



اصلاح دقت ضریب معادله چقرمگی شکست منتج از روش سطح اثر ترک‌های نامنظم ایجاد شده با آزمایش ویکرز در مواد مرکب B₄C-C

مهدی تاجداری^{۱*}، حمیدرضا بهاروندی^۲، علیرضا مرادخانی^۳

۱- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات مرکزی، اراک

۲- دانشیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

* اراک، صندوق پستی ۳۸۱۸۱۴۶۷۷۵، tajdari@iuim.ac.ir

چکیده- یکی از روش‌های نو و پرکاربردی که اخیراً جهت تعیین چقرمگی شکست مواد ترد ابداع شده است؛ استفاده از روش آزمایش ویکرز و معادلات ارائه شده در این راستاست. تنوع معادلات این روش، زیاد و عموماً بر پایه اصل ارتباطدهی بین طول ترک‌های ایجاد شده در اطراف بخش فرورفته ناشی از آزمایش ویکرز در نمونه با چقرمگی شکست است. یکی از معادلات ارائه شده در این روش بر پایه اصل ارتباطدهی بین سطح اثر ترک‌های ایجاد شده در نمونه با چقرمگی شکست می‌باشد. در این پژوهش به بررسی و اصلاح دقت ضریب نیمه‌تجربی معادله مذکور پرداخته می‌شود. این موضوع به کمک انجام آزمایشات برای تعیین چقرمگی شکست در نمونه‌های B₄C بدون افزودنی و حاوی ۵ درصد وزنی رزین فنولیک انجام می‌گیرد. افزایش دقت ضریب این معادله، موجب وسعت کاربرد و افزایش دقت مقادیر خروجی چقرمگی شکست به‌دست آمده از این معادله خواهد شد.

کلیدواژگان: چقرمگی شکست، مواد ترد، آزمایش ویکرز، مواد مرکب

Modification the accuracy of fracture toughness equation coefficients resulting from irregular surface cracks generated by Vickers test of B₄C-C composites

M. Tajdari^{1*}, H. R. Baharvandi², A. R. Moradkhani³

1- Prof., Mech. Eng., Science & Research Branch, Islamic Azad Univ., Arak, Iran

2- Assoc. Prof., Mat. Eng., Malek Ashtar Univ., Tehran, Iran

3- MSc., Mech Eng., Science & Research Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran

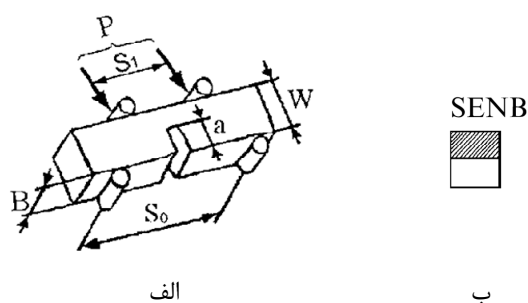
* P.O.B. 3818146775 Arak, tajdari@iuim.ac.ir

Abstract- Vickers test method and many equations presented by researchers are used for determining the fracture toughness of brittle materials. These equations are generally based on the relationship between the crack lengths around the indentation zone of Vickers test and the fracture toughness in the specimen. There is one equation including a semi-empirical coefficient based on the indentation surface and the fracture toughness of the specimen. In this paper, modification the accuracy of semi-empirical coefficient in this equation is studied for determining the fracture toughness of B₄C specimens without additives and containing 5 wt % phenolic resin experimentally. Increasing the accuracy of semi-empirical coefficient leads the increasing the extent of application and accuracy of the results of fracture toughness obtained from the equation.

Keywords: Fracture Toughness, Brittle Materials, Vickers Test, Composite

۱- مقدمه

روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مواد وجود دارد. روش‌های $SENB^1$ ، $SEVNB^2$ ، JSB^3 ، SCF^4 ، $SEPB^5$ ، CNB^6 و DCB^7 از جمله مهم‌ترین آن‌هاست و سال‌هاست که برای تعیین چقرمگی شکست مواد مختلف استفاده می‌شوند [۱]. کاربرد هر یک از این روش‌ها به جنس ماده مورد آزمایش، قابلیت شکل‌پذیری، میزان دقت مورد نیاز مقادیر چقرمگی شکست جهت طراحی‌های مختلف و غیره بستگی دارد. عموماً ساخت نمونه‌های مورد آزمایش در این روش‌ها بسیار زمان‌بر، پرهزینه و در بعضی موارد با عیوب در حین ساخت همراه است. چرا که نمونه‌ها معمولاً دارای اشکال پیچیده و متنوع هستند. شکل ۱ نمونه مورد نیاز جهت آزمایش به روش $SENB$ و سطح مقطع شکست را نشان می‌دهد.



شکل ۱ اندازه‌گیری چقرمگی شکست به روش $SENB$ ، الف) روش انجام آزمایش طبق استاندارد مربوطه، ب) سطح مقطع شکست نمونه بعد از انجام آزمایش [۱]

نمونه‌سازی و آزمایش در سایر روش‌های اشاره شده نیز دارای پیچیدگی‌های مشابه روش $SENB$ است. این پیچیدگی‌ها به‌ویژه برای مواد ترد که قابلیت انعطاف‌پذیری پایینی دارند؛ همواره با مشکلات فراوانی در حین ساخت نمونه همراه است. از این رو روشی که در سه دهه اخیر ارائه شده است، استفاده از روش اثر فرورونده‌هاست^۸ و معمولاً برای مواد ترد به‌کار می‌رود. در این روش ترک‌های کوچک سطحی با اندازه و شکل استاندارد

به‌آسانی توسط انواع فرورونده‌ها همچون فرورونده‌های مخروطی^۹، هرم سه‌وجهی^{۱۰} و هرم چهاروجهی^{۱۱} [۳،۲] تحریک می‌شود و رویکردی از ترک‌های ناشی از اثر به‌جامانده از فرورونده در نمونه ایجاد می‌کنند. نهایتاً شکل‌شناسی^{۱۲} این ترک‌ها منجر به تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ها می‌شود [۴]. در این روش به تجهیزات و ماده خام (از نمونه) کمتری نیاز بوده و سرعت آماده‌سازی نمونه‌ها (به جهت سادگی نمونه‌ها) و انجام آزمایش بر روی آن‌ها نسب به سایر روش‌ها بیشتر است [۵].

