



# مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه شهرداد

## تحلیل تجربی پارامترهای لازم در بارگذاری‌های مختلف برای محاسبه چقرمگی شکست به روش سطح اثر ترک در آزمون ویکرز

علیرضا مرادخانی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا بهاروندی<sup>۲</sup> و مهدی تاجداری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> مدرس دانشگاه آزاد اسلامی، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شرق

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۳</sup> استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات مرکزی اراک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۴/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۸

### چکیده

تعیین چقرمگی شکست از روش سطح اثر ترک ناشی از آزمون ویکرز در مواد ترد از روش‌های نو بوده که بتازگی ابداع شده است. در این مقاله به بررسی تجربی معادله حاکم بر این روش پرداخته شده و اثرات ایجاد تراشه در نمونه‌ها بر روی نتایج و نیز شرایط مرزی حاکم در این روش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از اینرو برای تعیین این پارامترها از انواع نانوکامپوزیتها که شامل موادی نظیر  $Al_2O_3-NanoSiC$ ،  $Al_2O_3-NanoSiC-MgO$ ،  $B_4C-NanoTiB_2-Ni-Fe$  با انواع بارگذاری‌های مختلف الماس ویکرز استفاده شده است؛ تا گستردگی خواص مکانیکی نمونه‌های تحت بررسی موجب رسیدن به نتایج دقیق‌تر مسئله گردد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که نوسانات ناشی از تغییرات میزان بارگذاری، تغییرات خواص مکانیکی ناشی از بکارگیری نمونه‌های مختلف و مکانیزم‌های مختلف رشد ترک موجب ایجاد اختلافاتی ناچیز در یک بازه مشخص برای کاربرد معادله مذکور بود و نیز شرایط مرزی وابسته به آنها را حاصل آورد.

**کلمات کلیدی:** چقرمگی شکست؛ مواد ترد؛ آزمایش ویکرز؛ نانوکامپوزیت؛ روش سطح اثر ترک.

### Experimental analysis of parameters needed for calculation of fracture toughness using surface cracks generated by Vickers test at different loads

A. Moradkhani<sup>1,\*</sup>, H. Baharvadi<sup>2</sup> and M. Tajdari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lect. at Mech. Eng., East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mat. Eng., MalekAshtar University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Prof., Mech. Eng., Science and Research Branch., Islamic Azad University, Arak, Iran

### Abstract

Using surface cracks generated by Vickers test is one of the new and low cost methods for determining the fracture toughness of brittle materials. In this paper, experimental analysis is performed on the equation related to this new method. The effective of creation of chips and boundary conditions are discussed. For this research, various composites like as  $Al_2O_3-NanoSiC$ ،  $Al_2O_3-NanoSiC-MgO$ ،  $B_4C-NanoTiB_2-Ni-Fe$  with different loads are prepared. This research shows a little difference between the results obtained from the mentioned equation in various loading, different mechanical properties and alternation of mechanism of crack growths.

**Keywords:** Fracture toughness; Brittle materials; Vickers test; Nanocomposite; Effect of surface crack.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۵۹۰۷۱۸۴، فکس: ۰۲۱-۲۲۹۳۵۳۴۱

آدرس پست الکترونیک: [moradkhani.a@srbiau.ac.ir](mailto:moradkhani.a@srbiau.ac.ir)

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌هایی که برای تعیین چقرمگی شکست مواد ترد در چند دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است؛ استفاده از اثر فرورونده‌های مختلف است. تنوع هندسی این فرورونده‌ها با سرعت چشمگیری در حال افزایش است؛ بطوریکه تاکنون فرورونده‌هایی نظیر نوپ<sup>۱</sup>، مخروطی<sup>۲</sup>، هرم سه وجهی<sup>۳</sup> و الماس ویکرز<sup>۴</sup> در این راستا بکار گرفته شده‌اند [۱ و ۲].

اگر چه این وسعت تنوع هندسی موجب گستردگی تحقیقات درباره عملکرد و نتایج ناشی از آنها شده است؛ اما تاکنون بیشتر تحقیقات در رابطه با ارتباط چقرمگی شکست با شکل شناسی<sup>۵</sup> اثر بجا مانده از فرورونده ویکرز انجام گرفته است. علت این موضوع مورفولوژی بهتر ترک‌های تشکیل یافته در برقراری ارتباط با چقرمگی شکست نسبت به دیگر آزمون‌های سختی سنجی می‌باشد [۳ و ۴]. احتمالاً دلیل این موضوع در کنترل بهتر ایجاد تراشه<sup>۶</sup> در طول انجام فرایند است. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۵۷ توسط پالمکوئیست<sup>۷</sup> [۵] ابداع شد. پس از آن تحقیقات فراوانی در این خصوص انجام گرفت و نقطه مشترک کلیه تحقیقات، این موضوع بود که طول ترک‌های ایجاد شده در اطراف بخش فرورفته از نمونه را طبق ضوابط مشخص و با حداکثر دقت ممکن به چقرمگی شکست نمونه‌ها مرتبط کنند و تا حدود زیادی این امر تحقق یافت. با اینحال مشکلاتی در میزان دقت نتایج خروجی از معادلات، چگونگی تعیین مقدار ضریب معادلات و مقدار بار اعمالی به فرورونده و مسائل مرتبط به آنها همواره بچشم می‌خورد [۶].

در این راستا تنها معادله حاکم که سعی در ارتباط سطح اثر ترک (بجای طول ترک) با چقرمگی شکست را داشته، توسط مراذخانی و همکارانش [۷] بتازگی ابداع شد. کارایی این معادله تنها برای تعداد محدودی از مواد ترد که با شرایط متفاوت نسبت به یکدیگر ساخته شده‌اند؛ به

اثبات رسیده است [۳، ۴، ۷ و ۸]. از طرفی در خصوص چگونگی محاسبه سطح اثر و ضخامت میکروتُرک در نمونه‌ها و شرایط مرزی حاکم برای بکارگیری معادله نیز تحقیق چندانی صورت نگرفته است.

