

Investigating the Effect of Adding Zirconium Oxide and Titanium Oxide Nanoparticles on the Flexural Strength of Heat Cure Acrylic Resin

Masomeh Rostamzadeh^{1*}, Kavian Rostami², Farshad Rahimi²

¹Assistant Professor, Department of Prosthodontics, School of Dentistry, Kurdistan University of Medical Sciences, Sanandaj, Iran

²Student Research Committee, School Dentistry, Kurdistan University of Medical Sciences, Sanandaj, Iran

Received: 2 January 2024, Accepted .24 July 2024

Background: Adding nanoparticles as filler aims to improve the mechanical properties of acrylic resin and reduce the incidence of fracture in them. This study aimed to investigate the effect of adding zirconium oxide and titanium oxide nanoparticles to acrylic resin on its flexural strength.

Methods and Materials: In this in-vitro study, surface modification of ZrO₂ and TiO₂ nanoparticles have been done by combining with silane coupling agent (trimethoxysilylpropyl methacrylate), and 25 samples of acrylic resin with 2.5*10*65 mm dimensions have been made. 5 groups were divided into control, 1 and 5% TiO₂, 1 and 5% ZrO₂. Flexural strength was evaluated by universal testing machine. Data were analyzed by One-Way ANOVA and Tukey's post hoc test. P < 0.05 was considered as statistically significant.

Results: A significant increase in the flexural strength of acrylic resin modified with 1% zirconium oxide compared to the control sample was observed, with an average difference of 22.082 MPa (p<0.001). The difference in bending strength was significant between the control group and the groups containing nanoparticles (p<0.05). The highest and lowest bending strengths were found in the groups with 1% zirconium oxide, averaging 98.53±2.77 MPa, and 5% titanium oxide, averaging 61±1.52 MPa, respectively. There was a significant difference in flexural strength between the 1% and 5% zirconium oxide groups, with an average of 15.98 MPa (p<0.001). Additionally, there was no significant difference in flexural strength between the 1% and 5% titanium oxide groups, with an average of 4.16 MPa (p=0.06).

Conclusion: Based on the findings, ZrO₂ nanoparticles improve and TiO₂ nanoparticles weaken the flexural strength of acrylic resin. Also, by increasing the concentration of nanofiller, the mechanical properties of acrylic resin are weakened.

Keywords: Acrylic resin; Flexural strength; Nanoparticles; Titanium oxide; Zirconium oxide

*Corresponding Author: Rostamzadeh@muk.ac.ir

➤ **Please cite this paper as:** Rostamzadeh M, Rostami K, Rahimi F. Investigating the effect of adding zirconium oxide and titanium oxide nanoparticles on the flexural strength of heat cure acrylic resin. *J Mashhad Dent Sch* 2023; 48(3):724-37.

➤ [DOI:10.22038/jmnds.2024.24638](https://doi.org/10.22038/jmnds.2024.24638)



بررسی تاثیر افزودن نانوذرات اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم بر استحکام خمشی رزین آکریلی گرمایخت

معصومه رستمزاده^{۱*}، کاویان رستمی^۲، فرشاد رحیمی^۲

استادیار، گروه پروتزهای دندانی، دانشکده دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران
^۲کمیتنه تحقیقات دانشجویی، دانشکده دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران

تاریخ ارائه مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۳

چکیده

مقدمه: افزودن نانوذرات به عنوان فیلر با هدف بهبود خواص مکانیکی رزین آکریلی و کاهش بروز شکست در آن‌ها انجام می‌گیرد. هدف مطالعه حاضر، بررسی تاثیر افزودن نانوذرات اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم بر استحکام خمشی رزین آکریلی گرمایخت بود.

