

بررسی سنگ زنی زیر کونیای پایدار شده جهت تولید ایمپلنت دندان

سید جواد اعرج خدایی¹، فرشاد برازنده²، سید مهدی رضاعی^{3*}، حامد ادیبی²، احمد سرهان⁴

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه نفت و مواد کینگ فهد، دوران
* تهران، صندوق پستی 15875-4413، smrezaei@aut.ac.ir

چکیده

به دلیل برخی از مشکلات در ایمپلنت‌های دندانی در سال‌های اخیر تمایل به استفاده از سرامیک زیرکونیا بجای تیتانیوم ایجاد شده است. از اصلی‌ترین مشکلات در استفاده از تیتانیوم می‌توان به ایجاد حاشیه و سایه سیاه (نازیبایی)، رسانایی حرارتی و حساسیت اشاره کرد. به دلیل سختی و تردی بسیار بالای زیرکونیا، جهت دستیابی به دقت‌های ابعادی و هندسی، استفاده از فرایند سنگ‌زنی اجتناب ناپذیر است. در این پژوهش بررسی جامعی بر تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی بر زبری سطح، هزینه سنگ‌زنی و تغییر ریزساختار انجام شد. ملاحظه شد افزایش عمق براده و سرعت پیشروی منجر به افزایش تغییر ریزساختار از تتراگونال به مونوکلینیک می‌گردد. همچنین ملاحظه شد که استفاده از چرخ سنگ‌های با باند رزین بجای چرخ سنگ‌های با باند فلزی، به‌طور متوسط منجر به 8% زبری سطح کمتر می‌شود و استفاده از چرخ سنگ با چگالی ذره ساینده بیشتر منجر به کاهش زبری سطح می‌گردد. معادله ریاضی بین پارامترهای ورودی و خروجی به کمک روش رویه پاسخ به وجود آمد که مقدار ضریب تعیین بزرگ‌تر از 0.9، بیانگر انطباق مناسب مدل ریاضی با داده‌ها می‌باشد. امکان کنترل زبری سطح و ریزساختار زیرکونیا توسط پارامترهای سنگ‌زنی و مشخصات چرخ سنگ وجود دارد و استفاده از چرخ سنگ با چگالی ذره ساینده بیشتر و ذره ساینده بزرگ‌تر، منجر به کاهش هزینه سنگ‌زنی می‌شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 06 بهمن 1396
پذیرش: 22 فروردین 1397
ارائه در سایت: 14 اردیبهشت 1397
کلید واژگان:
ایمپلنت دندان
زیرکونیا
سنگ‌زنی
زبری سطح
هزینه سنگ‌زنی

Investigation of grinding partially stabilized zirconia (PSZ) for dental Implant application

Javad Khodaii¹, Farshad Barazandeh¹, Seyed Mehdi Rezaei^{1*}, Hamed Adibi¹, Ahmed Sarhan²

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Mechanical Engineering Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia
* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, smrezaei@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 January 2018
Accepted 11 April 2018
Available Online 04 May 2018

Keywords:

Implant
Zirconia
Grinding
Surface roughness
Grinding cost

ABSTRACT

Titanium is currently widely used as dental implant, but it may cause allergic problems. For this reason, the use of partially stabilized zirconia (PSZ) in dental applications has increased in recent years. Because of extreme hardness and brittleness of ceramic (PSZ) and in order to achieve dimensional and geometrical accuracy, grinding is necessary. In this research, a comprehensive study was carried out to investigate the effect of the grinding parameters of PSZ on surface roughness, grinding cost and PSZ phase transformation. It was observed that, increasing both depth of cut and feed rate results in an increase on tetragonal to monoclinic phase transformation. It was also observed that using a metal bond grinding wheel with higher concentration and larger abrasive size results in lower grinding cost. It was observed that using resin bond grinding wheels instead of metal bond grinding wheels, results in average 8% lower surface roughness. However, an increase in grinding wheel concentration results in decreasing in the surface roughness. Response surface method (RSM) was used to find an optimum condition and create a mathematical model between inputs and outputs and it was shown that the average R-square of the model was more than 0.90. PSZ microstructure and surface roughness could be controlled by controlling the grinding parameters. Using a metal bond grinding wheel with higher concentration and larger abrasive size results in lower grinding cost.

قرار می‌گردد [1]. سرامیک‌های مهندسی، ترکیبات غیرآلی و غیرفلزی هستند که ساختار کریستالی آن‌ها می‌تواند دارای پیوند کووالانسی (به اشتراک‌گذاری الکترون) و پیوند یونی (یون‌های با بار مخالف) باشد. از اصلی‌ترین ویژگی‌های سرامیک‌ها می‌توان به سختی، مقاومت به سایش و حفظ سختی در دمای بالا

1- مقدمه

در فرایند سنگ‌زنی از ذرات ساینده که توسط یک باند کنار هم نگه‌داشته شده‌اند، جهت براده برداری استفاده می‌شود. این فرایند جهت دستیابی به دقت‌های ابعادی و هندسی در ماشین‌کاری مواد سخت و ترد مورد استفاده

و اتصال تاج به متصل کننده یا توسط پیچ و یا توسط چسب می باشد. پیوند موفقیت آمیز ایمپلنت به شدت به رشد و ترمیم استخوان اطراف آن وابسته است. به ایجاد اتصال کامل بین ایمپلنت و استخوان فک، التصاق استخوانی^{۱۲} اطلاق می شود [8]. استفاده از فیکسچر و متصل کننده تیتانیومی باعث بروز مشکلاتی نظیر سایه سیاه به دلیل رنگ خاکستری تیتانیوم، رسانایی حرارتی بالای تیتانیوم و حساسیت می شود [9,7,5]. این امر منجر به افزایش تمایل به استفاده از زیرکونیا جهت ساخت ایمپلنت ها شد. از جمله مزایای استفاده از زیرکونیا بجای تیتانیوم، می توان به عدم ایجاد سایه سیاه، سازگاری بیشتر با بدن و خوردگی کمتر مینای دندان های مجاور اشاره نمود [11-9,7-5].