از اینرو در این پژوهش سعی بر آن شده از روش تحلیل عددی، سطح اثر و ضخامت پروفیل میکروتُرکها برای برخی مواد ترد و پرکاربرد همچون  $Al_2O_3-6\%NanoSiC$ ،  $Al_2O_3-12\%NanoSiC-1\%MgO$ ،  $Al_2O_3-18\%NanoSiC-3\%MgO$ ،  $B_4C-8\%NanoTiB_2-3\%Ni-2\%Fe$ ،  $B_4C-8\%NanoTiB_2-3\%Ni-3\%Fe$  بدست آیند تا ضمن مقایسه آن با نتایج پژوهش‌های قبلی در راستای محاسبه سطح اثر ترک، اطمینان از صحت کلیه محاسبات قبلی حاصل آید. همچنین به بررسی دقیقتر شرایط مرزی جهت بکارگیری معادله مذکور پرداخته خواهد شد. از اینرو در جهت تحقق اهداف ذکر شده، ایجاد میکروتُرکها با اندازه‌های متفاوت لازم خواهد بود و برای اینکار تغییرات مقدار بارگذاری الماس ویکرز را لازم است.

در این پژوهش سعی بر آن شده با انجام نوسانات لازم در میزان بارگذاری بهنگام انجام آزمایش به بررسی عددی چگونگی محاسبه سطح اثر و ضخامت میکروتُرکها پرداخته شود. از اینرو در ادامه به بیان تئوری دقیق مسئله پرداخته خواهد شد.

## ۲- تئوری مسئله و مواد مورد آزمایش

معادله چقرمگی شکست ناشی شده از محاسبه سطح اثر ترک نمونه‌ها دارای پارامترهای گوناگونی است و این پارامترها را می‌توان به دو بخش مستقل و غیر مستقل تقسیم کرد. بدین معنا که برخی از آنها بطور مستقل بیانگر یکی از خواص مکانیکی (مدول الاستیسیته<sup>۸</sup> و سختی ویکرز<sup>۹</sup>) ماده می‌باشند و برخی دیگر تنها بمنظور محاسبه چقرمگی شکست در معادله منظور شده و به خودی خود بیانگر خاصیتی از ماده نیستند. این معادله در زیر نشان داده شده است [۷]:

$$K_{IC} = 0.003655 \left( \frac{E}{Hv} \right)^{\frac{1}{2}} t_{Ave}^{\frac{3}{2}} \frac{P}{A^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

<sup>۸</sup> Modulus of elasticity

<sup>۹</sup> Vickers Hardness

<sup>۱</sup> Knoop

<sup>۲</sup> Conical

<sup>۳</sup> Bercovich

<sup>۴</sup> Vickers

<sup>۵</sup> Morphology

<sup>۶</sup> Chipping

<sup>۷</sup> Palmqvist

شده است. از آنجایی که تغییرات احتمالی در مقدار این ضریب در راستای دقت خروجی معادله، خود بحثی گسترده بوده و پژوهش مجزایی را می‌طلبد؛ از بررسی آن در این پژوهش خودداری و به ضریب اصلاح شده قبلی بسنده می‌گردد. از این‌رو دایره تجزیه و تحلیل پارامترها به سطح اثر و ضخامت میکروتُرکها محدود می‌شود. برای تنوع هرچه بیشتر ترکهای تشکیل یافته، نوسانات بارگذاری در نمونه‌ها مورد نیاز است. بنابراین در مقدار P معادله نیز به تناسب ماده مورد آزمایش نوساناتی گنجانده شد تا بازه گوناگونی ترکها بیشتر گردد.

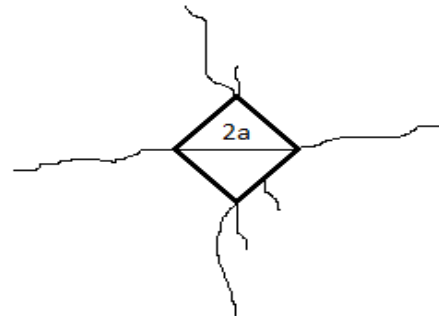
برای جامع بودن شرایط مورد نیاز جهت بحث و بررسی دقیق‌تر، از نانوکامپوزیت‌های  $Al_2O_3$ -%6NanoSiC,  $Al_2O_3$ -%12NanoSiC-%1MgO,  $Al_2O_3$ -%18NanoSiC-%3MgO,  $B_4C$ -%8NanoTiB<sub>2</sub>-%3Ni-%2Fe,  $B_4C$ -%8NanoTiB<sub>2</sub>-%3Ni-%3Fe استفاده شد که برای راحتی بیان مطالب، از این پس نمونه‌ها بترتیب با کدهای S1, S2, S3, S4, S5 نمایش داده می‌شوند. کلیه افزودنی‌هایی که در نانوکامپوزیتها اشاره گردیدند، برحسب درصد حجمی تشکیل دهنده از ماده است. خواص مکانیکی مورد نیاز، مقدار بارگذاری که در هر نمونه به الماس ویکرز وارد می‌آید و شرایط زینتر آنها نیز در جدول ۱ منظور شده است. مقدار بازه نیروی اعمالی با توجه به انجام آزمون‌های تجربی انتخاب شد. به این ترتیب که با اعمال کمتر از ۷۰N بار به الماس ویکرز مقدار ترکهای شکل گرفته برای رسیدن به چقرمگی شکست ناچیز بود و با اعمال بیش از ۱۵۰N نیز پدیده Chipping یا ایجاد تراشه در نمونه‌ها رخ می‌داد.