از وسعت پژوهش محققان در به‌کارگیری از فرورونده ویکرز چنین تصور می‌شود که کاربرد و استفاده از این نوع فرورونده نسبت به دیگر فرورونده‌ها در تعیین چقرمگی شکست مواد ترد بیشتر است [۲]. دلیل این امر احتمالاً تشکیل ترک‌ها با حداقل ایجاد پلیسه^{۱۳} نسب به دیگر روش‌هاست. بر طبق اصل گریفیث^{۱۴} در تئوری شکست این موضوع باعث افزایش دقت در نتایج چقرمگی شکست خواهد شد [۶].

در این پژوهش، با انجام آزمایشات لازم بر روی نمونه‌های B_4C و B_4C-C ، معادله چقرمگی شکستی را که مرادخانی و همکارانش [۷] بر مبنای استفاده از سطح اثر ترک‌های نامنظم تشکیل یافته در نمونه $Al_2O_3-Nano SiC$ بنیان نهادند به طور مجدد مورد آنالیز قرار داده و ضریب نیمه‌تجربی آن بهبود داده می‌شود. بهبود این ضریب موجب وسعت کارایی معادله مذکور خواهد شد.

۲- مروری بر معادلات حاکم بر چقرمگی شکست

از روش آزمایش فرورفتگی ویکرز

دسته‌بندی معادلات چقرمگی شکست به طریق آزمایش فرورفتگی^{۱۵} ویکرز به روش‌های مختلف امکان‌پذیر است. در یک نوع از دسته‌بندی می‌توان آن‌ها را به چهار بخش تقسیم کرد. بخش اول معادلات پالمکوویست^{۱۶} برای مواد با تردی نسبی پایین (چقرمگی بالاتر) و بخش دوم معادلات ترک شعاعی^{۱۷} یا

9. Conical
10. Bercovich
11. Vickers
12. Morphology
13. Chipping
14. Griffith
15. Indentation
16. Palmqvist
17. Half-Penny

1. Single Edge Notch Beam
2. Single Edge V-Notch Beam
3. Indentation Strength in Bending
4. Surface Crack in Flexure
5. Single Edge Pre-cracked Beam
6. Chevron Notched Beam
7. Double-Cantilever Beam
8. Indenter

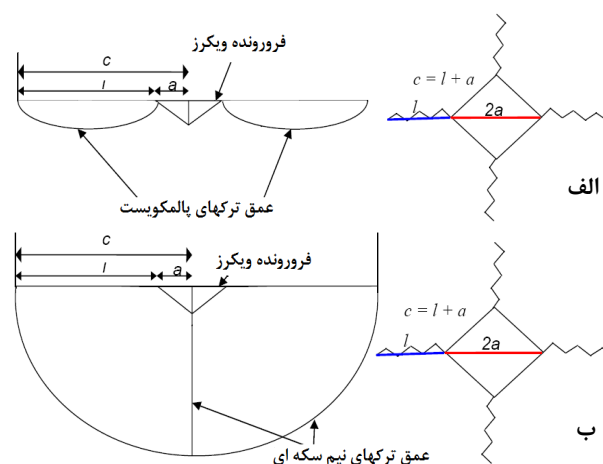
بخش سوم از معادلات ذکر شده، بر اساس روش خوراندن منحنی^۲ در نظر گرفته شده و در یک بخش طبقه‌بندی شده است. در بخش چهارم نیز فقط یک معادله گنجانده شده که بر مبنای روش استفاده از سطح اثر ترک جهت تعیین چقرمگی شکست مواد ترد است. ضریب نیمه‌تجربی معادلات بخش اول و دوم از طریق راهکارهای ریاضی به همراه آزمایشات تجربی؛ ضریب معادلات بخش سوم از راهکارهای ریاضی، آزمایشات تجربی به همراه انجام تغییراتی در آن از طریق سعی و خطا و مقایسه با دیگر مقادیر حاصل شده چقرمگی شکست از سایر روش‌ها در دیگر مواد ترد به دست آمده‌اند. دلیل انجام این تغییرات در ضریب معادلات بخش سوم وجود پارامترهایی همچون تغییرات جنس نمونه، تغییرات میزان بارگذاری، وجود ناخالصی‌ها در نمونه‌ها و غیره است که منجر به پایین آمدن دقت خروجی معادلات بخش اول و دوم می‌شوند. این موضوع محققین را وادار به انجام تغییرات در ضریب معادلات نمود تا از این بخش از معادلات، چقرمگی شکست کلیه مواد ترد با خطای کمتر قابل محاسبه شوند و تا حدودی نیز موفق به انجام این کار شدند.

معادله بخش چهارم از جدیدترین معادلات بوده و تنها از انجام آزمایشات مربوطه و استفاده از راهکارهای ریاضی جهت به دست آوردن ضریب معادله استفاده می‌شود. نتایج خروجی از این معادله برای تعداد محدودی از مواد ترد آزمایش شد و نتایج بسیار خوبی را نشان داد. جدول ۱ برخی از معادلات بیان شده در هر بخش را نشان داده است (معادلات ۱ تا ۱۶). در جدول ۱ مقادیر K_{IC} بیانگر چقرمگی شکست برحسب $MPa \cdot m^{1/2}$ ، P ، میزان بارگذاری الماس ویکرز، برحسب N ، مقدار طول ترک برحسب E ، مدول یانگ نمونه برحسب GPa ، Hv ، سختی ویکرز نمونه برحسب GPa ، a ، نصف قطر بخش فرورفته در نمونه برحسب t_{Ave} ، ضخامت میانگین میکروتورک‌های تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته در نمونه بر حسب mm ، مساحت سطح اثر کل میکروتورک‌های تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته بر حسب mm^2 می‌باشد. همچنین مقادیر y و F به ترتیب برابرند با [۱۹]:

$$y = -1.59 - 0.34x - 2.02x^2 + 11.23x^3 - 24.97x^4 + 15.32x^5 \quad (17)$$

نیم‌سکه‌ای^۱ برای مواد با تردی بالاتر (چقرمگی پایین‌تر) در نظر گرفته شده‌اند. در مدل پالمکویست طول ترک‌های شکل گرفته در نمونه را از انتهای نوک بخش فرورفته فرض می‌کنند، در حالی که در مدل شعاعی طول آن‌ها را از مرکز بخش فرورفته تا انتهای طول ترک در نظر می‌گیرند [۶]. تفاوت بین این دو مدل در شکل ۲ به‌وضوح نشان داده شده است.