مواد و روش‌ها: این مطالعه آزمایشگاهی، نانوذرات اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم توسط ترکیب شدن با عامل اتصال‌دهنده سایلی تری متوکسی سیلیل پروپیل متاکریلات اصلاح سطح شده و ۲۵ نمونه رزین آکریلی با ابعاد (۲/۵ * ۱۰ * ۶۵ میلی‌متر) ساخته و به ۵ گروه شامل گروه کنترل، ۱ و ۵ درصد اکسید تیتانیوم، ۱ و ۵ درصد اکسید زیرکونیوم تقسیم شدند. استحکام خمشی توسط دستگاه Universal Testing Machine ارزیابی شد. داده‌ها توسط آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون تعقیبی Tukey تحلیل شدند، سطح معنی داری ۰/۰۵+ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: افزایش معناداری در استحکام خمشی رزین آکریلی اصلاح شده با ۱ درصد اکسید زیرکونیوم نسبت به نمونه کنترل با اختلاف میانگین ۲۲/۰۸۲ مگاپاسکال مشاهده شد. (p<0.001) این تفاوت در استحکام خمشی بین گروه کنترل با گروه‌های حاوی نانوذره بود (p<0.05). بالاترین و پایین‌ترین استحکام خمشی به ترتیب در گروه‌های ۱ درصد اکسید زیرکونیوم با میانگین ۹۸/۵۳±۲/۷۷ مگاپاسکال و ۵ درصد اکسید تیتانیوم با میانگین ۶۱±۱/۵۲ مگاپاسکال بود. تفاوت معناداری در استحکام خمشی بین گروه ۱ و ۵ درصد اکسید زیرکونیوم با میانگین ۱۵/۹۸ مگاپاسکال وجود داشت. (p<0.001) همچنین تفاوت معناداری در استحکام خمشی بین گروه ۱ و ۵ درصد اکسید تیتانیوم با میانگین ۴/۱۶ مگاپاسکال وجود نداشت (p=0.066).

نتیجه‌گیری: براساس یافته‌ها نانوذرات اکسید زیرکونیوم سبب بهبود و نانوذرات اکسید تیتانیوم سبب تضعیف استحکام خمشی رزین آکریلی می‌شوند. همچنین با افزایش غلظت نانوفیلر، خواص مکانیکی رزین آکریلی تضعیف می‌شود.

کلمات کلیدی: رزین آکریلی، استحکام خمشی، نانوذرات، اکسید تیتانیوم، اکسید زیرکونیوم.

مقدمه:

خوردگی هستند.^(۱۰) علاوه بر این، فیبرها باعث تحریک بافت می‌شوند.^(۶)

اخیرا نگرانی قابل توجهی در مورد افزودن نانوذرات اکسید فلزی معدنی به PMMA برای تقویت ویژگی‌های مکانیکی آن مطرح شده است. مطالعات قبلی گزارش داده‌اند که خواص رزین آکریلی تقویت شده با فیبرها وابسته به شکل، اندازه، غلظت و تعامل نانوذرات با ماتریس آلی پلیمری است.^(۱۱) نانوذرات تمایل زیادی برای جمع شدن در کنار هم دارند که سبب کاهش فعل و انفعال شیمیایی آن‌ها با ماتریکس آلی می‌شود که البته با افزودن عامل اتصال سایلنی، قدرت باند بین نانوفیلر معدنی و رزین و متعاقب آن، خواص مکانیکی رزین بالا می‌رود.^(۱۲) نانوذرات در مقایسه با ذرات درشت تر هم جنس خود به دلیل اندازه کوچک، سطح تماس بالا و همچنین برهم‌کنش سطحی قوی با رزین آلی مشخص کننده ویژگی‌های مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی، نوری و مغناطیسی منحصر به فرد رزین های آلی می‌شوند.^(۱۳)

از میان نانوذرات رایج مورد استفاده می‌توان به دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) و دی اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) اشاره کرد. نانوذرات ZrO_2 مواد سرامیکی هستند که در مقایسه با سایر نانوذرات اکسید فلزی دارای مزایای زیادی از جمله استحکام بالا، زیست سازگاری مناسب و مقبولیت از نظر زیبایی شناختی هستند.^(۱۳) بسیاری از مطالعات تحقیقاتی قبلی گزارش کرده‌اند که ادغام نانوذرات ZrO_2 در رزین آکریلی گرماپخت (PMMA)^(۱۲)، خواص مکانیکی آن را بسته به غلظت نانوذره اکسید زیرکونیوم بهبود می‌بخشد.^(۱۴، ۱۵) همچنین، مطالعه دیگری نشان داد که ۵

