناکی<sup>۶</sup> را با کمک رابطه (۳) می‌توان تخمین زد [۱۰]:

$$L_{cz} \approx 0.2 \frac{E \delta_c}{(1 - \nu^2) \sigma_{\max}} = 0.4 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{\max}} \right)^2 \quad (3)$$

هر چه اندازه منطقه رشد بزرگتر باشد نسبت اندازه نوک ترک به کل منطقه کوچک‌تر می‌شود و حل عددی به شرایط خطی نزدیک‌تر می‌شود. از سوی دیگر بزرگ انتخاب کردن منطقه رشد باید به حدی باشد که از اندازه مش<sup>۷</sup>ها بیشتر نشود؛ در غیر این صورت رشد ترک در ماده با واقعیت تطابق نخواهد داشت؛ خصوصاً در هنگام باربرداری<sup>۸</sup> ترک رشد نمی‌کند. اندازه مش هزینه محاسباتی را تعیین می‌کند و با سعی و خطا زمان مناسب محاسباتی برای مدلی که این مسأله حل شده است با مشی حدود ۱ میکرون بدست می‌آید. با لحاظ این شرایط حدودی برای معیار شروع آسیب بدست می‌آید که در عبارت (۴) مشهود است.

$$L_{cz} < 10^{-6} \rightarrow \sigma_{\max} > 455 \text{MPa} \quad (4)$$

از سوی دیگر مقدار جدایش بحرانی نیز طبق رابطه (۱) با مقدار کشش بحرانی مرتبط است و باید دارای شرایط خطی بودن (کمتر از ۱۰٪ ناحیه رشد ترک چسبناکی) باشد. بنابراین اگر مقدار بالا برای کف کشش بحرانی فرض شود مقدار حداکثر جدایش بحرانی برابر با رابطه (۵) است.

$$\sigma_{\max} > 455 \text{MPa} \rightarrow \delta_{\max} < 38 \text{nm} < \frac{1 \mu\text{m}}{10} = 100 \text{nm} \quad (5)$$

شرط محدود کننده بعدی تنش تسلیم ماده است. این ماده به صورت الاستیک-پلاستیک ایده‌آل در نظر گرفته شده است و حداکثر تنش کششی به مقدار به  $(\sigma_0/3)$  محدود می‌شود [۱۱] و در شرایطی که کشش بحرانی از این مقدار بیشتر باشد در شبیه‌سازی ماده پیش از جوانه زنی و رشد ترک دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. با توجه به این که مقدار تنش تسلیم این ماده در منابع ۳/۵GPa ذکر شده است [۱۳، ۱۲]، بنابراین محدوده سقف تنش از رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$\sigma_0 = 3.5 \text{GPa}, \sigma_{\max} < \frac{\sigma_0}{3} \rightarrow \sigma_{\max} < 1200 \text{MPa} \quad (6)$$

با توجه به این که حدود معیار دوم بدست آمد می‌توان از آن برای حصول معیار اول یا همان مولفه اول استفاده کرد. همان‌طور که در نمودار کشش-جدایش در شکل ۱ مشخص است،  $K_{nn}$  (شیب کشش به جدایش) در کمترین مقدار زمانی قرار می‌گیرد که پس رسیدن به نقطه آغاز آسیب بلافاصله اتصال آسیب کامل ببیند؛ بنابراین می‌تواند برای آن یک حد بالا تعریف شود. با توجه

با در نظر گرفتن المان حجمی نماینده و اتصال چسبناک شبیه‌سازی کرده و دانه ساینده را همانند ابزاری تک لبه فرض کرده است که با ماده برخورد می‌کند و این برخورد موجب آسیب اتصال می‌شود و عمق نفوذ این آسیب میزان تخریب سلامت سطح سرامیک در اثر فرایند ماشین‌کاری را نشان می‌دهد. ترکیب تئوری‌های شکست را با نظریه ناحیه چسبندگی می‌توان در تحقیقات لی و همکارانش مشاهده کرد [۸]. در این پژوهش ترک میانی ایجاد شده در اثر نفوذ<sup>۱</sup> نوک تیز در یک ماده ترد به صورت عام به وسیله اتصال چسبناک شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است ترک‌های ایجاد شده در سطح و زیر سطح قطعه در اثر براده‌برداری مکانیکی از نظر شکل‌شناسی<sup>۲</sup> به ۶ دسته تقسیم می‌شوند که ترک میانی عمیق‌ترین نوع است که بیشترین نفوذ را دارد و در شیشه ترک میانی را با ترک نیم-سکه‌ای<sup>۳</sup> برابر می‌دانند.