گاری و نیکولسون زیرکونیای پایدار شده با اکسید کلسیم را با چرخ سنگ الماس، سنگ زنی کردند. آن ها ملاحظه کردند که پس از سنگ زنی 17 درصد از ریزساختار تتراگونال به مونوکلینیک تبدیل شده است. همچنین پلیش کاری سطح و آنیل کردن آن پس از سنگ زنی، منجر به کاهش درصد ریزساختار مونوکلینیک و استحکام خمشی شده است [14]. جیمز و آنا سنگ زنی زیرکونیای پایدار شده با 4.5 و 7 درصد ایریوم مورد بررسی قرار دادند. آن ها پس از سنگ زنی سطوح را تحت آنیلینگ در دماهای مختلف و پلیش کاری نیز قرار دادند و ملاحظه کردند که برای 4.5%Y-TZP سنگ زنی منجر به تغییر ریزساختار از حالت مکعبی به تتراگونال و مونوکلینیک می شود. در حالی که برای 7%Y-TZP، ریزساختار قبل و بعد از سنگ زنی 100% مکعبی می باشد [15].

چن و همکارانش سرامیک های Al_2O_3 و ZrO_2 , Si_3N_4 توسط چرخ سنگ های الماس یا اندازه ذره ساینده 30/35 و 50/60 سنگ زنی کردند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت برشی منجر به افزایش نسبت نیروهای سنگ زنی می شود. سنگ زنی Al_2O_3 منجر به کمترین نیروی سنگ زنی و انرژی مخصوص سنگ زنی شد [17]. آناند و همکارانش در سال 2015 زیرکونیای پایدار شده را توسط چرخ سنگ الماس سنگ زنی کردند. آن ها ملاحظه کردند که افزایش سرعت برشی منجر به کاهش نیروهای سنگ زنی و زبری سطح می گردد [18]. ابوشلیب و همکارانش در تأثیر سه نوع عملیات

اشاره نمود. هزینه بالای ماشین کاری سرامیک ها از مواردی است که مانع رشد استفاده از این مواد شده است [2]. در سنگ زنی سرامیک ها دستیابی به شرایطی که منجر به سایش کمتر چرخ سنگ و در نهایت کاهش هزینه های سنگ زنی شود، ضروری است [3,1]. هزینه کل فرایند سنگ زنی به صورت زیر قابل محاسبه هست [4]:

$$C_T = C_{Mc} + C_l + C_{st} \quad (1)$$

که در آن C_T هزینه کل فرایند سنگ زنی، C_{Mc} هزینه ماشین ابزار، C_l هزینه نیروی کار، و C_{st} هزینه چرخ سنگ برای آن آزمون می باشد. با تقریب کاملاً قابل قبولی می توان گفت که دو مؤلفه اول (C_{Mc} , C_l) مستقل از پارامترهای سنگ زنی هستند و تغییر پارامترهای سنگ زنی تنها بر هزینه چرخ سنگ در آزمون تأثیر گذار است. در صورتی که قیمت نهایی چرخ سنگ به ازای کل ضخامت ذرات ساینده در چرخ سنگ باشد، هزینه چرخ سنگ برای هر تست با نسبت سایش شعاعی چرخ سنگ^۱ به کل ضخامت ذرات ساینده در چرخ سنگ^۲ متناسب خواهد بود. لذا هزینه چرخ سنگ برای تست به صورت زیر به دست می آید:

$$C_{st} = \frac{D_1}{Th} \times C_s \quad (2)$$

که در آن C_s : هزینه کل چرخ سنگ، Th ضخامت کل ذرات ساینده چرخ سنگ و D_1 عمق سایش چرخ سنگ می باشد. از میان سرامیک های موجود، زیرکونیا یک سرامیک تطبیق پذیر^۳ و امیدبخش^۴ جهت جایگزینی با فلزات در حوزه دندان پزشکی می باشد این امر بیشتر به دلیل خواص بیولوژیکی و مکانیکی آن می باشد [5]. از نظر ریزساختار، زیرکونیا یک دگر دیس^۵ می باشد و مطابق "شکل 1" دارای سه آلوتروپ مونوکلینیک، تتراگونال و مکعبی می باشد [6]. ریزساختار تتراگونال دارای بهترین خواص مکانیکی می باشد زیرا در این ریزساختار ذرات در متراکم ترین حالت قرار دارند. با این حال تتراگونال در دمای محیط پایدار نیست. با افزودن اکسیدهایی نظیر CaO , Y_2O_3 , MgO , Y_2O_3 امکان دستیابی به زیرکونیای پایدار شده^۶ در دمای محیط وجود دارد [7]. زیرکونیای پایدار شده دارای خواص مکانیکی بسیار مناسبی نظیر استحکام خمشی^۷ بسیار بالا می باشد. از سویی بازگشت ریزساختار از تتراگونال به مونوکلینیک، با (3-5%) انبساط همراه است. این امر می تواند منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری و بسته شدن ترک ها شود. انرژی مورد نیاز برای این تغییر فاز توسط عملیات سطحی که منجر تولید انرژی و تنش می گردد، تأمین می شود.

درون کاشت یا ایمپلنت نوعی ابزار پزشکی است که برای جایگزینی یک عضو زیستی، حمایت از یک ساختار زیستی آسیب دیده یا تقویت ساختار در بخشی از بدن قرار داده می شوند. ایمپلنت های ارتوپدی و ایمپلنت های دندانی از رایج ترین انواع ایمپلنت هستند. ایمپلنت ها درون استخوان فک گذاشته می شود و مطابق "شکل 2" عموماً از سه قسمت اصلی فیکسچر^۸، متصل کننده^۹ و تاج^{۱۰} تشکیل می شوند. در ایمپلنت های اولیه فیکسچر و متصل کننده عموماً از جنس تیتانیوم و تاج از جنس زیرکونیا یا چینی^{۱۱} استفاده می شد. مطابق "شکل 2" اتصال متصل کننده به فیکسچر توسط پیچ

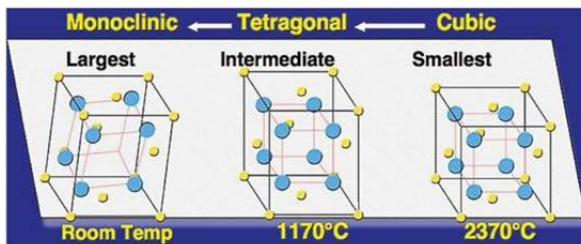


Fig. 1 Zirconia allotropes and the phase transition temperature [6]
شکل 1 آلوتروپ های زیرکونیا و دمای تغییر ریزساختار [6]