جدول ۱- میزان بارگذاری اعمالی در حین انجام آزمایشات، خواص مکانیکی و دمای زینتر در نمونه‌ها

| ردیف | میزان بارگذاری (N) | مدول یانگ (GPa) | سختی (GPa) | دمای زینتر (°C) | کد |
|------|--------------------|-----------------|------------|-----------------|----|
|      |                    |                 |            |                 |    |
| S1   | *                  | ۴۰۴             | ۱۵         | ۱۸۰۰            |    |
| S2   | *                  | ۴۳۰             | ۱۹/۸       | ۱۸۰۰            |    |
| S3   | *                  | ۳۴۰             | ۱۳/۲       | ۱۸۰۰            |    |
| S4   | *                  | ۴۶۳             | ۳۱/۴       | ۲۱۰۰            |    |
| S5   | *                  | ۴۸۰             | ۳۳         | ۲۱۰۰            |    |

در رابطه (۱) مقادیر  $K_{IC}$ ، بیانگر چقرمگی شکست بر حسب  $MPa.m^{1/2}$ ، میزان بارگذاری الماس ویکرز بر حسب E، مدول الاستیسیته نمونه بر حسب Hv، GPa، سختی ویکرز نمونه بر حسب  $t_{Ave}$ ، GPa، ضخامت میانگین پروفیل میکروتُرک‌های تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته در نمونه بر حسب A، mm، مساحت سطح اثر کل میکروتُرک‌های تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته بر حسب  $mm^2$  می‌باشد. در مورد خصوصیات پارامترهای یاد شده و چگونگی ارتباط آنها به  $K_{IC}$ ، مرادخانی و همکارانش در مرجع شماره [۴] به تفصیل سخن گفته‌اند.

شکل ۱ نشان دهنده شماتیک کلی اثر بجا مانده از فرورونده ویکرز در سطح نمونه می‌باشد که در آن a مقدار نصف اثر تصویر ویکرز در نمونه است. این شکل بیانگر وجود ترکهای نامنظمی است که ممکن است بشکل زیگزاگی پیشروی کرده و در اطراف بخش فرورفته در نمونه تشکیل شود.



شکل ۱- شماتیک کلی اثر بجا مانده از فرورونده ویکرز در نمونه ترد

از آنجایی که مقادیر مدول الاستیسیته و سختی از خواص مستقل ماده هستند لذا در این پژوهش در خصوص چگونگی تاثیر آنها بر روی معادله بحث مفصلی نخواهد شد. مقدار ضریب تجربی درج شده در رابطه (۱) نیز در فعالیت پژوهشی دیگری از مولفین این مقاله [۳] بررسی شده است. همچنین ضریب درج شده در معادله، همان ضریب اصلاح

<sup>1</sup> Average thickness of the micro crack profile

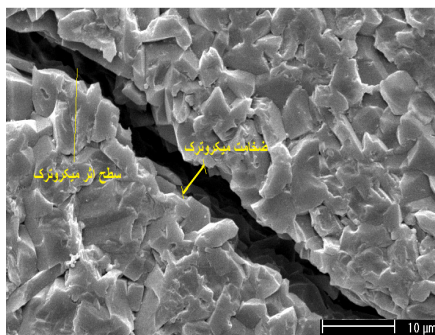
میانگین ضخامت میکروتُرک‌ها در معادله در نظر گرفته می‌شده است. بدیهی است این موضوع دقت خروجی نتایج را تحت تاثیر قرار می‌داد و گستردگی آن را تا حد قابل توجهی کاهش می‌داد. برخلاف پژوهش‌های قبلی، روند محاسبات برای تمامی مقادیر ضخامت میکروتُرک‌ها که بطور گسترده و تصادفی در نمونه‌های آزمون شده بدست آمده‌اند؛ در این پژوهش برای محاسبه منظور خواهند شد. از اینرو معادله (۱) بصورت (۲) بازنویسی می‌شود:

$$K_{IC} = 0.003655 \left( \frac{E}{Hv} \right)^{\frac{1}{2}} t^{\frac{3}{2}} \frac{P}{A^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

از مقایسه روابط (۱) و (۲) چنین برمی‌آید که اختلاف موجود بین آنها تنها در پارامتر ضخامت میکروتُرک ( $t$ ) است که در رابطه (۲) قیدی برای آن مطرح نشده است. دیگر پارامترهای موجود تغییری نکرده‌اند و تعریف آنها همانند تعاریف پارامترهای رابطه (۱) است. آنچنان که از رابطه (۲) بدیهی است، حجم محاسبات بشکل تصاعدی افزایش چشمگیری خواهد یافت. افزایش این مقدار از محاسبات برای محک زدن دقت معادله و نیز تغییرات احتمالی در ضریب یا دیگر پارامترهای آن و تحلیل و ارزیابی معادله مفید خواهد بود.

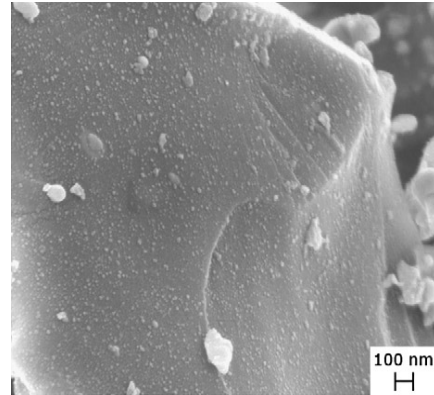
### ۳- بحث در نتایج

در شکل‌های ۴ تا ۸، ترک‌های شکل یافته در برخی از نمونه‌ها در بارگذاری‌های مختلف که در اطراف بخش فرورفته از آزمون ویکرز ایجاد شده‌اند؛ مشاهده می‌شوند.

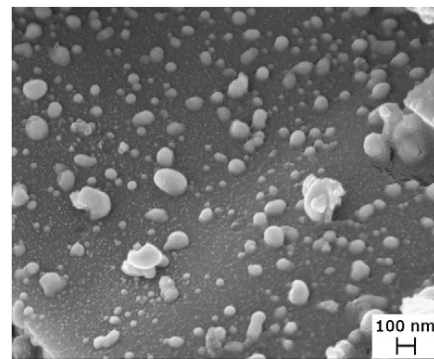


شکل ۴- تصویر ریزساختار (SEM) ترک در نمونه S1 با بارگذاری ۱۰۰N

در شکل‌های ۲ و ۳ تصویر نمونه‌های S1 و S4 در ابعاد نانومتر پس از عملیات زینترینگ نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویر نانومتری نمونه S1