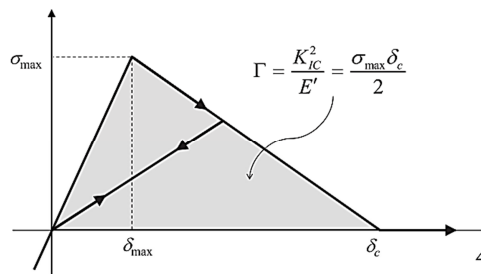
## ۲-۲- پیکره بندی مدل عددی

در مدل‌سازی عددی پدیده جوانه‌زنی و رشد ترک وجود متغیرهای متعدد و در عین حال مرتبط با فیزیک شکست کمک می‌کند تا انعطاف‌پذیری افزایش یابد و امکان حصول نتایج دقیق فراهم گردد. روش ناحیه چسبناک بر پایه رفتار کشش-جدایش<sup>۴</sup> نهاده شده است که در قالب یک ساختار ماتریسی قابل تعریف است و معیار توسعه آسیب را براساس تئوری گریفیت سطح زیر این نمودار در نظر گرفته می‌شود و به صورت رابطه (۱) قابل بیان است. این عبارت به صورت شماتیک در شکل ۱ نمایش داده شده است.

$$\tau = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_c = \frac{K_{IC}^2}{E} = \frac{K_{IC}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (1)$$

همان‌طور که در شکل نیز مشخص است این رابطه شکست بدون بازگشت تعریف می‌شود و هنگامی که آسیب آغاز می‌شود، توسعه آسیب غیر قابل ترمیم خواهد بود. در مدل عددی فرض بر این قرار می‌گیرد که ترک زمانی جوانه می‌زند که آسیب تکمیل شده است و نواحی که آسیب کامل نیست مستعد جوانه زنی است. این تعریف به شبیه‌سازی بهتر شکست ترد کمک می‌کند زیرا همان‌طور که لاون در تعریف خود از شکست ترد در اثر نفوذ نوک تیز مطرح می‌کند رشد ترک ثانویه در اثر فشار هیدرواستاتیک ناشی از تنش پسماند پس از باربرداری ایجاد می‌شود [۹].

از سوی دیگر رشد ترک در مواد ترد در اثر تنش کششی ایجاد می‌شود و توسعه می‌یابد و بنابراین با شرایط ریاضی چسبناکی منطبق است. مشخصه چسبناکی از سه مولفه اصلی شامل شیب نمودار تا پیش از شروع آسیب (نسبت کشش به جدایش)، تنش شروع آسیب و انرژی آسیب تشکیل می‌شود که با توجه به شرایط ماده، فیزیک مسأله و مدل عددی موردنظر برای حل مسأله تعیین می‌شود.



شکل ۱ نمودار کشش-جدایش و انرژی شکست [۸]

5. Micro Vickers hardness test  
6. Bridging zone  
7. Mesh  
8. Unloading

1. Indentation  
2. Morphology  
3. Half-penny  
4. traction-separation

نتایج در جدول ۱ مقایسه شده است. لازم به ذکر است در عبارات ۸ و ۹،  $P$  نیروی وارده بر نوک ویکرز است که در این آزمایش تقریباً برابر با ۵ نیوتون است.