در شکل ۲، پارامتر ۱ نشان‌دهنده طول ترک از نوک بخش فرورفته در نمونه تا انتهای آن، a نشان‌دهنده نصف قطر بخش فرورفته در نمونه و c مجموع a و ۱ می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که مقادیر این پارامترها، میانگین هر چهار ترک ایجاد شده در اطراف بخش فرورفته است. یعنی مقدار c و ۱ به‌کار گرفته شده همان میانگین طول هر چهار ترک شعاعی می‌باشند. در معروف‌ترین و پرکاربردترین پژوهش‌ها [۶]، نسبت a/c بیانگر نوع رویکرد ترک معرفی شده است. اگر $a/c \geq 2$ باشد، آنگاه مدل ترک، مدل نیم‌سکه‌ای در نظر گرفته می‌شود و اگر $a/c < 2$ باشد، آنگاه مدل ترک به عنوان مدل پالمکویست فرض می‌شود. البته بحث‌ها و دیدگاه‌های متفاوتی در مورد این مقدار و تشخیص رویکرد ترک وجود دارد. به عنوان مثال بات و همکارانش [۸] و بامازی و همکارانش [۹] پیشنهاد دادند که اگر نسبت $a/c \geq 2.5$ باشد، ساختار و مدل ترک‌ها، نیم‌سکه‌ای و اگر $a/c < 2.5$ باشد مدل پالمکویست فرض می‌شود. دوب و همکارش [۱۰] عدد حد مرز این نسبت را جهت برقراری مدل‌ها ۲/۱ به دست آوردند.



شکل ۲ مدل ترک پالمکویست (الف)، مدل ترک شعاعی (ب) [۷]

1. Median crack

2. Curve fitting technique

عموما مبنای به دست آوردن این روابط، از انجام آزمایشات گوناگون بر روی مواد تردی که چقرمگی شکست آنها در یک محدوده خاص قرار داشته آغاز و به دیگر مواد تعمیم یافته است [۶]. معادلات سه بخش اول در بسیاری از مواد با میزان بالای خطای حاصل از تعیین چقرمگی شکست ترد روبرو هستند (در مواردی تا ۳۰ درصد). زیرا عموماً در تمامی مقادیر بارگذاری و بعلت وجود ناخالصی یا تخلخل، در نمونه‌ها ترک‌های نامنظم^۱ شکل گرفته و وجود اینگونه ترک‌ها در میزان دقت مقدار خروجی از معادلات تاثیر مستقیم خواهد گذاشت. از این رو، به کارگیری معادلات بیان شده نیازمند به وجود ترک‌های حتی الامکان مستقیم ایجاد شده در اطراف بخش فرورفته است و تکرار آزمایشات ناشی از این موضوع تا رسیدن به ترک‌های مستقیم موجب ازدیاد هزینه‌ها و صرف زمان بیشتر خواهد شد. اما هزینه‌های آن در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم، ناچیز است. از طرفی چنانچه خواهد آمد مکانیزم پیشروی ترک در نمونه‌ها بشکل زیگزاگ بوده و این موضوع نیز سبب بروز خطا در خروجی معادلات سه بخش اول خواهد بود. این موضوع در تحقیقات محققین پیشین نیز ثابت شده است [۱۱-۱۸].

همچنین در کلیه بارگذاری‌های بالا، مقداری انرژی صرف ایجاد پلیسه در نمونه خواهد شد. این پلیسه‌ها موجب بروز خطا در نتایج معادلات جدول ۱، خواهند شد. باید در نظر داشت با کنترل میزان بارگذاری می‌توان از بروز چنین پدیده‌ای جلوگیری بعمل آورد [۶، ۷].

مقدار ضریب معادله ۱۶ از طریق آزمایش‌های لازم برای نانومواد مرکب آلومینا با درصد‌های مختلف حجمی از کاربرد سیلیسیم برابر با ۰/۰۳۶۹۳ به دست آمده است [۷]. چگونگی محاسبه آن بدین صورت بود که ضریب معادله در یک سمت و دیگر پارامترها (میزان بارگذاری بر روی الماس و یکرز، سختی و یکرز، مدول یانگ نمونه‌ها، چقرمگی شکست نمونه، مقدار ضخامت میانگین ترک‌ها و مقدار مساحت سطح اثر ترک‌ها) در سمت دیگر معادله گنجانده شده و با داشتن مقادیر ذکر شده، مقدار ضریب معادله با یک بازه خطای متغیر کوچک حاصل شد. ضرائب دیگر روابط نیز از همین راه به دست آمده است [۱۱-۱۹]. چنانکه در مرجع [۷] نیز بشکل مفصل بیان شده، مقادیر ضخامت میانگین میکروتورک‌ها (t_{Ave}) و مساحت سطح

$$F = -1.59 - 0.34x - 2.02x^2 + 11.23x^3 - 24.97x^4 + 16.32x^5 \quad (18)$$

مقدار x نیز در روابط (۱۷) و (۱۸) برابر است با:

$$x = \log \left(\frac{c}{a} \right)$$

جدول ۱ برخی معادلات پرکاربرد و مربوط به چقرمگی شکست از طریق روش آزمایش ویکرز [۶، ۷، ۱۱-۲۰]