رزین آکریلی گرماپخت (Poly-Methyl Methacrylate, PMMA) به سازگاری بافتی خوب، سهولت کاربرد، مقرون به صرفه بودن و استفاده در پروتزهای متحرک پارسیل یا کامل با تکیه گاه دندان یا ایمپلنت، اغلب به عنوان ماده بیس دندان مصنوعی ترجیح داده می‌شود.^(۱-۴) از نظر بالینی، بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی PMMA ممکن است در نقاطی که نیروهای جویده نسبتاً زیاد است، مفید باشد، مانند اکستنشن های دیستالی در مقابل دندان های طبیعی، پروتزهای کامل تک فک، اوردنچر و پروتزهای کامل با ایمپلنت^(۳) این نیاز به ویژه در بیماران مسن برای کاهش پدیده‌ی شکست دندان مصنوعی بسیار مهم است. علاوه بر این، بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی PMMA می‌تواند به بیماران مسن که در استفاده از دندان مصنوعی جدید یا سازگار شدن با آن مشکل دارند، کمک کند تا طول عمر پروتز خود را افزایش دهند.^(۵)

روش های مختلفی برای افزایش استحکام بیس آکریلی دنچر و کاهش ریسک شکستگی دندان مصنوعی انجام شده است.^(۶،۷) مطالعات نشان می‌دهد که افزودن یک فیلر مناسب به PMMA می‌تواند خواص آن‌ها را بهبود بخشد.^(۸، ۹، ۱۰، ۱۱) استفاده از رزین های با استحکام بالا یا افزودن سیم فلزی، الیاف شیشه، تیتانات باریم، دی اکسید سیلیکون، دی اکسید تیتانیوم، اکسید روی و هیدروکسی آپاتیت تکنیک هایی هستند که برای تقویت PMMA استفاده می‌شوند.^(۹، ۱۰) با این حال، استفاده از این فیبرها دارای معایبی است. به عنوان مثال، سیم های فلزی چسبندگی ضعیفی با رزین دارند، صفحات فلزی گران و مستعد

مطالعه تمرکز همزمان بر نانوذرات ZrO_2 و TiO_2 ، استفاده از یک عامل کوپلینگ سایلنی برای اصلاح سطح و بررسی اثر غلظت‌های مختلف نانوذرات بر استحکام خمشی می‌باشد. این جنبه‌ها به توسعه مواد دندانی بالقوه بهبود یافته با خواص مکانیکی افزایش یافته کمک می‌کند.

فرضیه صفر مطالعه حاضر این بود که تفاوت اثر افزودن نانوذرات ZrO_2 و TiO_2 در غلظت‌های ۱ و ۵ درصد وزنی بر استحکام خمشی رزین آکریلی گرم‌پخت ناچیز است.

مواد و روش‌ها:

مطالعه حاضر، یک مطالعه آزمایشگاهی بود که با شناسه اخلاق IR.MUK.REC.1402.116 انجام شد. با توجه به میانگین و انحراف معیار مربوط به میزان استحکام خمشی و با توجه به مطالعات قبل^(۲۰) حجم نمونه در ۵ گروه مورد مطالعه برابر با ۲۵ عدد در نظر گرفته شد و به هر گروه ۵ نمونه تخصیص داده شد. مواد آزمایش شده مورد استفاده در مطالعه حاضر و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده اند.

جدول ۱: مواد آزمایش شده مورد استفاده در مطالعه

مشخصات	سازنده	ماده
پودر سفید رنگ با خلوص ۹۹/۹۵٪ و متوسط سایز ۲۰ نانومتر و دانسیته ۵/۸۹ گرم بر سانتی متر مکعب دارای شکل نزدیک به کروی و مساحت سطح ۳۰ تا ۶۰ متر مربع بر گرم	nanosany (پیشگامان نانو مواد ایرانیان، مشهد، ایران)	نانوذره اکسید زیرکونیوم
پودر سفید رنگ با خلوص ۹۹/۹٪ و متوسط سایز ۱۸ نانومتر و دانسیته ۳/۹ گرم بر سانتی متر مکعب و مساحت سطح ۲۰۰ تا ۲۴۰ متر مربع در فرم آاناتاز	nanosany (پیشگامان نانو مواد ایرانیان، مشهد، ایران)	نانوذره اکسید تیتانیوم
تری متوکسی سیلیل پروپیل متاکریلات (TMPSM) با خلوص ۹۸ درصد	Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA	عامل اتصال دهنده سایلنی
پودر و مونومر، مطابق با استاندارد ISO 20795-1	Ivoclar, Vivadent, Schaan, Liechtenstein	پلی متیل متاکریلات