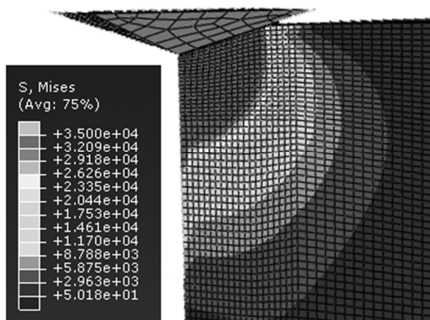
در شبیه‌سازی عددی آزمایش میکرو-ویکرز، به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی و همچنین با لحاظ کردن تقارن هندسی، ماده به صورت یک چهارم مدل شده است. اندازه مش در حدود یک میکرون در ناحیه توسعه ترک در نظر گرفته شده است و در محل توسعه ترک که مشخصاً در راستای یال‌های هرم ویکرز استاز اتصال چسبناک استفاده شده است. هدف رسیدن به نتایج مشابه با واقعیت براساس متغیرهای نیروی وارده و ابعاد هندسی ترک است. جدول ۲ سعی و خطاهای انجام شده در محدوده مشخص شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که جدول نشان می‌دهد اولین ردیف نتیجه مطلوب است. مطلوبیت براساس مشابهت نیروی ویکرز و نسبت ترک‌های ایجاد شده در مدل با آزمایش میکرو ویکرز کانتورهای تنش و شکل ترک نیز براساس نتایج ردیف اول جدول ۲ به صورت شکل ۴ است. همان‌طور که در این تصویر دیده می‌شود در نواحی منحنی شکل زیر نوک ویکرز ماده در سطح تنش پلاستیک قرار دارند و این تنش‌ها مرز ترک‌های نیم سکه‌ای را نشان می‌دهد. از متغیرهای چسبناکی حاصل شده در این مدل، در مدل المان محدود میکروخرایش بهره گرفته شده است. در میکروخرایش فرض بر آن قرار دارد که یک نوک مخروطی در راستایی مشخص در ازای هر ۵۰ میلی‌متر پیشروی افقی، ۱ میکرون در عمق ماده نفوذ می‌کند و در اثر این نفوذ با افزایش عمق، رژیم براده‌برداری از شکل‌پذیری به ترد تغییر می‌کند و در نقطه آغاز تغییر رژیم ترک‌ها افزایش چشم‌گیری می‌یابد. در شکل ۵ نواحی آسیب نمایش

جدول ۱ مقایسه نتیجه آزمایش میکرو-ویکرز و مراجع

مأخذ اطلاعات خواص	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$H$ (GPa)
نمونه مورد آزمایش	۷۲/۰	۹/۵
نتایج آزمایش در مقاله مرجع [۱۲]	۸۶/۰	۲/۵

جدول ۲ خروجی حل مدل المان محدود

وضعیت	نیروی ویکرز (N)	$c/a$	$\tau$ (Pa.N)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$k_{nn}$
مطلوب	۸/۵	۳	۶۴/۸	۶۴۰	۵۲
نامطلوب	۹/۶	۸/۱	۶۴/۸	۶۴۰	۲/۵
نامطلوب	۳/۴	۲/۳	۶۴/۸	۶۴۰	۵۲۰
نامطلوب	۸/۶	۱/۱	۴/۸۶	۶۴۰	۵۲
نامطلوب	۲/۴	۴	۸۶/۰	۶۴۰	۵۲
نامطلوب	۸/۶	۹/۰	۶۴/۸	۶۴	۵۲
نامطلوب	۱/۷	۸/۰	۶۴/۸	۶۴۰۰	۵۲



شکل ۴ کانتورهای تنش ماده در اثر سوزن میکرو-ویکرز در مدل المان محدود

به این نتیجه‌گیری رابطه (۷) را به عنوان یک کران برای شیب در نظر گرفت.

$$K_{nm} = \frac{\sigma_c}{\delta_c} = \frac{455 \text{ MPa}}{38 \text{ nm}} = 11.97 \text{ MPa} \cdot \text{nm}^{-1} \quad (7)$$

مجموعه این حدود کمک می‌کند که حل مسأله عددی و انتخاب متغیرها با کمترین مقدار سعی و خطا حاصل شود.

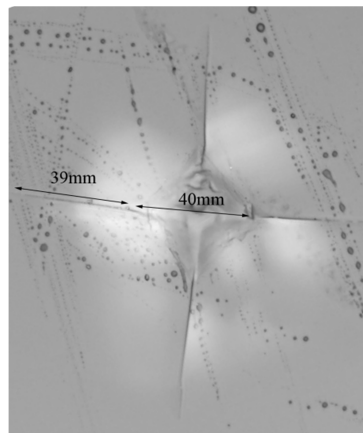
### ۳- نتایج مدل عددی

مدل‌سازی عددی این مسأله به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس<sup>۱</sup> انجام شده است. ابتدا برای بدست آوردن متغیرهای چسبناکی که در بخش قبل بیان شد از شبیه‌سازی آزمایش میکرو-ویکرز استفاده می‌شود. آزمایشی بر روی نمونه بلوک‌های شیشه BK7 با وزنه ۵۰۰ گرمی انجام شده است که ترک ایجاد شده به صورت شماتیک در شکل ۲ قابل مشاهده است. در آزمایش انجام شده طول ترک‌های حاصل در راستای یال‌های هرم ویکرز،  $l$  برابر ۳۹ میکرون است و اندازه  $a$  مقدار نفوذ نوک ویکرز برابر ۲۰ میکرون است. اثر نوک ویکرز بر روی شیشه BK7 در شکل ۲ دیده می‌شود. نوع ترک ایجاد شده در آزمایش میکرو-ویکرز از نوع نیم-سکه‌ای است که از نظر اندازه با ترک میانی برابری می‌کند. این نوع ترک به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