ردیف	معادله	سیستم ترک	مرجع
۱	$K_{IC} = 0.018Hva^{1/2} \left(\frac{E}{Hv} \right)^{0.4} \left(\frac{c}{a-1} \right)^{-0.5}$	پالمکویست	[۱۱]
۲	$K_{IC} = 0.0515 \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right)$	پالمکویست	[۱۲]
۳	$K_{IC} = 0.079 \left(\frac{P}{a^{3/2}} \right) \text{Log} (4.5 \frac{a}{c})$	پالمکویست	[۱۳]
۴	$K_{IC} = 0.015 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{2/5} \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right) \left(\frac{1}{a} \right)^{-0.5}$	پالمکویست	[۱۴]
۵	$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}}$	نیم‌سکه‌ای	[۶]
۶	$K_{IC} = 0.067Hv \cdot d^{1/2} \left(\frac{E}{Hv} \right)^{2/5} \left(\frac{C}{a} \right)^{3/2}$	نیم‌سکه‌ای	[۱۵]
۷	$K_{IC} = 0.0752 \frac{P}{C^{3/2}}$	نیم‌سکه‌ای	[۱۶]
۸	$K_{IC} = 0.0726 \frac{P}{C^{3/2}}$	نیم‌سکه‌ای	[۱۲]
۹	$K_{IC} = 0.014 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}}$	نیم‌سکه‌ای	[۱۷]
۱۰	$K_{IC} = 0.16Hva^{1/2} \left(\frac{C}{a} \right)^{3/2}$	نیم‌سکه‌ای	[۱۶]
۱۱	$K_{IC} = 0.0089 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{2/5} \left(\frac{P}{ac^{1/2}} \right)$	روش خوراندن منحنی	[۱۵]
۱۲	$K_{IC} = 0.0889 \left(\frac{Hv \cdot P}{\sum_{i=1}^4 c_i} \right)^{1/2}$	روش خوراندن منحنی	[۱۸]
۱۳	$K_{IC} = 0.4636 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{2/5} \frac{P}{a^{3/2}} 10^F$	روش خوراندن منحنی	[۱۹]
۱۴	$K_{IC} = 0.018 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}}$	روش خوراندن منحنی	[۲۰]
۱۵	$K_{IC} = \left(Hva^{1/2} \right) \left(\frac{E}{Hv} \right)^{2/5} 10^y$	روش خوراندن منحنی	[۱۹]
۱۶	$K_{IC} = 0.003693 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} t_{Ave}^{3/2} \frac{P}{A^{3/2}}$	معادله جدید	[۷]

1. Branch crack

۳-۲- چقرمگی شکست نمونه‌ها

جدول ۳ بیانگر مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ها توسط دو روش SENB و SEVNB است. چگونگی محاسبه توسط این روش‌ها به طور مفصل در مراجع [۲۲] تا [۲۵] موجود است. نتایج این روش‌ها از دقت بالایی نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار است [۲۵].

با دقت در مقادیر درج شده در جدول ۳ مقادیر میانگین چقرمگی شکست برای نمونه B_4C برابر با $3/125 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و برای نمونه B_4C-C برابر با $4/35 \text{ MPa.m}^{1/2}$ خواهد شد.

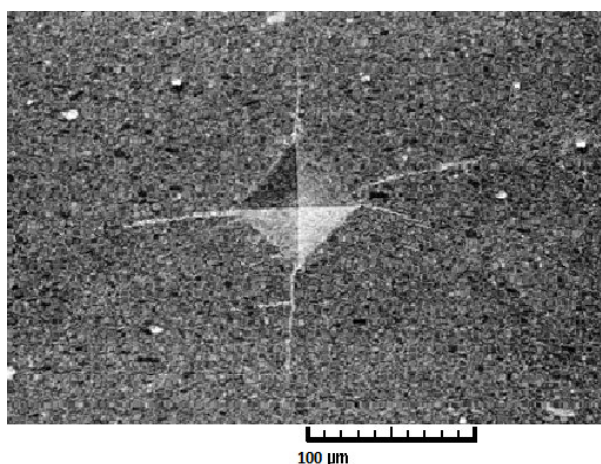
جدول ۳ مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ها توسط روش‌های SENB و

SEVNB برحسب $\text{MPa.m}^{1/2}$

B_4C		B_4C-C	
SEVNB	SENB	SEVNB	SENB
۲/۹	۳/۵	۴/۲	۴/۶
۳/۲	۳/۱	۴/۴	۴/۴
۲/۷	۳/۴	۴/۱	۴/۵
۳/۳	۲/۹	۴/۲	۴/۴

۳-۳- میزان بارگذاری بر الماس ویکرز

نمونه‌های آزمایش چقرمگی شکست به ابعاد $30 \times 30 \times 60 \text{ mm}^3$ ساخته شده و سطح نمونه‌ها با دستگاه پولیش تا دقت ۱ میکرون آماده‌سازی، صیقلی و با اعمال بار عمودی 155 N به مدت 15 S به وسیله دستگاه سختی سنجی اثر گذاری شده است. شکل ۳ و ۴ نمونه‌ای از اثر ویکرز را بر روی هر دو نمونه B_4C و B_4C-C نشان می‌دهد.



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آزمایش ویکرز در نمونه B_4C خالص

اثر کل میکروتورک‌ها (A) توسط نرم‌افزار ایمج آنالایزر^۱ به دست می‌آیند و در معادله گنجانده می‌شوند. چنانچه آن پژوهش بیان می‌کند، با آزمایشات دیگر بر روی سایر مواد ترد قابلیت به کارگیری و دقت این معادله افزایش خواهد یافت. در ادامه به بررسی این معادله پرداخته می‌شود.

هدف از مجموعه آزمایش‌هایی که در ادامه شرح داده می‌شود؛ ساخت قطعات مواد مرکب B_4C-C , B_4C به روش متالورژی پودر و بررسی چقرمگی شکست آن‌ها می‌باشد.

۳-۳- داده‌های حاصل از نتایج تجربی

برای دستیابی به دقت بالاتر ضریب نیمه تجربی معادله (۱۶) نیاز به انجام برخی آزمایش‌ها در جهت تعیین مقادیر پارامترهای موجود در معادله است. از این رو مواد مرکب B_4C-C , B_4C که دارای تردی بالا بوده، انتخاب و در این جهت به کار گرفته شده‌اند. در ادامه به بحث و بررسی نتایج تجربی پرداخته می‌شود.

۳-۱- مدول الاستیسیته و سختی نمونه‌ها

مقادیر مدول الاستیسیته و سختی ویکرز این مواد در فعالیت پژوهشی قبلی دیگری از مولفین این مقاله به دست آمده است [۲۱]. جدول ۲ بیانگر این مقادیر است.