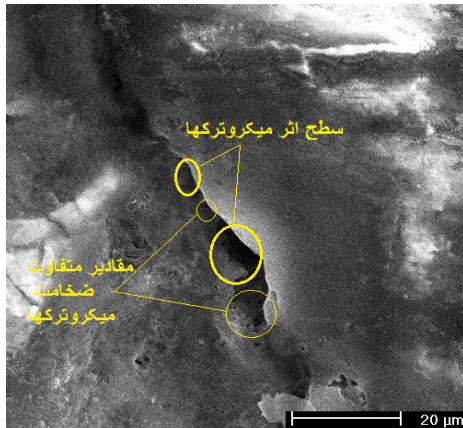


شکل ۳- تصویر نانومتری نمونه S4

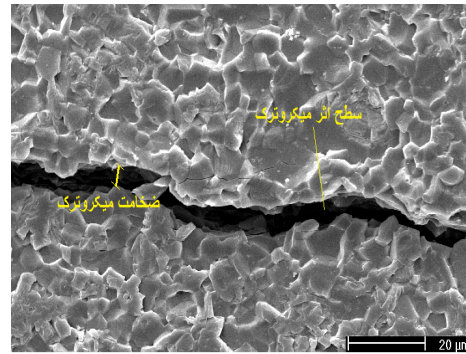
در ادامه به بررسی محاسبات لازم جهت تعیین پارامترهای ذکر شده برای هر نمونه پرداخته خواهد شد.

### ۲-۱- چگونگی تعیین سطح اثر و ضخامت میکروتُرک‌ها

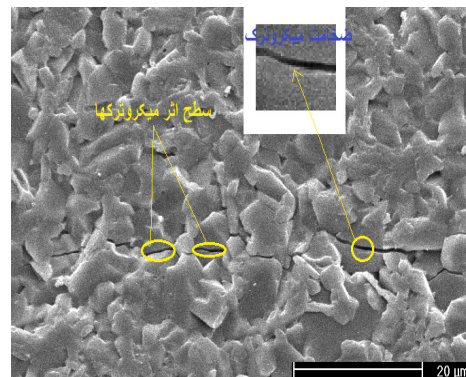
آنچنان که ذکر شد برای محاسبه مقدار چقرمگی شکست به مقدار پارامترهای غیر مستقلی نظیر سطح اثر و ضخامت میکروتُرک‌ها نیاز است. مقدار این دو پارامتر بشکل تقریبی برای برخی از کامپوزیتهایی که در دهامای مختلف زینتر ساخته شده بودند؛ بدست آمده است [۳ و ۸]. نکته قابل توجه در روند محاسبه این دو پارامتر که با دقت در معادله (۱) بدست می‌آید؛ این است که در پژوهش‌های قبلی مقادیر



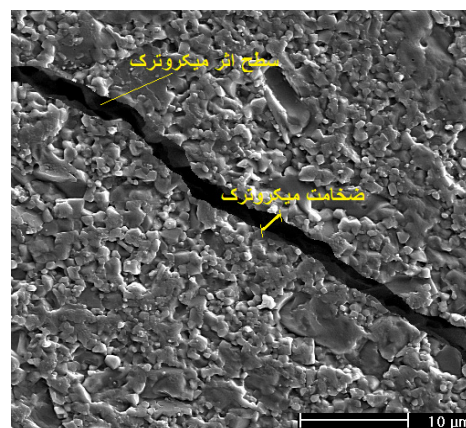
شکل ۸- تصویر ریزساختار (SEM) ترک در نمونه S5 با بارگذاری ۱۰۰N



شکل ۵- تصویر ریزساختار (SEM) ترک در نمونه S2 با بارگذاری ۱۰۰N



شکل ۶- تصویر ریزساختار (SEM) ترک در نمونه S3 با بارگذاری ۷۰N



شکل ۷- تصویر ریزساختار (SEM) ترک در نمونه S4 با بارگذاری ۱۵۰N

چنانچه به چگونگی رشد ترک‌ها دقت شود به میزان اثر گذاری مقدار بارگذاری الماس و ویکرز و جنس نمونه‌ها در مکانیزم رشد ترک پی برده می‌شود. در واقع با افزایش بارگذاری، میزان رشد عرضی و طولی ترکها در نمونه‌ها افزایش خواهد یافت و با بیشتر ترد شدن نمونه‌ها نیز رشد ترک به نوعی غیر قابل پیشبینی شده و حرکات زیگزاگی آن نیز بمراتب بیشتر می‌شود.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مقادیر ضخامت میکروترکها نیز با ۱۶ مرتبه اندازه‌گیری توسط نرم افزار ایمج آنالایزر<sup>۱</sup> نشان داده شده است. مقادیر سطح اثر ترک ایجاد شده در نمونه‌ها نیز با ۱۲ مرتبه اندازه‌گیری توسط همان نرم افزار انجام و به تفکیک میزان بارگذاری در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. همچنین مقادیر چقرمگی شکست برای کلیه نمونه‌های S1-S5 در بارگذاریهای مختلف به ازای مقادیر اندازه‌گیری شده برای سطح اثر ترک و ضخامت میکروترکها در کلیه نمونه‌ها که توسط رابطه (۲) محاسبه شده، در شکل-های ۱۵ تا ۱۷ قابل مشاهده است.

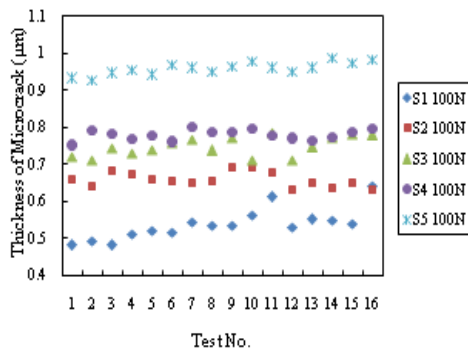
از شکل‌های ۹ تا ۱۱ می‌توان دریافت که مقادیر ضخامت میکروترکها برای اندازه‌گیریهای مختلف و تصادفی در بارگذاریهای اعمال شده بر روی نمونه‌ها جز در مواردی خاص (نمونه S1 در بارگذاری ۷۰N و S5 در بارگذاری ۱۵۰N) در یک بازه محدود قرار داشته و روند تغییرات آن نسبت به

<sup>1</sup> Image Analyzer Softwar

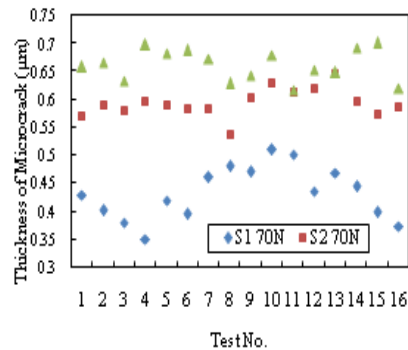
نمونه‌ها اتفاق افتاده است و احتمالاً علت آن در میزان بارگذاری بیش از حد و نزدیک شدن به شرایط مرزی ایجاد تراشه در نمونه‌ها است.