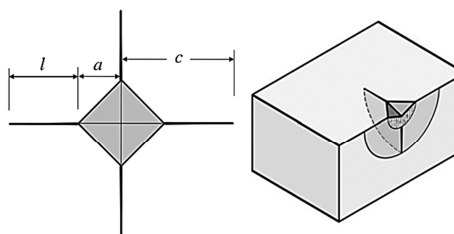
به منظور صحت‌یابی نتیجه این آزمایش و طول ترک به دست آمده می‌توان مقدار استحکام شکست و سختی که با توجه به طول ترک حاصل می‌شود با مراجع مقایسه کرد. این دو مقدار از روابط (۸) و (۹) بدست می‌آید [۱۲].

$$H = \frac{1.8564 \times P}{(2 \times a)^2} \quad (8)$$

$$K_{IC} = 0.016 \times \sqrt{\frac{E P}{H (l)^{1.5}}} \quad (9)$$



شکل ۲ اثر نوک ویکرز بر روی شیشه BK7 در اثر نیروی ۵۰۰ گرمی



الف - اثر سوزن ویکرز و طول ترک

ب- ترک نوع نیم-سکه‌ای

شکل ۳ نوع ترک و اثر نوک میکرو ویکرز [۸]

است که در آن تغییرات رشد ترک با نفوذ تدریجی نوک مخروط تیز در امتداد شیار قابل مشاهده است.

#### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله تلاش شده است نحوه ایجاد یک مدل المان محدود برای پیش جوانه زنی و رشد ترک در شیشه BK7 توسعه یابد. با توجه به این که امکان خطا در طراحی مدل عددی وجود دارد نکته ای باید مدنظر قرار داد طراحی مراحل صحت یابی مدل است. آزمایش میکرو-ویکرز با توجه به در دسترس بودن و همچنین کفایت داده برای کالیبره کردن این مدل که بر پایه روش ناحیه چسبناک قرار داده شده است مناسب تشخیص داده شد و نتایج مدل نیز در آزمایش میکروخرش انطباق مطلوبی با واقعیت دارد.

#### ۶- فهرست علائم

$\delta_{max}$	مقدار جدایش در شروع آسیب
$\dot{E}$	ضریب الاستیسیته شیشه با در نظر گرفتن ضریب پواسون
$K_{nn}$	شیب کشش به جدایش
$K_{IC}$	استحکام شکست بحرانی شیشه
$L_{cz}$	منطقه رشد ترک چسبناکی
$\delta_c$	حداکثر جدایش - تکمیل آسیب
$\sigma_0$	تنش تسلیم
$\sigma_{max}$	حداکثر کشش - شروع آسیب
H	سختی
P	نیروی سوزن ویکرز
E	ضریب الاستیسیته شیشه
a	نصف قطر مقطع سوزن ویکرز
l	طول ترک
$\tau$	انرژی شکست
$\theta$	ضریب پواسون شیشه