Fig. 2 Dental implant structure [6]
شکل 2 ساختار کلی ایمپلنت دندان [6]

¹ Wheel wear depth
² Total depth of abrasive
³ Versatile
⁴ Promising
⁵ Polymorphic Material
⁶ Partially Stabilized Zirconia (PSZ)
⁷ Flexural strength
⁸ Implant
⁹ Abutment
¹⁰ Crown
¹¹ Porcelain

¹² Osseointegration

سنگ‌های الماس انجام شد. مشخصات و ابعاد قطعه کارها و چرخ سنگ‌ها در جدول 1، جدول 2 و "شکل 4" نمایش داده شده است. جهت ایجاد یکنواختی در انجام تست‌ها، چرخ سنگ‌ها قبل از هر تست توسط درِسر مکعبی⁷ درِس شد. از سیال با غلظت 8%⁸ به‌عنوان خنک کار استفاده شد. سطح سنگ‌زنی شده توسط ایزوپروپیل الکل⁹ شسته شد. در مرحله بعد توسط زبری‌سنج¹⁰ زبری سطح سنگ‌زنی شده اندازه‌گیری شد. جهت محاسبه سایش چرخ سنگ و هزینه سنگ‌زنی، عمق براده برداری واقعی اندازه‌گیری شد. به‌عبارت دیگر عمق کل براده برداری انجام شده بر روی قطعه‌کار توسط ساعت اندیکاتور اندازه‌گیری شد. با محاسبه اختلاف عمق کل براده‌برداری واقعی و عمق کل براده برداری مطلوب، مقدار سایش شعاعی چرخ سنگ به‌دست آمد.

جهت بررسی تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی بر تغییر ریزساختار زیرکونیا، سطح سنگ‌زنی شده توسط پراش اشعه ایکس بررسی شد. توپوگرافی سطح توسط میکروسکوپ الکترونی¹¹ و میکروسکوپ نیروی اتمی¹² بررسی شد. طبق "شکل 4"، ضخامت کل ذره ساینده چرخ سنگ‌ها 5 میلی‌متر می‌باشد. با اندازه‌گیری عمق سایش چرخ در هر تست، تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی بر هزینه سنگ‌زنی بررسی شد. سطوح پارامترهای سنگ‌زنی با توجه به مقادیر استفاده شده در سایر پژوهش‌ها و محدودیت‌های دستگاه انتخاب شد [18,17]. مقدار این پارامترها در جدول 3 نمایش داده شده است. تست‌ها به‌صورت تمام ترکیبات ممکن¹³ توسط چهار چرخ سنگ مختلف که مشخصات آن‌ها در جدول 2 ارائه شده است، انجام شد.

3- بحث و نتایج

براده برداری در سرامیک‌ها توسط دو مکانیزم گسترش ناپایدار ترک و یا جریان پلاستیک، انجام می‌شود [24]. پارامترهای سنگ‌زنی (عمق براده، سرعت پیشروی و سرعت برشی)، مشخصات چرخ سنگ و خواص فیزیکی قطعه کار تعیین‌کننده مکانیزم براده برداری در سنگ‌زنی است [25]. از سویی مکانیزم براده برداری بر نیروهای سنگ‌زنی و زبری سطح تأثیرگذار

جدول 1 ابعاد و مشخصات قطعه کارها

Table 1 Dimension and mechanical properties of specimens

مشخصات	مقدار
ابعاد (mm)	50 × 20 × 10
چگالی (gr/cm ³)	6.02
استحکام خمشی (MPa)	1240
مدول الاستیک (GPa)	210
استحکام فشاری (MPa)	2500

جدول 2 مشخصات چرخ سنگ‌های الماس

Table 2 Diamond grinding wheels specification

ردیف	نام فنی چرخ سنگ	باند	اندازه ذره ساینده (FEPA)	درصد ذره ساینده	قیمت (\$) (\$)
1	SD25M100M	Metal	D25	100	185.00
2	SD25M50M	Metal	D25	50	160.00
3	SD125M100M	Metal	D126	100	185.00
4	SD25M100B	Resin	D25	100	150.00

⁷ Square head diamond dresser

⁸ Mobilcut 100

⁹ Isopropyl alcohol

¹⁰ Mitutoyo

¹¹ Scanning Electron Microscopy (SEM)

¹² Atomic Force Microscope

¹³ Full factorial



Fig 3. Absence of dark edge while using a zirconia as implant

شکل 3 عدم ایجاد سایه سیاه در استفاده از زیرکونیا به‌عنوان فیکسچر [9]

سطحی¹ را بر التصاق استخوانی بررسی نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که اعمال فرایند زدایش انتخابی²، منجر به افزایش چشمگیر اتصال استخوان-ایمپلنت³ در ایمپلنت‌های زیرکونیا شد [19]. پژوهش‌های دیگری جهت بررسی تأثیر عملیات سطحی بر التصاق استخوانی در ایمپلنت‌های تیتانیومی انجام شده است [21,20]. درنهایت می‌توان این‌گونه جمع‌بندی نمود که:

- کنترل کیفیت سطح یکی از تأثیرگذارترین پارامترها بر التصاق استخوانی می‌باشد [19]. همچنین زبری سطح بر میزان ترک‌های سطحی و زیرسطحی تأثیرگذار است [23,22].
- انرژی سنگ‌زنی می‌تواند انرژی مورد نیاز جهت تغییر ریزساختار تراگونال به مونوکلینیک را تأمین کند که درنهایت بر خواص مکانیکی و عملکرد ایمپلنت تأثیرگذار است [13,12].
- ویژگی‌های چرخ سنگ یکی از تأثیرگذارترین پارامترها بر نیروهای سنگ‌زنی، زبری سطح و یکپارچگی سطح سنگ‌زنی شده است.
- با توجه به هزینه بالای چرخ سنگ‌های الماس، دستیابی به شرایطی که منجر به کاهش سایش چرخ سنگ شود، به‌شدت هزینه ماشین‌کاری سرامیک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