چنانچه یک میانگین از مقادیر جدول ۲ گرفته شود، مقدار سختی ویکرز و مدول یانگ نمونه B_4C به ترتیب برابر با $30/24 \text{ GPa}$ و $445/5 \text{ GPa}$ خواهد شد. مقدار میانگین این دو پارامتر در نمونه B_4C-C نیز به ترتیب برابر با $31/46 \text{ GPa}$ و $464/73 \text{ GPa}$ می‌شود.

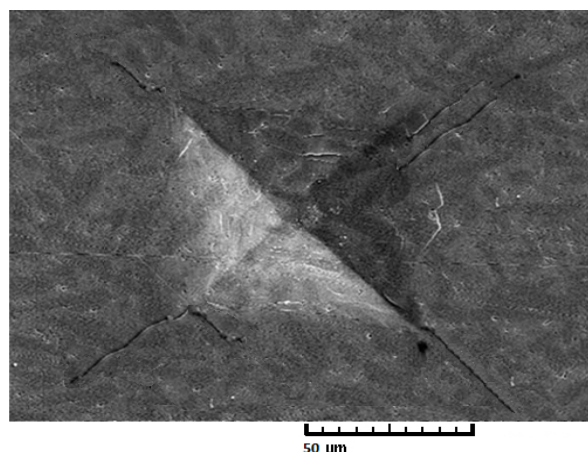
جدول ۲ مقادیر مدول الاستیسیته و سختی ویکرز نمونه‌ها [۲۱]

B_4C		B_4C-C	
مدول یانگ (GPa)	سختی (GPa)	مدول یانگ (GPa)	سختی (GPa)
۴۴۵/۳۴	۳۰/۲۱	۴۶۵/۰۳	۳۱/۴۴
۴۴۴/۱۲	۳۰/۱۶	۴۶۳/۶۷	۳۱/۵۳
۴۴۵/۶۴	۲۹/۲۹	۴۶۸/۶۸	۳۱/۴۸
۴۴۶/۹۳	۳۰/۳۳	۴۶۱/۵۴۱	۳۱/۴۲

1. Image analyzer

جدول ۴ مقادیر اندازه‌گیری شده مقدار ضخامت میکروترک‌ها

برحسب μm		شماره آزمایش
B ₄ C	B ₄ C-C	
۰/۴۱۴	۰/۲۰۵	۱
۰/۴۲۶	۰/۱۹۱	۲
۰/۴۱۶	۰/۲۰۳	۳
۰/۴۰۹	۰/۲۰۷	۴
۰/۴۲۷	۰/۱۹۸	۵
۰/۴۳۴	۰/۱۹۲	۶
۰/۴۲۸	۰/۱۹۸	۷
۰/۴۲۷	۰/۲۰۸	۸
۰/۴۱	۰/۲۱	۹
۰/۴۳۶	۰/۲۰۶	۱۰
۰/۴۲۹	۰/۲۰۱	۱۱
۰/۴۳۵	۰/۱۹۴	۱۲



شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آزمایش ویکرز نمونه B₄C حاوی ۵ درصد وزنی رزین فنولیک

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده در شکل ۳ بیانگر وجود ترک‌های نامنظم در اطراف بخش فرورفته است. این تصاویر با انجام اولین آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها مشاهده شد. وجود ترک‌های نامنظم موجب بروز خطا در خروجی معادلاتی که برحسب طول ترک‌ها (همه معادلات موجود در جدول ۱ به استثنای معادله شماره ۱۶) بنیان نهاده شده‌اند، خواهد شد. این مقدار خطا بسته به نوع رابطه و میزان اثر پذیری آن از طول ترک‌هاست.

۳-۴- مقادیر ضخامت میکروترک‌ها و میانگین مساحت سطح اثر ترک‌ها

مقادیر ضخامت میکروترک‌ها با استفاده از نرم‌افزار ایمیج آنالایزر تعیین شد. این مقادیر در میکروترک‌های Al₂O₃-nanoSiC نیز چند مرتبه اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شدند [۷]. از آنجایی که مواد مرکب B₄C دارای تخلخل هستند [۲۱]، تعداد اندازه‌گیری‌ها با دفعات بیشتری انجام شد تا به نتایج درست‌تری رسید. جدول ۴ مقادیر ضخامت میکروترک‌ها را با ۱۲ مرتبه اندازه‌گیری در هر دو نمونه برحسب میکرومتر را نشان می‌دهد. این مقادیر نتیجه اندازه‌گیری در موقعیت‌های مختلف ترک‌ها بوده و به شکل تصادفی انتخاب شدند. همان‌گونه که از مقادیر به‌دست آمده در جدول مشخص است، داده‌ها در یک بازه محدود به‌دست آمده‌اند، این موضوع ناشی از عدم وجود برخورد ضربه‌ای بین فرورنده و نمونه‌ها می‌باشد و گویای یکنواختی فرآیند آزمایش‌هاست.

با محاسبه مقدار مساحت سطح اثر کل میکروترک‌ها در هر نمونه توسط نرم‌افزار ایمیج آنالایزر مقدار $294 \mu\text{m}^2$ برای نمونه حاوی ۵ درصد وزنی رزین فنولیک و $323 \mu\text{m}^2$ برای نمونه خالص کربید بور به‌دست آمد.

۵-۳- محاسبه ضریب معادله سطح اثر ترک

آنچه گذشت تمام مقادیر لازم، برای محاسبه ضریب بی‌بعد چقرمگی شکست نمونه‌های کربیدبور را مشخص کرد. برای دستیابی به دقت بیشتر مقادیر حاصل‌شده از ضریب بی‌بعد معادله، ضخامت میکروترک‌ها محاسبه و از آنها به شکل تک‌تک در روند محاسبات استفاده شد و از به‌کارگیری مقدار میانگین آنها خودداری شد. معادله (۱۶) به شکل (۱۹) بازنویسی می‌شود.

$$K_{IC} = \beta_1 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} t^{3/2} \frac{P}{A^{3/2}} \quad (19)$$