تفاوت‌های ایجاد شده در مقادیر ضخامت و سطح اثر ترکها مربوط به تغییرات مقادیر بارگذاری الماس و ویکرز، موقعیتهای مختلف اندازه‌گیری (فاصله مختلف اندازه‌گیری از مرکز هرم بر جای مانده تا محل مورد اندازه‌گیری)، وجود عیوب در نمونه‌ها، تغییرات میکروسکوپی مواد و خطای حاصل از اندازه‌گیری مربوط می باشد [۴].

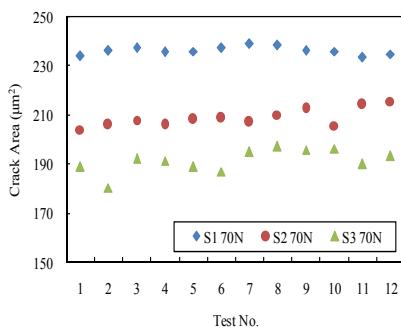
تغییرات پیوسته در شکل ترک بشکل تدریجی اتفاق می‌افتد. از اینرو می‌توان پی برد که نیازی به انجام محاسبات گسترده جهت تعیین آنها نیست و افزایش چشمگیر دقت در نتایج را در پی نخواهد داشت. تغییرات غیر معقول ایجاد شده در نمونه‌ها بدلیل وجود حفرات، ناخالصیهای موجود در نمونه‌ها و دمای ناکارآمد زینتر جهت آماده سازی آنهاست. چنانچه اینگونه تغییرات در دیگر نمونه‌ها نیز مشاهده شده بود [۹]. تغییرات پرنوسان موجود در تعیین مقادیر سطح اثر ترک برای نمونه‌های S1-S5 به ازای بارگذاری ۱۵۰N (شکل ۱۴) نیز بشکل تدریجی بوده و تنها برای این مقدار بارگذاری در



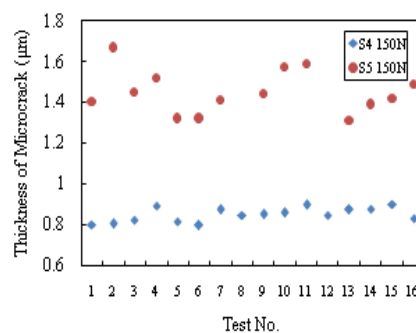
شکل ۱۰- مقادیر ضخامت میکروتُرکها برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۱۰۰N



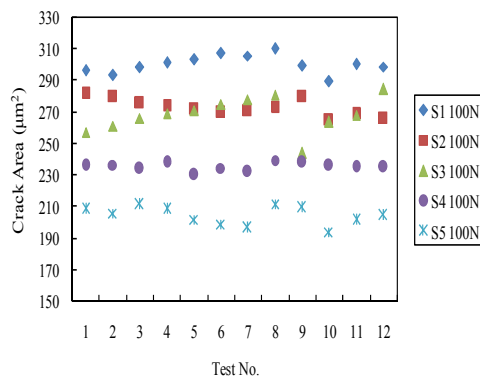
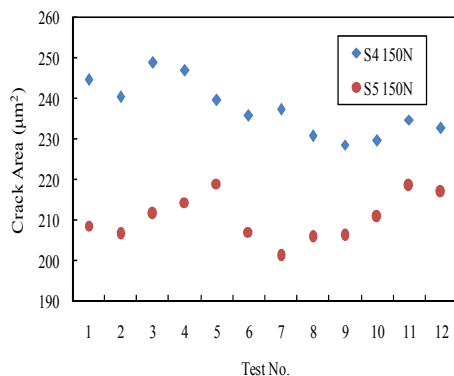
شکل ۹- مقادیر ضخامت میکروتُرکها برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۷۰N



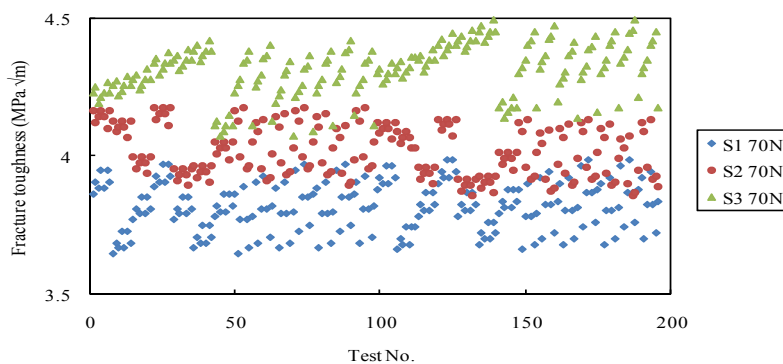
شکل ۱۲- مقادیر سطح اثر ترکها برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۷۰N