ازجمله اصلی‌ترین نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به بررسی تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی بر تغییر ریزساختار زیرکونیای پایدار شده توسط پراش اشعه ایکس⁴ اشاره نمود. بررسی جامع تأثیر مشخصات چرخ سنگ نظیر اندازه ذرات ساینده، چگالی ذرات ساینده و باند چرخ سنگ بر هزینه سنگ‌زنی از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

همچنین در این پژوهش، تأثیر مشخصات چرخ سنگ و پارامترهای سنگ‌زنی در سنگ‌زنی زیرکونیای بر زبری سطح بررسی شد. مدل رویه پاسخ⁵ جهت پیش‌بینی خروجی‌ها به کمک مدل ریاضی ایجاد شد. متوسط ضریب تعیین⁶ مدل بیشتر از 0.9 بود که تأیید کننده دقت مدل می‌باشد. شرایط بهینه پیشنهاد شده توسط مدل که منجر به دستیابی به کمترین زبری سطح و هزینه سنگ‌زنی می‌شود با استفاده چرخ سنگ SD125M100M یا SD125M100B می‌باشد. مشاهده شد که میزان تغییر ریزساختار به پارامترهای سنگ‌زنی وابسته است. به‌طورکلی اندازه ذره ساینده کوچک‌تر و چگالی ذره ساینده کمتر، میزان تغییر ریزساختار تراگونال به مونوکلینیک را افزایش داد.

2- فعالیت‌های تجربی

فرایند سنگ‌زنی بر روی بلوک‌های زیرکونیای پایدار شده توسط چرخ

¹ Surface treatment

² Selective Infiltration Etching (SIE)

³ Bone - Implant Contact

⁴ X-Ray Diffraction (XRD)

⁵ Response Surface Method (RSM)

⁶ R-square

براده و سرعت پیشروی (a_p, V_f) وابسته هستند. به عبارت دیگر افزایش عمق براده و سرعت پیشروی منجر به افزایش نیروهای سنگ زنی می شود. محققان دیگری نیز گزارش کرده اند که افزایش عمق براده و سرعت پیشروی منجر به افزایش نیروهای سنگ زنی شده است [28,27]. از طرفی افزایش نیروهای سنگ زنی در منطقه تماس² منجر به افزایش ناهمواری سطح بوجود آمده و افزایش زبری سطح می شود [26]. لذا کاهش زبری سطح با کاهش عمق براده و سرعت پیشروی با توجه به مدل آگاروال قابل توجیه است بدین شکل که کاهش عمق براده و سرعت پیشروی منجر به کاهش نیروهای سنگ زنی و در نتیجه کاهش زبری سطح می گردد.

همچنین مشاهده می شود که سطوح سنگ زنی شده توسط چرخ سنگ با باند رزین، دارای زبری سطح کمتر می باشند. در سنگ زنی توسط چرخ سنگ با باند رزین، ذرات کُند شده راحت تر از سطح چرخ سنگ جدا شده و ذرات ساینده جدیدتر جایگزین می شود. این امر موجب کاهش زبری سطح می گردد. این امر توسط کاهش بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته هنگام استفاده از چرخ سنگ با باند رزین بجای استفاده از چرخ سنگ با باند فلزی نیز قابل توجیه است. بدین شکل که چرخ سنگ با باند رزین دارای مدول الاستیسیته کمتری می باشد و در نتیجه در شرایط یکسان طبق رابطه 3، منجر به بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته کمتری می شود (رابطه مستقیم بین بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته و مدول الاستیسیته چرخ سنگ). از سویی نشان داده شد که بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته کمتر منجر به زبری سطح کمتر می شود. همچنین استفاده از چرخ سنگ با چگالی ذره ساینده بیشتر، منجر به زبری سطح کمتر شد.

هزینه سنگ زنی توسط معادله (2) محاسبه شد. همان طور که در "شکل 6" ملاحظه می شود که افزایش سرعت پیشروی منجر به افزایش هزینه سنگ زنی می شود. این امر توسط افزایش نیروهای سنگ زنی در اثر افزایش سرعت پیشروی و در نتیجه افزایش تنش در منطقه تماس قابل توجیه است [26]. این امر به نوبه خود منجر به افزایش سایش چرخ سنگ می گردد. از سویی، افزایش عمق براده، هزینه سنگ زنی را کاهش می دهد. افزایش عمق براده نیز منجر به افزایش تنش در منطقه تماس و سایش چرخ سنگ در یک پاس می گردد. اما به جهت کاهش تعداد پاس ها، منجر به سایش چرخ سنگ در کل تست می گردد.

استفاده از چرخ سنگ با باند فلزی، چگالی ذره ساینده بیشتر و ذره ساینده درشت تر منجر (SD125M100M) به کمترین هزینه سنگ زنی شد. استفاده از چرخ سنگ های با باند فلزی، چگالی ذره ساینده بیشتر و ذره ساینده درشت تر، منجر به افزایش مقاومت به سایش چرخ سنگ می شود و و سایش چرخ سنگ، با هزینه سنگ زنی رابطه مستقیم دارد.

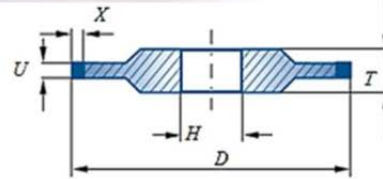
فرایند سنگ زنی منجر به اعمال حرارت و تنش به سطح سنگ زنی شده می شود، که می تواند انرژی مورد نیاز جهت تغییر ریزساختار را تأمین نماید. نمونه ای از نتایج بررسی سطح سنگ زنی شده توسط XRD در "شکل 7" ارائه شده است. نتایج بررسی سطوح سنگ زنی شده توسط XRD، به کمک