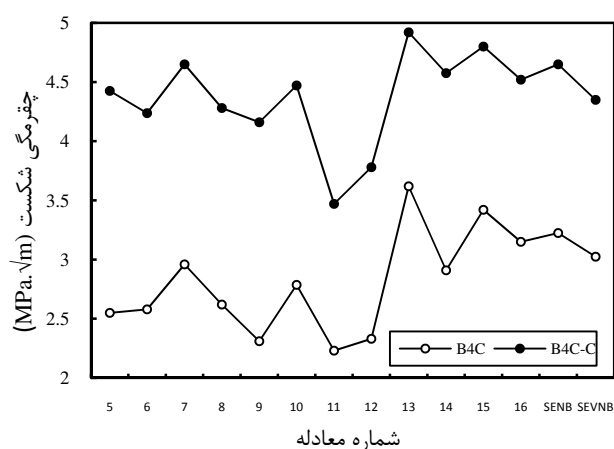
با جابه‌جایی پارامترها در طرفین معادله، رابطه (۱۹) به شکل (۲۰) بازنویسی می‌شود.

$$\beta_1 = K_{IC} \left(\frac{Hv}{E} \right)^{1/2} \frac{A^{3/2}}{P t^{3/2}} \quad (20)$$

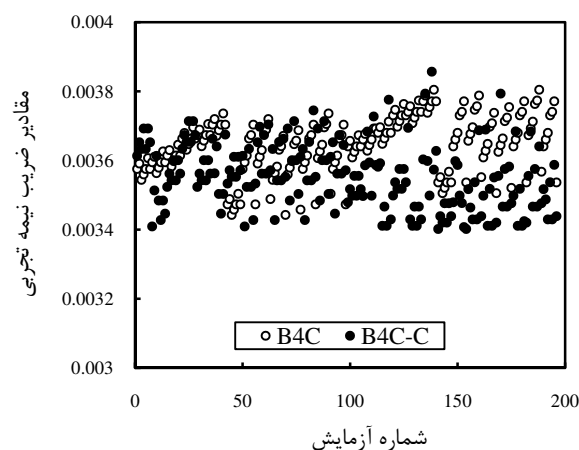
ضریب معادله (β_1) به ازای ضخامت میکروترک‌ها، مقدار مساحت سطح اثر میکروترک‌ها و همچنین مقادیر میانگین چقرمگی شکست حاصل‌شده از روش‌های SENB و SEVNB، سختی ویکرز و مدول الاستیسیته به همراه مقدار معلوم بارگذاری محاسبه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است.

رابطه (۲۱) و روش‌های SENB و SEVNB برای مواد مرکب B_4C و B_4C-C می‌باشد. در نمودار افقی از شکل ۵، ارقام ۵ تا ۱۵ نتایج به‌ترتیب نمایانگر مقادیر روابط شماره (۵) تا (۱۵) از جدول ۱ و مقادیر بیان شده در رقم ۱۶ نتایج حاصل شده از معادله (۲۱) هستند. نمودار عمودی نیز نشان دهنده مقادیر چقرمگی شکست حاصل شده از روابط است.

چقرمگی شکست کاربیدبور در محدوده $2/9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ تا $3/6$ گزارش شده است [۲۶]. نتایج چقرمگی شکست این تحقیق نیز همراه با اختلافاتی ناچیز در این محدوده به‌دست آمده است. آنچنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقادیر به‌دست آمده از رابطه (۲۱) با کمتر از ۱۰٪ اختلاف نسبت به روش‌های SENB و SEVNB به‌دست آمد. بعبارتی نتایج این رابطه در بین نتایج این دو روش حاصل شده که حکایت از میزان دقت بالای آن دارد. با ملاحظه شکل، می‌توان پی برد نتایج حاصل از معادلات ترک نیم‌سکه‌ای (روابط ۵ تا ۱۰) به یکدیگر نزدیک، اما نتایج معادلات روش خوراندن منحنی (روابط ۱۱ تا ۱۵) در مواردی با اختلافات بسیار نسبت به یکدیگر همراه است. شاید علت موضوع ریشه در چگونگی به‌دست آوردن این معادلات داشته باشد. از آنجایی که پس از به‌کارگیری مشاهدات حاصل از نتایج تجربی، ضریب بی‌بعد این بخش از روابط در بسیاری موارد و بخاطر تعمیم دادن آنها به سایر مواد ترد دچار تغییراتی (با انجام عملیات ریاضی و سعی و خطا توسط نویسندگان آنها) شده‌اند؛ در نتیجه شاید انجام عملیات‌های ریاضی بر روی معادله، برای مواد مرکب کاربیدبور از دقت کافی برخوردار نباشند و نتایج به‌طور قابل ملاحظه‌ای به دور از نتایج دیگر روابط باشد.



شکل ۶ مقایسه نتایج چقرمگی شکست حاصل شده برای روابط مختلف از روش آزمایش فروروندگی ویکرز



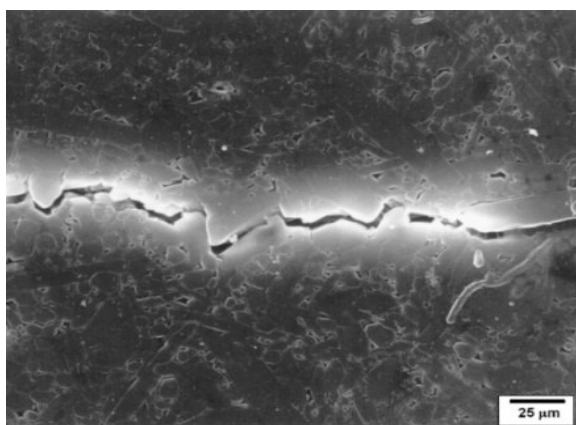
شکل ۵ مقادیر حاصل شده برای ضریب نیمه تجربی معادله

با دقت در مقادیر به‌دست آمده از شکل ۵، می‌توان مقدار میانگین آن را برابر $0/003615$ در نظر گرفت. محدوده تغییرات این ضریب از $0/003864$ تا $0/003311$ است. مقدار این ضریب برای نانومواد مرکب Al_2O_3 -nanoSiC، $0/003693$ به‌دست آمده است [۷]. از این رو احتمالاً اگر مقدار آن در معادله برابر $0/003655$ در نظر گرفته شود، وسعت کاربرد معادله افزایش خواهد یافت. از مقایسه دو مقدار به‌دست آمده برای ضریب معادله به‌ازای آزمایش بر روی مواد مرکب با پایه کاربیدبور و کاربیدسیلیسیم این چنین نتیجه می‌شود که مقدار این دو به یکدیگر بسیار نزدیک و احتمال نزدیکی نتایج آزمایش بر روی دیگر مواد ترد به این مقادیر نیز افزایش می‌یابد. نزدیکی مقادیر حاصل شده برای β_1 تایید کننده درستی اصول استنتاج معادله را نیز می‌رساند. با این وجود هرچه ضریب این معادله برای مواد ترد مختلف بیشتر آزموده شود، میزان قابلیت اطمینان به نتایج معادله در بازه بیشتری از مواد ترد بالاتر خواهد رفت. بنابراین می‌توان رابطه (۱۶) را به شکل (۲۱) اصلاح نمود.