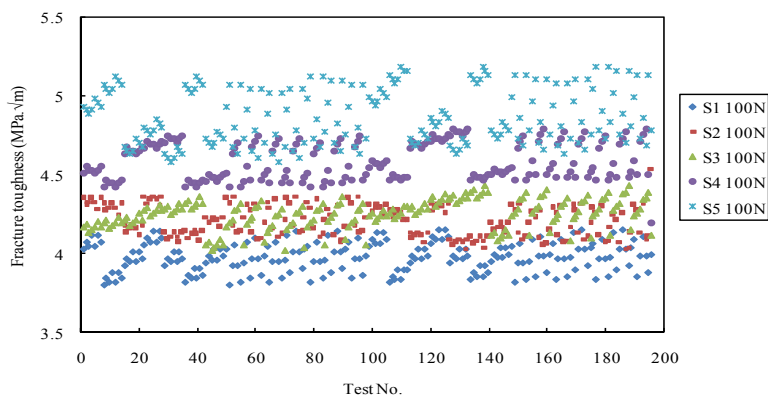
شکل ۱۱- مقادیر ضخامت میکروتُرکها برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۱۵۰N



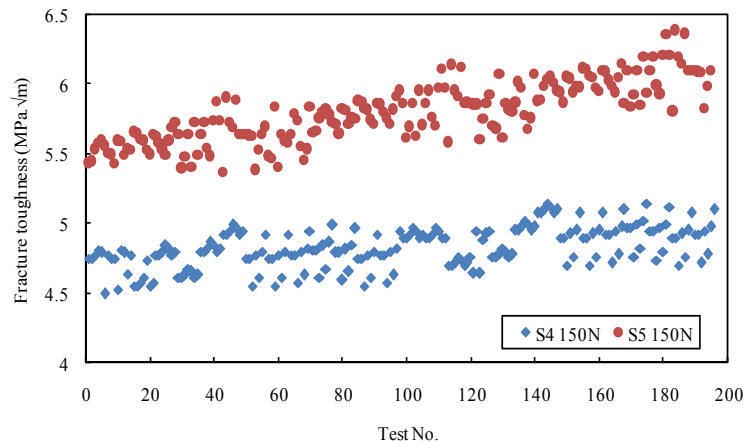
شکل ۱۳- مقادیر سطح اثر ترکها برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۱۰۰N  
شکل ۱۴- مقادیر سطح اثر ترکها برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۱۵۰N



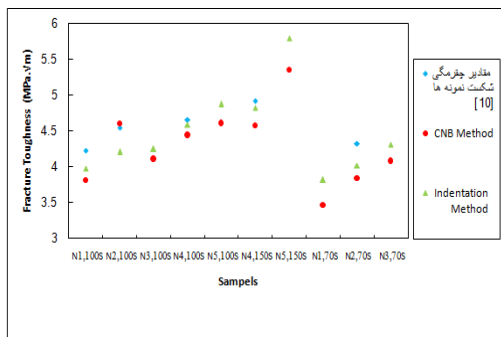
شکل ۱۵- مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده با رابطه (۲) برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۷۰N



شکل ۱۶- مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده با رابطه (۲) برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۱۰۰N



شکل ۱۷- مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده با رابطه (۲) برای نمونه‌های S1-S5 در بارگذاری ۱۵۰N



شکل ۱۸- مقادیر میانگین چقرمگی شکست محاسبه شده از رابطه (۲) برای کلیه نمونه‌ها در بارگذاری‌های مختلف و مقایسه آنها با نتایج دیگر

جدول ۲- مقادیر Max (A) و Min (B) و بازه تغییرات بین

| مقادیر Max & Min (C) |      |      |          |
|----------------------|------|------|----------|
| C                    | B    | A    | کد نمونه |
| 0.35                 | 3.8  | 4.15 | S1, 100N |
| 0.51                 | 4.03 | 4.54 | S2, 100N |
| 0.42                 | 4.01 | 4.43 | S3, 100N |
| 0.61                 | 4.19 | 4.8  | S4, 100N |
| 0.6                  | 4.58 | 5.18 | S5, 100N |
| 0.65                 | 4.5  | 5.15 | S4, 150N |
| 1.02                 | 5.37 | 6.39 | S5, 150N |
| 0.34                 | 3.65 | 3.99 | S1, 70N  |
| 0.32                 | 3.86 | 4.18 | S2, 70N  |
| 0.42                 | 4.07 | 4.49 | S3, 70N  |

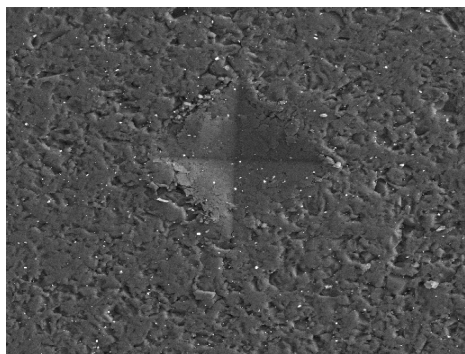
با معدل گیری از مقادیر بدست آمده در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، مقدار چقرمگی شکست نمونه‌ها بدست می‌آید. با توجه به مقدار بازه خروجی بدست آمده در محور عمودی از نمودارها، می‌توان به نزدیکی مقادیر چقرمگی شکست پی برد. شکل ۱۸ مقادیر میانگین تغییرات چقرمگی شکست به ازای تغییرات بارگذاری را نشان داده و این مقادیر را نسبت به نتایج دیگر محققین و روش CNB مورد مقایسه قرار می‌دهد. همچنین در جدول ۲ مقادیر چقرمگی شکست ماکزیمم و مینیمم حاصل از داده‌های موجود در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ را به همراه بازه تغییرات بین این دو مقدار برای نمونه‌ها نشان داده شده است.

از آنجایی که مقدار چقرمگی شکست برای نمونه‌ها نباید با تغییرات بارگذاری تغییر نماید، اما تغییرات محدودی در این زمینه مشاهده شده که منجر به بروز خطا در محاسبات نتایج چقرمگی شکست به روش آزمون فرورفتگی ویکرز می‌گردد. این موضوع بیانگر نقطه ضعف و ناکارآمدی این روش نسبت به روشهای مرسوم و پرهزینه دیگر همچون روش‌های SENB, SEVNB, SEPB,... است. از طرفی این موضوع توجه به شرایط مرزی در جریان انجام آزمایشات را مهم جلوه می‌دهد. به ویژه اینکه با افزایش میزان بارگذاری تا مقدار ۱۵۰N در نمونه‌های S5، میزان این تغییرات بسیار بیشتر می‌شود.