جدول 3 پارامترهای ورودی

Table 3 Input Parameters

پارامتر	سطح		
	3	2	1
عمق براده (μ)	40	20	10
سرعت پیشروی (m/min)	23	15	10

² Contact zone



D200*10T*5U*5X*31.75H

Fig. 4 14A1 type diamond surface grinding wheel dimension

شکل 4 مشخصات و ابعاد چرخ سنگ های الماس تپ 14A1

است. از نظر کمی، بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته¹ (t_{max})، تابعی از مشخصات چرخ سنگ، خواص فیزیکی قطعه کار، و شرایط سنگ زنی می باشد و مکانیزم براده برداری توسط این پارامتر قابل تعیین است [25]:

$$t_{max} = \left(\frac{E_{G.W}}{E_{W.P}} \right)^{0.548} \left[\frac{4 V_f (a_p)}{Cr V_c (D)} \right]^{0.5} \quad (3)$$

که در آن $E_{G.W}$ مدول یانگ چرخ سنگ، $E_{W.P}$ مدول یانگ قطعه کار، V_f سرعت پیشروی، V_c سرعت برشی، a_p عمق براده و D قطر چرخ سنگ می باشد. r یک ضریب ثابت می باشد که مقدار آن در مراجع در بازه (10-20) در نظر گرفته شده است. در این پژوهش مقدار این پارامتر 10 در نظر گرفته شده است [25]. C تعداد ذرات ساینده فعال در واحد سطح محیط چرخ سنگ می باشد که توسط رابطه (4) قابل محاسبه است [25].

$$C = \frac{4f}{d_g^2 \left(\frac{4\pi}{3v} \right)^{2/3}} \quad (4)$$

که در آن d_g قطر متوسط ذرات ساینده، f میزان ذرات فعال و شرکت کننده در براده برداری می باشد و با توجه به توزیع تصادفی ذرات ساینده در این چرخ سنگ ها، مقدار این پارامتر در مراجع 50% در نظر گرفته می شود [25,23]. v نسبت حجم ذرات ساینده به حجم باند چرخ سنگ می باشد. برای چرخ سنگ های فوق ساینده با چگالی ذره ساینده 50 و 100 مقدار v به ترتیب برابر است با 0.125 و 0.250.

تأثیر بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته و مشخصات چرخ سنگ بر زبری سطح در "شکل 5" نمایش داده شده است. ملاحظه می شود که در تمامی شرایط، افزایش بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته منجر به افزایش زبری سطح می شود. مدل ریاضی ارائه شده توسط آگاروال نشان داد که نیروهای سنگ زنی به صورت مستقیم به بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته وابسته است [26]. آگاروال صحت مدل ریاضی خود را توسط آزمایشات تجربی تایید نمود [26]. همان گونه که در رابطه (3) مشاهده می شود بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته به صورت مستقیم به عمق براده و سرعت پیشروی وابسته است. لذا با توجه به مدل ریاضی آگاروال می توان نتیجه گیری نمود که نیروهای سنگ زنی به صورت مستقیم به عمق

¹ Maximum undeformed chip thickness (t_{max})

$$C_m = \frac{I_m(111) + I_m(11\bar{1})}{I_m(111) + I_m(11\bar{1}) + I_c(111) + I_t(101)} \times 100\% \quad (5)$$

$$\frac{C_m}{C_t + C_c} = 0.82 \times \frac{I_m(111) + I_m(11\bar{1})}{I_c(111) + I_t(101)} \times 100\% \quad (6)$$

$$\frac{C_c}{C_t} = 0.88 \times \frac{I_c(400)}{I_t(400) + I_t(220)} \times 100\% \quad (7)$$

$$C_m + C_t + C_c = 100\% \quad (8)$$

در این روابط C_m درصد ریزساختار مونوکلینیک، C_t درصد ریزساختار تتراگونال و C_c درصد ریزساختار مکعبی می‌باشد. همچنین $I_t(101)$ شدت در قله زاویه 30 درجه (صفحه کریستالی تتراگونال 101)، $I_m(11\bar{1})$ شدت در قله زاویه 28 درجه (صفحه کریستالی مونوکلینیک 11 $\bar{1}$)، $I_c(111)$ شدت در قله زاویه 31 درجه (صفحه کریستالی مونوکلینیک 111)، $I_t(400)$ شدت در قله زاویه 74.5 درجه (صفحه کریستالی مکعبی 111) و $I_t(220)$ شدت در قله زاویه 73 درجه (صفحه کریستالی تتراگونال 400) می‌باشد [29,30].

به جهت این‌که درصد Y_2O_3 قطعه کارها کمتر از 3% بود، فاز مکعبی قبل و بعد از سنگ‌زنی تشکیل نشد. تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی بر درصد فاز مونوکلینیک ریزساختار، در "شکل 8" نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش عمق براده و سرعت پیشروی، منجر به افزایش درصد فاز مونوکلینیک می‌گردد. افزایش عمق براده و سرعت پیشروی منجر به افزایش نیروهای سنگ‌زنی و در نتیجه میزان تغییر فاز تتراگونال به مونوکلینیک می‌شود. افزایش بازگشت ریزساختار از تتراگونال به مونوکلینیک با افزایش عمق براده و سرعت پیشروی، با افزایش نیروهای سنگ‌زنی و تنش در ناحیه تماس قابل توجیه است.

همچنین استفاده از چرخ سنگ با باند فلزی بجای چرخ سنگ با باند رزین، منجر به شکل‌گیری بیشتر فاز مونوکلینیک شد. هنگام استفاده از چرخ سنگ با باند رزین به دلیل سهولت کنده شدن ذرات ساییده گند شده و جایگزین شدن ذرات ساییده تیزتر، نیروهای سنگ‌زنی کمتر می‌شود. این امر منجر به اعمال تنش و حرارت کمتر و در نهایت تغییر فاز کمتر می‌شود.

تحلیل توپوگرافی سطوح سنگ‌زنی شده توسط چرخ سنگ SD25M100M و با سرعت پیشروی 15 m/min توسط میکروسکوپ الکترونی و میکروسکوپ نیروی اتمی، در "شکل 9 و 10" نمایش داده شده است. در تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی مشاهده می‌شود که افزایش عمق براده منجر به ایجاد سطوح ناهموارتر و زبرتر شده است. همچنین تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که افزایش عمق براده منجر به افزایش سطوح شکسته می‌شود. ناحیه‌های سفید و براق در تصاویر SEM، نشان‌دهنده سطوح ناشی از مکانیزم براده برداری ترد هستند.