$$K_{IC} = 0.003655 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} t_{Ave}^{3/2} \frac{P}{A^{3/2}} \quad (21)$$

باید در نظر داشت که ضرایب نیمه تجربی روابط چقرمگی شکست بیان شده در جدول ۱ نیز این چنین به‌دست آمده‌اند. در تحقیقات پیشین هرچه محدوده آزمایشات بیشتر شد میزان تغییرات ضریب معادلات در تکرارهای محدود افزایش یافت. از طرفی کاربرد و قابلیت اطمینان آنها نیز بیشتر شد.

شکل ۶ مقایسه‌ای بین نتایج معادلات نیم‌سکه‌ای، روش خوراندن منحنی موجود در جدول ۱، مقادیر به‌دست آمده از



شکل ۷ انحرافات زیگزاگی ترک و پیشروی طولی آن در نمونه B₄C-C

۴- نتیجه گیری

آنچه در این پژوهش مهم شمرده شد، بررسی بیشتر روش ابداع شده در تعیین چقرمگی شکست با استفاده از روش سطح اثر ترک‌ها با آزمایش بر روی مواد مرکب کاربیدبور است. از این رو این روش افزایش دقت در نتایج معادلات را در پی دارد و نیاز به توسعه کمی معادلات را کاهش می‌دهد و نیز از میزان هزینه‌ها تا رسیدن به ترک‌های مستقیم، تا حد قابل توجهی می‌کاهد. از این رو می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- ۱- برای تعیین مقدار چقرمگی شکست، استفاده از روش آزمایش فرورفتگی در مواد ترد از دقت قابل قبولی نسبت به دیگر روش‌های مرسوم و پرهزینه برخوردار است.
- ۲- با انجام آزمایشات لازم جهت تعیین چقرمگی شکست بر روی مواد مرکب B₄C-C، ضریب معادله چقرمگی شکست با استفاده از روش سطح اثر ترک، از ۰/۰۰۳۶۹۳ به ۰/۰۰۳۶۵۵ اصلاح گردید.
- ۳- مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های ماده مرکب کاربید بور حاصل شده توسط معادله اصلاح شده در مقایسه با دیگر روابط روش آزمایش فرورفتگی از دقت قابل قبولی برخوردار است.
- ۴- میزان خطای به‌دست آمده از نتایج رابطه اصلاح شده در نمونه‌های مواد مرکب با پایه کاربیدبور نسبت به نتایج روش‌های SENB, SEVNB کمتر از ۱۰ درصد به‌دست آمد.
- ۵- شرط اصلی استفاده از معادله اصلاح شده عدم تشکیل پدیده تراشه در نمونه‌هاست. همچنین دیگر شروط استفاده

با دقت در مقادیر به‌دست آمده از روابط ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که این مقادیر اختلافی زیاد نسبت به روش‌های دقیق SENB و SEVNB دارند. از طرفی با دقت در ساختار این روابط، میزان تاثیر پذیری کم آنها از طول ترک‌های تشکیل یافته در اطراف بخش فرورفته از نمونه قابل مشاهده است. احتمالاً این موضوع باعث نتایج عجیب از چقرمگی شکست مواد مرکب کاربیدبور شده است. چنانکه اختلاف زیاد نتایج این دو رابطه در نمونه‌های نانو مواد مرکب Al₂O₃-SiC نیز با وجود میکروتورک‌های نامنظم مشهود بود [۷].

مطابق مولفه‌های موجود در شکل ۱ و از طرفی با توجه به اینکه هر طرف از نمونه‌های آزمایش فرورفتگی با ترک‌های نامنظم، به نوعی با افزایش تعداد ترک‌های فرعی روبرو شده‌اند و این افزایش ترک‌های نامنظم که با اندازه‌های طولی مختلفی همراه است؛ بطور یقین در حد و مرز نسبت c/a اثرگذار است. با یک میانگیری از تعداد طول ترک‌های بزرگ و کوچک تشکیل شده در اطراف بخش فرورفته از نمونه، می‌توان nc از طول ترک‌ها را در اطراف نمونه فرض نمود. در نتیجه برای ترک‌های نامنظم همواره بایستی نسبت nc/a را برای بررسی بازه کارایی معادله در نظر گرفت.

طبق نتایج به‌دست آمده اگر $nc_{max}/a \geq 20, n \leq 7$ ، $c_{max} = 1.4c_{average}$ برقرار باشد، استفاده از رابطه (۲۱) مجاز خواهد شد. چرا که در این صورت نتایج این رابطه به نتایج روش‌های مدل نیم‌سکه‌ای و SENB, SEVNB نزدیکتر است و نمونه‌هایی که شروط ذکر شده را دارا نمی‌باشند قابل بررسی نیستند. از آنجایی که در مواد ترد دستیابی به ترک‌های مستقیم مشکل و عموماً ذات پیشروی ترک‌ها بشکل نامنظم هستند، شروط ذکر شده به ندرت مانع از استفاده از رابطه مورد بحث قرار گرفته شده در محاسبات چقرمگی شکست خواهد شد.

نکته حائز اهمیت دیگر اینست که اصولاً پیشروی ترک‌ها کاملاً مستقیم و در راستای طولی نیست و معمولاً با انحرافات کوچک و حرکت زیگزاگی همراه هستند. شکل ۷ این گونه انحرافات را در راستای طولی در نمونه B₄C-C نشان می‌دهد. اینگونه انحرافات نیز باعث بروز خطا در استفاده از روابط ذکر شده می‌شود. این نکته نیز موید میزان دقت رابطه سطح اثر ترک است.