#### ۷- مراجع

- [1] M. Salahshoor, Y.B. Gou, Surface integrity of magnesium-calcium implants processed by synergistic dry cutting-finish burnishing, *Procedia Engineering*, Vol.19, PP. 288 – 293, 2011 .
- [2] J.H. Giovanola, I.H. Finnie, On the machining of glass, *Journal of Materials Science*, Vol. 15, pp. 2508–2514, 1980.
- [3] K.E. Puttick, M.R. Rudman, K.J. Smith, A. Franks, K. Lindsey, Single-point diamond machining of glasses, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol.426, pp. 19–30, 1989.
- [4] T.G. Bifano, T.A. Dow, R.O. Scattergood, Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle material, *Journal of Engineering for Industry*, Vol.113, pp.184–189, 1991.
- [5] J. Yan, M. Yoshino, T. Kuriyagawa, T. Shirakashi, K. Syoji, R. Komanduri, On the ductile machining of silicon for micro electro-mechanical systems (MEMS), opto-electronic and optical Applications, *Materials Science and Engineering*, Vol.297, pp. 230–234, 2001.
- [6] V. Siva, X.P. Li, S.Y. Liang, Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3306–3319, 2009.
- [7] J. Fang, *Microgrinding of Ceramic*, Ph.D dissertation, University of Michigan, 2010.
- [8] J.H. Lee et al., Cohesive interface simulation of indentation cracking as fracture toughness measurement method for brittle material, *Acta Materialia*, Vol. 60, pp. 5448–5467, 2012.
- [9] B.R. Lawn, A.G. Evans, A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields, *Journal of Materials Science*, Vol.12, pp. 2195–2199, 1977.
- [10] Y.F. Gao, A.F. Bower, A simple technique for avoiding convergence problems in finite element simulations of crack nucleation and growth on cohesive interfaces, *Modelling and simulation material science and engineering*, pp. 1894–1902, 2004.
- [11] K.L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge university press, 1985.

داده شده است. در المان هایی که اتصال آن آسیب صد درصدی داشته و مقدار آسیب یک است، ترک ایجاد شده و در تصویر با عنوان ناحیه ترک رشد یافته نشان داده شده است. در ناحیه در آستانه ایجاد ترک آسیب وجود دارد اما ترکی شکل نگرفته است.

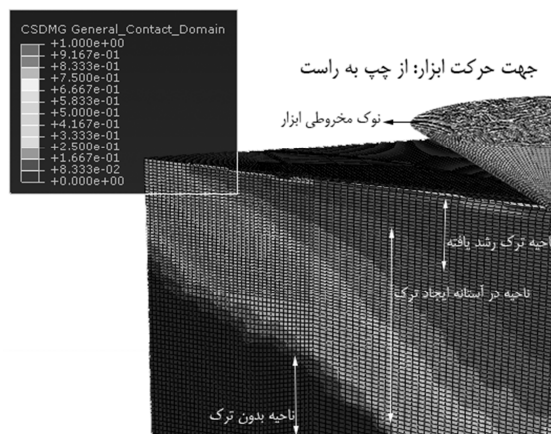
نتایج این مدل عددی با نتایج حاصل از میکروخرش انجام شده که در بخش بعد تجهیزات آزمایشگاهی آن شرح داده می شود مقایسه شده است. با توجه به شباهت ساختاری میکروخرش با میکرو ماشین کاری متعامد از این داده ها برای تعیین عمق ترک در اثر براده برداری میکرو ماشین کاری استفاده می شود.

#### ۴- تجهیزات آزمایش میکروخرش

با توجه به این که دستگاه میکروخرش مناسب با نیاز در کشور وجود ندارد، از دستگاه فرز CNC به نحوی کمک گرفته شده است تا بتوان به نتایج مطلوب دست یافت. همان طور که در شکل ۶ دیده می شود، قطعه کار بر روی ترازوی دیجیتال با دقت دهم گرم محکم شده است و جابجایی صفحه آن توسط ساعت اندازه گیری با دقت میکرونی اندازه گیری می شود.

در این آزمایش طبق برنامه داده شده به ماشین، ابزار مخروطی با سرعت یکنواخت در راستای طولی و عمقی حرکت می کند و در حین حرکت میزان نیرو با دقت دهم گرم مشاهده و ثبت می شود و از سوی دیگر ساعت اندازه گیری مقدار جابجایی صفحه را که برابر جابجایی قطعه است نشان می دهد. از تفاضل این جابجایی از مقدار جابجایی ابزار که توسط نمایش گر CNC مشخص می شود، اندازه نفوذ ابزار در داخل قطعه بدست می آید.

نتیجه حاصل از این آزمایش در زیر میکروسکوپ نوری میکرونی مشاهده شده



شکل ۵ آسیب های ایجاد شده در اثر میکرو خراش



شکل ۶ تجهیزات آزمایشگاهی میکرو خراش

indentation test, *International journal of Engineering material*, Vol. 103, pp. 217-220, 1995.

[12].C.Lambropolous, Surface Microroughness of Optical Glasses under Deterministic Microgrinding, *Applied optics*, Vol. 35, pp. 4448-4462, 1996.  
[13].Gubicza, characterization of glasses and ceramics by continuous