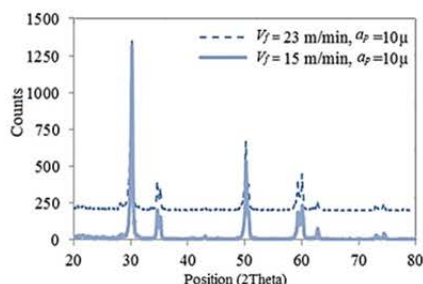
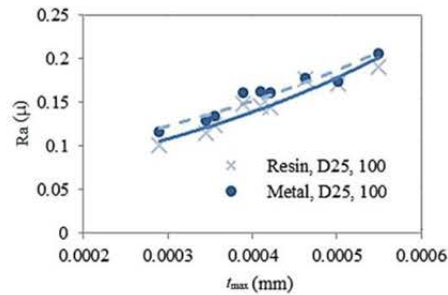
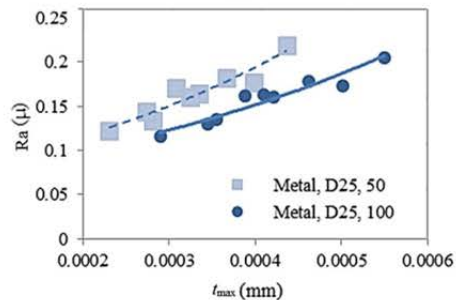


Fig. 7 A sample of XRD results which used to calculate the phase content

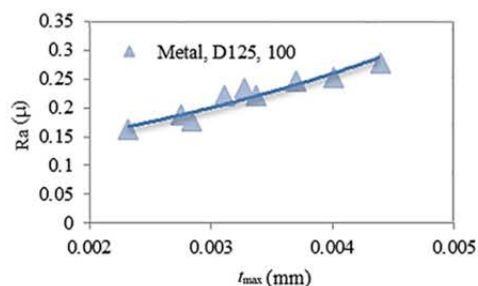
شکل 7 نمونه‌ای از نتایج بررسی سطح سنگ‌زنی شده توسط XRD



الف



ب



ج

Fig. 5 Effect of grinding wheel a: bond. b: concentration c: abrasive size on surface roughness.

شکل 5 تأثیر مشخصات چرخ سنگ، بر زبری سطح (الف). باند چرخ سنگ، ب. چگالی ذرات ساییده چرخ سنگ، ج. اندازه ذرات ساییده

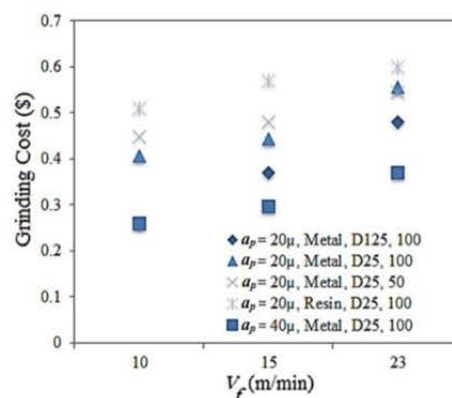


Fig. 6 Effect of grinding wheel bond, abrasive size and concentration on grinding cost

شکل 6 تأثیر باند چرخ سنگ، اندازه ذره ساییده و چگالی ذرات ساییده بر هزینه سنگ‌زنی

روش ارائه شده چوسوویتنا تحلیل شد [29]. بنابراین تحلیل میزان هر کدام از فازهای مونوکلینیک، تتراگونال و مکعبی توسط روابط (5-8) قابل محاسبه است.

$$Ra = 0.00160933a_p + 0.00380588V_f + M \quad (9)$$

$$C_s = -0.00871369a_p + 0.011503V_f + N \quad (10)$$

همچنین هزینه سنگ زنی رابطه مستقیم با سرعت پیشروی و رابطه معکوس با عمق براده دارد. همچنین در شرایط سنگ زنی یکسان، استفاده از چرخ سنگ با باند رزین با ذرات ساینده ریزتر و چگالی ذره ساینده بیشتر، منجر به کمترین زبری سطح می شود. ازسویی کمترین هزینه سنگ زنی با استفاده از چرخ سنگ با باند فلزی، با ذرات ساینده درشت تر و چگالی ذره ساینده بیشتر حاصل می شود.

شرایط بهینه به صورت کمیته شدن مقادیر زبری سطح و هزینه سنگ زنی تعریف شد. شرایط ماشین کاری پیشنهاد شده جهت دستیابی به حالت بهینه مطابق جدول 5 می باشد. شرایط ماشین کاری پیشنهاد شده جهت دستیابی به حالت بهینه، توسط چرخ سنگ های با اندازه ذره ساینده درشت تر، چگالی ذره ساینده بیشتر و باند فلزی یا رزین امکان پذیر است.

4- نتیجه گیری

سنگ زنی زیرکونیای پایدار شده به جهت بررسی تأثیر پارامترهای سنگ زنی

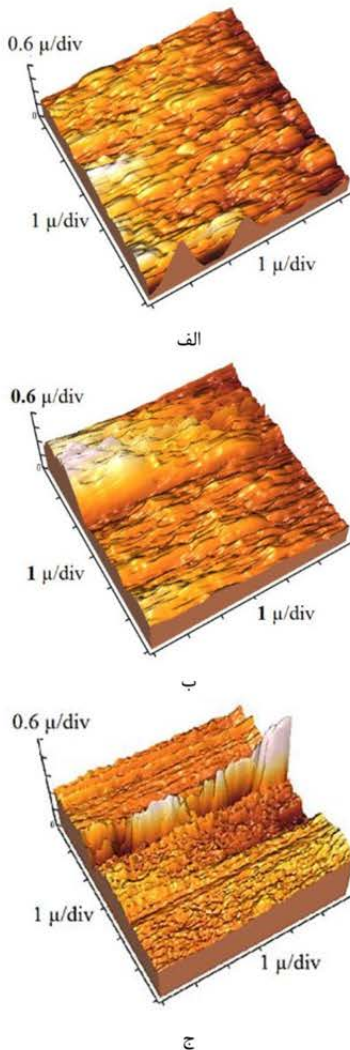


Fig. 9 Analyzing PSZ ground surface using AFM, cutting condition: a: $a_p=10\mu$, b: $a_p=20\mu$, c: $a_p=40\mu$