- Erfe₃ Single Crystals”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*, B., Vol. 234, 2005, pp. 494-508.
- [9] Bamzai K. K., Kotru P. N., Wanklyn B. M. “Fracture Mechanics, Crack Propagation and Microhardness Studies on Flux Grown Er₂O₃ Single Crystals”, *Journal of the Materials Science and Technology*, Vol. 16, 2000, pp. 405-410.
- [10] Dub S. N., Maistrenko A. L., “Reliability of Ceramics Fracture Toughness Measurements by Indentation”, *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol. 10, 1992, pp. 109-118.
- [11] Niihara K. A., “A Fracture Mechanics Analysis of Indentation Induced Palmqvist Crack in Ceramic”, *Journal of Materials Science*, Vol. 2, 1983, pp. 221-223.
- [12] Lawn H. R., Fuller E. R., “Equilibrium Penny-Like Cracks Indentation Fracture”, *Journal of the Materials Science*, Vol. 10, 1975, pp. 2016-2024.
- [13] Evanse A. G., Wilshaw T. R., “Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solid -I. Observation Analysis ad Implication”, *Acta Metallurgica*, Vol. 24, 1976, pp. 939-956.
- [14] Lauger M. T., “New Formula For Indentation Toughness in Ceramics.”, *Journal of Materials Science*, Vol. 6, 1987, pp. 355-356.
- [15] Nihhara K., Morena R. Hasselman P.H., “Evaluation of K_{IC} of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Crack-To-Indent Ration.”, *Journal of Materials Science*, Vol. 1, 1982, pp. 13-16.
- [16] Evans A. G., Charles E. A., “Fracture Toughness Determinations by Indentation”, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 59, 1976, pp. 371-372.
- [17] Lawn B. R., Evans A. G., Marshall D. B. “Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: the Median/Radial Crack System.”, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 63, 1980, pp. 574-581.
- [18] Shetty D. K., Wright I. G., Mincer P. N., Cluar A. H., “Indentation Fracture of WC-Co Ceremets” *Journal of Materials Science*, Vol. 20, 1985, pp. 1873-1882.
- [19] Evans A. G. “Fracture Toughness: The Role of Indentation Techniques in Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials”, *ASTM STP 678*, West Conshohocken, PA, 1985, pp. 112-135.
- [20] “Testing Method for Fracture Toughness of High Performance Ceramics.” *Japanease Standard Association*, JIS R-1607, 1990.
- [۲۱] مرادخانی علیرضا، بهاروندی حمیدرضا، تاجداری مهدی، “بررسی خواص مکانیکی و ریز ساختار کامپوزیت B₄C-C تولید شده به روش پرس داغ”، *مجله علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس*، سال ۱۲، شماره ۶، ۱۳۹۱، صص ۱۰-۱۸.

از رابطه اصلاح شده $nc_{\max}/a \geq 20$, $c_{\max} = 1.4c_{\text{average}}$ ، که $n \leq 7$ است؛ که n برآوردی از تعداد ترک‌های اطراف بخش فرورفته است.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بخاطر انجام همکاری‌های لازم و تقبل هزینه‌های ناشی از انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

۶- مراجع

- [1] Gogotsi G. A., “Fracture Toughness of Ceramics and Ceramic Composites”, *Ceramics International*, Vol. 29, 2003, pp. 777-784.
- [2] Sakharova N. A., Fernandes J. V., Antunes J. M., Oliveira M. C. “Comparison between Berkovich, Vickers and Conical Indentation Tests: A Three-dimensional numerical simulation study”, *International Journal of the Solids and Structures*, Vol. 46, 2009, pp. 1095-1104.
- [3] Min L., Wei-min C., Nai-gang L., Ling-dong W., “A Numerical Study of Indentation using Indenters of Different Geometry”, *Journal of Materials Research*, Vol. 19, 2004, pp. 73-78.
- [4] Palmqvist S. “Energy Causing Cracks at Corners of Vickers Indentations as Measure of Toughness of Hard Metals”, *Arch. Eisenhuettenwes*, Vol. 33, 1962, pp. 629-634.
- [5] Mullins L. P., Bruzzi M. S., McHugh P. E., “Measurement of the Microstructural Fracture Toughness of Cortical Bone Using Indentation Fracture”, *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, 2007, pp. 3285-3288.
- [6] Ansatis G. R., Chantikul P., Lawn B. R., Marshall D. B., “A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness :I, Direct Crack Measurements”, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 64, No. 9, 1981, pp. 532-538.
- [۷] مرادخانی علیرضا، بهاروندی حمیدرضا، تاجداری مهدی، وفایی صفت عباس، “تحلیل و بررسی چقرمگی شکست با استفاده از فرورونده ویکرز در سرامیک‌های نانوکامپوزیت Al₂O₃-SiC”، *مجله علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مجلسی*، سال چهارم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۰، صص ۱۱-۱.
- [8] Bhat M., Kaur B., Kumar R., Bamzai K. K., Kotru P. N., Wanklyn B. M. “Effect of Ion Irradiation on Dielectric and Mechanical Characteristics of

- Toughness Determined by the Single-Edge-Pre-cracked Beam Technique using Silicon Nitrides with Different Microstructures”, *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, Vol. 27, pp. 2347–2354.
- [25] Dusza J., “Comparison of Fracture Toughness Testing Methods Applied to $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Si}_3\text{N}_4$ Whisker System”, *Scripta Metallurgic*, 1992, Vol. 26, pp. 337–342.
- [26] Richerson D. W., *Modern Ceramic Engineering*, 2nd Ed., Marcel Dekker Tnc., New York, Basel, 1992, pp. 356-362.
- [22] Nose T., Fujii T. “Evaluation of Fracture Toughness for Ceramic Materials by a Single-Edge- Pre-cracked- Beam Method”, *Journal of the American Ceramic Society*, 1988, Vol. 71, pp. 328-333.
- [23] Streckera K., Ribeiro R., Hoffmann M .J., “Fracture Toughness Measurements of LPS-SiC : A Comparison of the Indentation Technique and the SEVNB Method”, *Materials Research*, Vol. 8, 2005, pp. 121-124.
- [24] Miyazaki H., Hyuga H., Hirao K., Ohji T., “Comparison of Fracture Resistance as Measured by the Indentation Fracture Method and Fracture