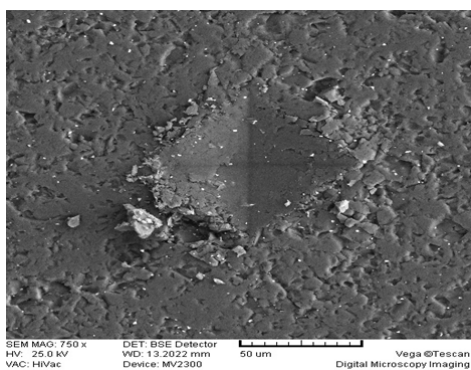


که این میزان انرژی در محاسبه چقرمگی شکست نتیجه شده از معادله (۲) و دیگر معادلات ارائه شده در این زمینه نادیده در نظر گرفته می‌شود [۷]. از اینرو مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌هایی که در آنها تراشه ایجاد شده، همراه با خطای بسیاری می‌گردد.

حال چنانچه کمتر از اندازه لازم، بارگذاری به الماس ویکرز اعمال شود؛ ترکهای مورد نیاز جهت محاسبه و تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ها بوجود نخواهد آمد و در عمل تعیین چقرمگی شکست ناممکن و یا با بروز خطاهای بسیار همراه خواهد شد. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ بترتیب اثر بجا مانده از فرورونده ویکرز با میزان بارگذاری ۴۵N و ۵۵N را که به نمونه‌های S2 و S3 وارد آمده را نشان می‌دهد.

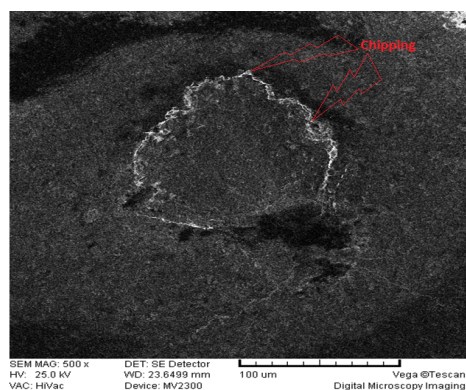


شکل ۲۱- تصویر اثر ویکرز بر روی نمونه S2 در بارگذاری ۴۵ N

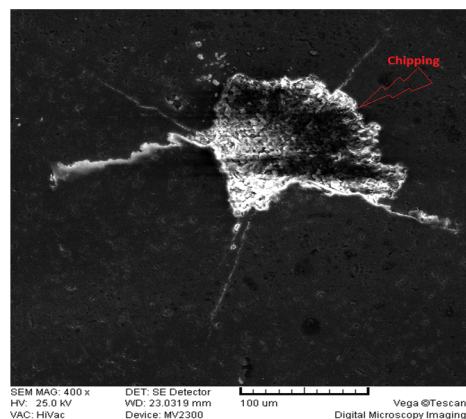


شکل ۲۲- تصویر اثر ویکرز بر روی نمونه S3 در بارگذاری ۵۵ N

در واقع چنانچه برای انجام آزمایشات مقادیر بیش از اندازه لازم در بارگذاری را به الماس ویکرز اعمال کرد؛ پدیده ایجاد تراشه در نمونه‌ها رخ می‌دهد. شکل ۱۹ و ۲۰ اثر بجا مانده از نمونه را بترتیب با مقدار بارگذاری ۱۹۶N بر الماس ویکرز در نمونه S4 و ۲۲۰N در نمونه S5 را نشان می‌دهد. آنچنانچه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود؛ این میزان از بارگذاری تراشه در نمونه‌ها ایجاد می‌کند و موجب بروز خطا در محاسبه چقرمگی شکست خواهد شد.



شکل ۱۹- تصویر اثر ویکرز بر روی نمونه S4 در بارگذاری ۱۹۶ N



شکل ۲۰- تصویر اثر ویکرز بر روی نمونه S5 در بارگذاری ۲۲۰ N

بر اساس تئوری گریفیث<sup>۱</sup> در شکست اجسام ترد، مقداری انرژی صرف شکل‌گیری تراشه در نمونه‌ها می‌گردند. در حالی

<sup>۱</sup> Griffith theory

در حین انجام آزمون در محدوده مجاز باشد؛ مقدار چقرمگی شکست حاصل شده از دقت قابل قبولی برخوردار خواهد شد. اما این موضوع بدان معنا نیست که مقادیر انتخاب شده خارج از محدوده این جدول حتماً منجر به بروز خطا خواهند شد. چرا که تخلخل موجود در نمونه‌ها، شرایط زینتر و محیطی، چگونگی وارد کردن بار (اعم از عمود بودن و یا تدریجی بودن آن) و خطای ناشی از تجهیزات و خطای انسانی منجر به تغییرات جزئی نتایج خواهند شد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی شکل شناسی رفتار ترک رشد یافته در اطراف بخش فرورفته از نمونه در آزمون ویکرز و تعیین گسترده پارامترهای مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های مختلف از مواد ترد با استفاده از روش سطح اثر ترک پرداخته شد. محاسبات ریاضی بحث شده در این پژوهش می‌تواند جهت بررسی دیگر پارامترها (مانند توان‌های موجود در پارامترهای معادله) بکار گرفته و آنها را در جهت افزایش دقت معادله بهبود داد. از طرفی تمامی مقادیر محاسبه شده از ضخامت میکروتورها و سطح اثر آنها (بجز در مواردی خاص) در یک بازه منطقی و قابل قبول قرار داشته و این مفهوم را می‌رساند که نیازی به انجام محاسبات گسترده آنها جهت دست یافتن به مقادیر دقیقتر چقرمگی شکست نیست.

در این روش بازه میزان بارگذاری فرورونده ویکرز اهمیت بسیاری در نتایج چقرمگی شکست را دارد. چنانچه میزان بارگذاری بیش از حد مجاز در نمونه‌ها باشد موجب ایجاد تراشه در آنها شده و نتایج حاصل شده را با خطا همراه خواهد کرد. در صورتی که مقدار آن کمتر از حد لازم باشد تعیین چقرمگی شکست امکان پذیر نخواهد بود.