شکل 9 تحلیل سطح سنگ زنی شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی. الف: $a_p=10\mu$ ب: $a_p=20\mu$ ج: $a_p=40\mu$

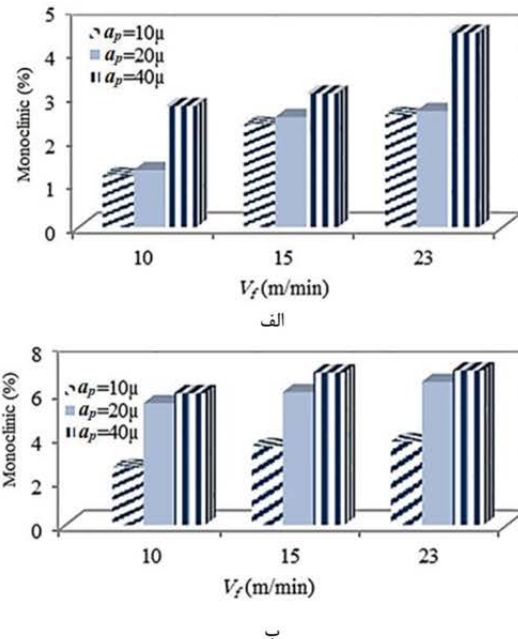


Fig 8 Monoclinic phase content in different grinding condition using a. resin bond grinding wheel, b. Metal bond grinding wheel

شکل 8 میزان فاز مونوکلینیک ریزساختار در شرایط سنگ زنی مختلف. چرخ سنگ با: الف. باند رزین، ب. باند فلزی

مشاهده می شود که هرکدام از پارامترهای ورودی (عمق براده، سرعت پیشروی، اندازه ذرات ساینده، چگالی، و باند چرخ سنگ) تأثیر متفاوتی بر خروجی های مختلف (زبری سطح و هزینه سنگ زنی) دارند. جهت دستیابی به شرایط بهینه در سنگ زنی زیرکونیای پایدار شده، مدل ریاضی توسط روش رویه پاسخ¹ ایجاد شد. پس از وارد نمودن ورودی ها و خروجی ها، رابطه خطی بین ورودی ها و خروجی ها توسط مدل پیشنهاد شد. مقدار میانگین بزرگتر از 0.9 برای ضریب تعیین²، بیانگر انطباق مناسب مدل ریاضی با داده ها می باشد. معادله ریاضی برای زبری سطح و هزینه سنگ زنی به صورت معادلات 9، 10 می باشد. مقادیر M و N برای چرخ سنگ های مختلف در جدول 4 ارائه شده است. با بررسی ضرایب، مشاهده می شود که زبری سطح رابطه مستقیم با عمق براده و سرعت پیشروی داشته و تأثیر سرعت پیشروی شدیدتر است.

جدول 4 مقدار پارامترها در مدل ریاضی

ردیف	چرخ سنگ	M	N
1	SD25M100M	0.059703	0.50438
2	SD25M50M	0.053629	0.53127
3	SD125M100M	0.12100	0.40572
4	SD25M100B	0.047925	0.58594

جدول 5 شرایط ماشین کاری پیشنهاد شده جهت دستیابی به حالت بهینه زبری سطح و هزینه ماشین کاری

Table 5 Optimized condition for Ra and Cs suggested by RSM model

ردیف	عمق براده (µ)	سرعت پیشروی (m/min)	چرخ سنگ	حالت بهینه
1	40	10	SD25M100M	75.0%
2	40	10	SD25M100B	72.6%

¹ Response surface method (RSM)

² R-Squared

6- مراجع

- [1] S. Malkin, G. Changsheng, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Second Edition, pp. 1-9, Industrial Press Inc., 2008.
- [2] W. M. Zeng, Z. C. Li, Z. J. Pei, C. Treadwell, Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 12, pp. 1468-1473, 2005.
- [3] H. Huang, Y. C. Liu, Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 8, pp. 811-823, 2003.
- [4] J. Kopac, P. Krajnik, High-performance grinding a review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, No. 1, pp. 278-284, 2006.
- [5] C. Sikalidis, *Advances in Ceramics: Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment*. pp. 397-420, InTech, 2011.
- [6] R. Giordano, Machinable Zirconia, A study on the building blocks of restorative dentistry, *Inside Dental Technology*, Vol. 3, No. 3, 2012.
- [7] S. Saridag, T. Onjen, A. Gamze, Basic properties and types of zirconia: An overview, *World J Stomatol*, Vol. 20, No. 3, pp. 40-47, 2013.
- [8] N. Nik, Bone tissue reactions to dental implants, *Journal of Dental Medicine*, Vol. 7, No. 2, pp. 55-65, 1994.
- [9] S. Nikzad, A. Azari, S. Nikan, Z. Bahrani, Current status of zirconia in dentistry; an overview, *Journal of Dental Medicine*, Vol. 27, No. 3, pp. 223-232, 2014 (in Persian فارسی)
- [10] M. N. Aboushelib, N. H. Salem, A. L. Abotaleb, N. M. moniem, Influence of surface nano-roughness on osseointegration of zirconia implants in rabbit femur heads using selective infiltration etching technique, *Journal of Oral Implantology*, Vol. 39, No. 5, pp. 583-590, 2013.
- [11] A. Ahmadzadeh, A. H. Ashtiani, S. Epakchi, M. Pormehdi, et al., Comparison of the effect of feldspathic porcelain and zirconia on natural tooth wear, *Journal of Islamic Dental Association of IRAN*, Vol. 26, No. 3, pp. 170-176, 2014. (in Persian فارسی)
- [12] N. Igawa, I. Yoshinobu, Crystal structure of metastable tetragonal zirconia up to 1473 K, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 84, No. 5, pp. 1169-1171, 2001.
- [13] A. Mariano, *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering*, Second Edition, pp. 3104-3110, Taylor and Francis: New York, 2014.
- [14] R. C. Garvie, R. H. Hannink, R. T. Pascoe. Ceramic steel?, *Nature*, Vol. 258, pp. 703-704, 1975.
- [15] J. S. Reed, A. M. Lejus, Affect of grinding and polishing on near-surface phase transformations in zirconia, *Materials Research Bulletin*, Vol. 12, No. 10, pp. 949-954, 1977.
- [16] X. Hockin, S. Jahanmir, L. K. Ives, Effect of grinding on strength of tetragonal zirconia and zirconia-toughened alumina, *Machining Science and Technology*, Vol. 1, No.1, pp. 49-66, 1997.
- [17] J. Chen, J. Shen, H. Huang, X. Xu, Grinding characteristics in high speed grinding of engineering ceramics with brazed diamond wheels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 6, pp. 899-906, 2010.
- [18] P. Anand, N. Arunachalam, L. Vijayaraghavan, Grinding behavior of Yttrium partially stabilized zirconia using diamond grinding wheel, *Advanced Materials Research*, Vol. 1136, pp. 15-20, 2016.
- [19] M. N. Aboushelib, N. H. Salem, A. L. Abotaleb, N. M. moniem, Influence of surface nano-roughness on osseointegration of zirconia implants in rabbit femur heads using selective infiltration etching technique, *Journal of Oral Implantology*, Vol. 39, No. 5, pp. 583-590, 2013.
- [20] L. Guéhennec, A. Soueidan, P. Layrolle, Y. Amouriq, Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration, *Dental materials*, Vol. 23, No. 7, pp. 844-854, 2007.
- [21] M. Wong, J. Eulenberger, R. Schenk, E. Hunziker, Effect of surface topology on the osseointegration of implant materials in trabecular bone, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, Vol. 29, No. 12, pp. 1567-1575, 1995.
- [22] L. Shengyi, Z. Wang, Y. Wu, Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, No. 1, pp. 34-41, 2008.
- [23] A. Esmailzare, A. Rahimi, S. M. Rezaei, Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of Zerodur glass-ceramic, *Applied Surface Science*, Vol. 313, pp. 67-75, 2014.
- [24] K. Ueda, T. Sugita, H. Tsuwa, Application of Fracture Mechanics in Micro-Cutting of Engineering Ceramics, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 32, pp. 83-86, 1983.
- [25] S. Agarwal, P. V. Rao, Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 698-710, 2008.
- [26] S. Agarwal, P. Venkateswara, Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 65, pp. 68-78, 2013.
- [27] I. Inasaki, Grinding of hard and brittle materials, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol 36, No. 2, pp. 463-471, 1987.
- [28] L. Lichun, F. Jizai, J. Peklenik, A study of grinding force mathematical

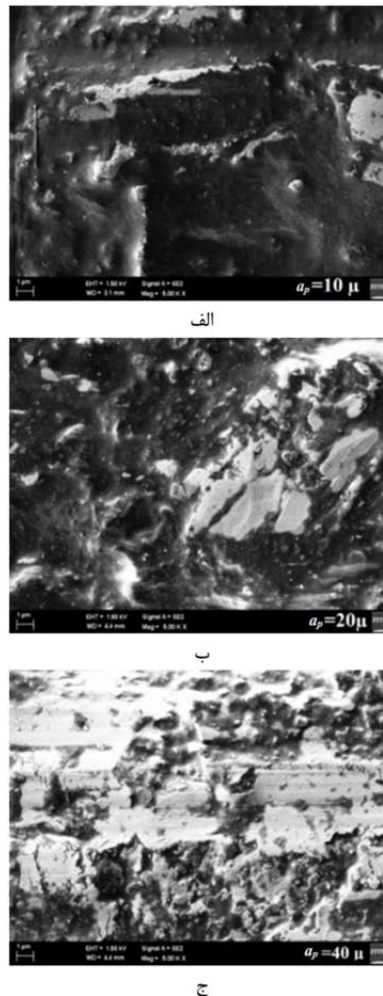


Fig. 10 SEM micrographs of PSZ ground surface. a: $a_p=10\mu$, b: $a_p=20\mu$, c: $a_p=40\mu$

شکل 10 تحلیل سطح سنگ زنی شده توسط میکروسکوپ الکترونی. الف: $a_p=10\mu$ ؛ ب: $a_p=20\mu$ ؛ ج: $a_p=40\mu$

بر زبری سطح، هزینه سنگ زنی و تغییر فاز زیرکونیا انجام شد. می توان نتیجه گیری کرد که استفاده از چرخ سنگ با باند رزین، بجای چرخ سنگ با باند فلزی، منجر به 8% زبری سطح کمتر می شود. همچنین ملاحظه شد که استفاده از چرخ سنگ با ذرات ساینده ریزتر، منجر به 32% زبری سطح کمتر شد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش سرعت پیشروی، هزینه سنگ زنی را افزایش می دهد از طرفی با افزایش عمق براده، هزینه سنگ زنی کاهش می یابد. به طور کلی شرایطی نظیر اندازه ذره ساینده کوچکتر و چگالی ذره ساینده کمتر، میزان تغییر ریزساختار تتراگونال به مونوکلینیک را افزایش داد. مدل ریاضی ایجاد شده به روش رویه پاسخ، دارای ضریب تعیین بزرگتر از 0.9 می باشد که نشانگر تطابق بالای مدل و داده ها می باشد. حالت بهینه که به صورت کمینه شدن مقادیر زبری سطح و هزینه سنگ زنی تعریف شد. شرایط ماشین کاری پیشنهاد شده جهت دستیابی به حالت بهینه توسط چرخ سنگ های با اندازه ذره ساینده ریزتر، چگالی ذره ساینده بیشتر و باند فلزی یا رزین امکان پذیر است.

5- تقدیر و تشکر

تجهیزات و هزینه انجام این پروژه توسط مجموعه AMMP دانشگاه مالایا در کشور مالزی تأمین شده است.

- Industrial Ceramics*, Vol. 32, No. 5, pp. 277-279, 1991.
- [30] A. G. Belous, E. V. Pashkova, O. I. Vyunov, V. P. Ivanitskii, Effect of combined doping (Y³⁺ Fe³⁺) on structural features of nanodispersed zirconium oxide, *Journal of materials science*, Vol. 40, No. 19, pp. 5273-5280, 2005.
- model, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 29, No. 1, pp. 245-249, 1980.
- [29] T. V. Chusovitina, S. T. Yu, M. G. Tretnikova, Properties of ceramics based on zirconia partly stabilized with yttrium concentrate, *Refractories and*