برای دست یافتن به روند آسانتر تعیین چقرمگی شکست از طریق روش سطح اثر ترک در آزمون ویکرز، بهتر است میزان بارگذاری در غالب استانداردهایی تنظیم و ارائه شود. استاندارد نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش در بازه‌های متفاوتی بدست آمد. مقدار کل این بازه برای کلیه نمونه‌های مورد بررسی از ۵۵N تا ۱۶۰N بدست آمد. بازه یاد شده برای هر نمونه متفاوت است و مقدار بازه نمونه S3 از دیگر نمونه‌ها بیشتر است. بطور کلی این موضوع تنها از طریق انجام آزمایشات تجربی قابل تعیین است.

برای رفع اینگونه مشکلات در روند انجام آزمایشات، بهتر است بازه‌ای برای مقدار بارگذاری در نمونه‌های مختلف تعیین کرد و مقدار بارگذاری‌ها را مطابق آن در نظر گرفت. در واقع با استاندارد سازی میزان بارگذاری به انواع مواد، دست یافتن به نتایج دقیق، کاهش زمان و کاهش هزینه‌های ناشی از انجام آزمایشات مکرر در پی خواهد بود. باید توجه داشت چگونگی تعیین این بازه‌ها و استاندارد سازی آنها که بر مبنای مقدار تردی مواد نسبت به یکدیگر انجام می‌گیرد؛ کاملاً بر اساس روشهای تجربی است. از اینرو برای دستیابی به اطلاعات جامع‌تر، افزایش وسعت پژوهشها در این زمینه نیاز است. به هر ترتیب جدول ۳ بازه بارگذاری مجاز در نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش را نشان می‌دهد که با تغییر میزان بارگذاری وارد شده به نمونه‌ها حاصل شده‌اند.

جدول ۳- بازه بارگذاری‌های قابل قبول نمونه‌های مورد آزمایش در بارهای مختلف

| باز | میزان بارگذاری (N) |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |
|-----|--------------------|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|
|     | ۱۰                 | ۲۰ | ۳۰ | ۴۰ | ۵۰ |   |   |   |   |   |   |
| S1  | x                  | x  | x  | x  | x  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| S2  | x                  | x  | x  | x  | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x | x |
| S3  | x                  | x  | x  | ✓  | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x | x |
| S4  | x                  | x  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓ | ✓ | x | x | x | x |
| S5  | x                  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓ | x | x | x | x | x |

برای نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش و بطور کلی برای دیگر مواد تردی که مقدار تردی آنها در این محدوده قرار دارند می‌توان از این بازه بارگذاری برای رسیدن به بالاترین دقت در نتایج خروجی چقرمگی شکست نمونه‌ها استفاده کرد. در جدول ۳ علامت ✓ نشان دهنده بارگذاری اعمال شده بر نمونه و علامت x نمایانگر آن است که مقدار بار مورد نظر بر نمونه اعمال نشده است. در واقع این جدول جهت انتخاب مناسب میزان بارگذاری الماس ویکرز برای تعیین چقرمگی شکست مواد از روش اثر فرورفتگی آزمون ویکرز ارائه شده است. آنچه از جدول ۳ نتیجه می‌شود این است که چنانچه میزان بارگذاری وارد شده به الماس ویکرز

- [5] Palmqvist S (1957) Indentation hardness and fracture toughness in single crystal. *Jernkontorets Ann* 141: 300–306.
- [6] Anatis GR, ChantikulP, Lawn BR, Marshall DB (1981) A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, direct crack measurements. *Journal of the American Ceramic Society* 64(9): 533–538.
- [۷] مرادخانی عر، بهاروندی حر، تاجداری م، وفایی صفت ع (۱۳۹۰) تحلیل و بررسی چقرمگی شکست با استفاده از فرورونده ویکرز در سرامیک‌های نانوکامپوزیت  $Al_2O_3-SiC$ . *مجله علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مجلسی* ۴(۳): ۱۱–۱.
- [8] Moradkhani AR, Baharvandi HR, Vafaeesefat A, Tajdari M (2012) Microstructure and mechanical properties of  $Al_2O_3-SiC$  nanocomposites with 0.05% MgO and different SiC volume fraction. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* 5(3): 99–105.
- [۹] مرادخانی عر، بهاروندی حر، تاجداری م، احمدی ح (۱۳۹۰) بررسی خواص مکانیکی سرامیک‌های  $Al_2O_3-nanoSiC$  تولید شده به روش پرس گرم در دماهای مختلف زینتر. *مجله علمی پژوهشی مکانیک دانشگاه تبریز* ۴۱(۱): ۴۷–۵۷.
- [10] Jeong YK, Niihara K (2011) Microstructure and properties of alumina-silicon carbide nanocomposites fabricated by pressureless sintering and post hot-isostatic pressing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 21: 1–6.

### تقدیر و تشکر

بدین وسیله از مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر بخاطر تقبل هزینه‌های این پژوهش و سرکار خانم رحیمی کمال تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

### مراجع

- [1] Sakharova NA, Fernandes JV, Antunes JM, Oliveira MC (2009) Comparison between Berkovich, Vickers and conical indentation tests: A three-dimensional numerical simulation study. *Int JSolids Struct* 46: 1095–1104.
- [2] Min L, Wei-min C, Nai-gang L, Ling-dong W (2004) A numerical study of indentation using indenters of different geometry. *J Mater Res* 19: 73–78.
- [۳] تاجداری م، بهاروندی حر، مرادخانی عر (۱۳۹۲) اصلاح دقت ضریب معادله چقرمگی شکست منتج از روش سطح اثر ترک‌های نامنظم ایجاد شده با آزمایش ویکرز در مواد مرکب  $B_4C-C$ . *مجله علمی پژوهشی مکانیک مدرس* ۱۳(۲): ۱۲–۲۱.
- [4] Moradkhani AR, Baharvandi HR, Tajdari M, Latifi HR, Martikainen J (2013) Determination of fracture toughness using the areas of microcrack tracks left in brittle materials by Vickers indentation test. *Journal of Advanced Ceramic* 2(1): 87–102.