درصد وزنی نانوذرات اکسید زیرکونیوم می‌تواند خواص مکانیکی و فیزیکی را افزایش دهد، چقرمگی شکست و استحکام ضربه را به طور قابل توجهی افزایش داده و همچنین کاهش قابل توجهی در جذب آب و حلالیت ایجاد کند.^(۱۶)

نانوذرات TiO_2 به دلیل زیست سازگاری، مقرون به صرفه بودن، مقاومت در برابر خوردگی، پایداری شیمیایی و استحکام بالا اهمیت بالایی به دست آوردند.^(۱۷) مطالعات گزارش داده اند که افزودن نانوذرات TiO_2 به یک پلیمر می‌تواند بر خواص نوری، شیمیایی و فیزیکی آن تأثیر بگذارد. علاوه بر این، توانایی فوتوکاتالیستی و اثر ضد میکروبی نانوذرات اکسید تیتانیوم، محققان را به افزودن آن‌ها به مواد زیستی تشویق می‌کند.^(۱۸، ۱۹)

این نانوذرات در مطالعات مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند. با این حال، کمبود مطالعات مقایسه‌ای بین این دو نانوذره در یک مطالعه واحد وجود دارد. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی اثرات غلظت‌های ۱ و ۵ درصد وزنی نانوذرات ZrO_2 و TiO_2 بر استحکام خمشی (FS) رزین آکریلی گرم‌پخت انجام شد. به طور خلاصه، نوآوری این

اصلاح سطح نانوذرات:

استنشاق نانوذره اکسید زیرکونیوم دارای اثر منفی بر ارگان های مختلف بوده و ریسک فاکتور بیماری های مختلف می باشد.^(۲۱) هم چنین استنشاق نانوذره تیتانیوم اکساید سبب تغییرات هیستوپاتولوژیک شده و به عنوان یک کارسینوژن شناخته می شود.^(۲۲) بخارات مونومر به کار رفته جهت ساخت رزین آکریلی نیز تحریک کننده ریه بوده و استنشاق مداوم و طولانی مدت آن ممکن است سبب اختلالات سیستم عصبی مرکزی شود. بنابراین جهت تامین ایمنی کافی پرسنل، کلیه مراحل ذکر شده، خصوصا اصلاح سطح نانوذرات با سایلن، در آزمایشگاه استاندارد و با تمهیدات مربوطه انجام شد.

سطح نانوذرات اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم به صورت جداگانه با استفاده از عامل اتصال دهنده سایلنی TMPSM برای ایجاد گروه های واکنشی در جهت ادهیژن بهتر بین نانوذرات و ماتریکس رزین آکریلی، اصلاح شد. مشخص شده است که نانوذرات اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم دارای مقادیر قابل توجهی گروه هیدروکسیل بر سطح خود هستند.^(۲۳) از سوی دیگر سایلن TMPSM دارای سه گروه واکنشی معدنی باند شده به سیلیکون است که توانایی باند بسیار خوبی به اکثر مواد معدنی مانند اکسید دو مرتبه با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، هر بار به مدت ۸ دقیقه، در سانتریفیوژ (Heraeus Labofuge 400, Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) گذاشته شد و رسوب حاصله در آون (Oven, Mement, Germany) در دمای ۴۰ درجه به مدت ۴ ساعت خشک شد و پودر حاصله با استفاده از هاون فلزی به ذرات کاملا یکنواخت تبدیل شد.

زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم دارد و این باند بین مواد معدنی و سایلن، اساس اصلاح سطح نانوذرات زیرکونیوم اکساید و تیتانیوم اکساید با سایلن می باشد.^(۲۴) البته برای توانایی ایجاد باند بین ذرات سایلن و سطح نانوذرات، نیاز به هیدرولیز سایلن TMPSM وجود داشت که با افزودن سایلن به حلال اتانول و آمونیاک این امر صورت گرفت.

با توجه به مطالعه Erdem و همکاران^(۲۳)، جهت اصلاح سطح نانوذرات با سایلن، ابتدا پودر نانوذرات اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم با مشخصات اشاره شده در جدول ۱، در ظروف شیشه ای ۱۰۰ میلی لیتری جداگانه قرار داده شدند، سپس به ظروف حاوی نانوذرات، ۸۰ سی سی اتانول ۹۶ درصد اضافه شده و در حمام اولتراسونیک (SONICA 3200 MH S3, SOLTEC, Milan, Italy) به مدت ۱ ساعت پخش می شد، سپس به هر ظرف ۱۰ سی سی آمونیاک ۲۸ درصد اضافه شد و بعد از همگن شدن محلول توسط همزن مغناطیسی (HMS 8505, Pole Ideal Pars, Tehran, Iran) به مدت ۵ دقیقه، مقدار ۱/۷۵ سی سی (۳۵ درصد وزنی نانوذره) سایلن TMPSM با مشخصات ذکر شده در جدول ۱، به هر ظرف اضافه شد^(۱۲) و با قرار دادن روی همزن مغناطیسی در دمای ۴۵ درجه به مدت ۱۲ ساعت مخلوط شد (شکل ۱). سپس این مخلوط طیف مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) توسط دستگاه Spectrum 2 (PerkinElmer, Waltham, USA) با توجه به ترکیب سطحی نانوذرات TiO₂ و ZrO₂ اصلاح شده و واکنش پیوند سایلن TMPSM بر روی سطح نانوذرات در دماها و زمان های مختلف برای آنالیز پیشرفت و مکانیسم انجام واکنش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

دادند. نمونه های رزین آکرلی در ۵ گروه (هرگروه شامل ۵ عدد نمونه) طبقه بندی شدند:

۱. گروه شاهد فاقد نانوذره (گروه a)

۲. گروه آزمون حاوی ۱ درصد وزنی نانوذره اکسید

زیرکونیوم (گروه b1)

۳. گروه آزمون حاوی ۵ درصد وزنی نانوذره اکسید

زیرکونیوم (گروه b2)

۴. گروه آزمون حاوی ۱ درصد وزنی نانوذره اکسید

تیتانیوم (گروه c1)

۵. گروه آزمون حاوی ۵ درصد وزنی نانوذره اکسید

تیتانیوم (گروه c2)

درصد وزنی نانوذره های مذکور بر اساس نسبت وزنی

نانوذره به پودر رزین آکرلی اضافه شدند. بدین منظور پودر

نانوذره برای هر نمونه با استفاده از ترازوی

دیجیتالی (BA110, d=0.001g, Sartorius, Germany) به

مقادیر مذکور وزن شد

(شکل ۲) و به پودر رزین آکرلی اضافه شد تا

ترکیباتی با ۱ و ۵ درصد نانوفیلر حاصل شود.

نمونه ها به شکل مستطیل با ابعاد (۶۵ میلی متر طول، ۱۰

میلی متر عرض، ۲/۵ میلی متر ضخامت) مطابق استاندارد

ISO Specification No.1567 جهت تست استحکام خمشی

تهیه شدند.

جهت تهیه الگو برای مفل گذاری، ورقه های چوبی به

ضخامت ۲،۵ میلی متر تهیه شد و توسط دستگاه لیزر غیر

فلزات (Cf 1409, Pasargadmachine, Tehran, Iran)

مولدهای چوبی با ابعاد (۶۵ میلی متر طول، ۱۰ میلی متر

عرض، ۲/۵ میلی متر ضخامت) تهیه شد. (شکل ۳)



شکل ۱: حل کردن سایلن در مخلوط اتانول، آمونیاک و نانوذره توسط همزن مغناطیسی

یک مطالعه پایلوت بدون گروه کنترل جهت انتخاب مقدار مناسب عامل اتصال دهنده سایلنی انجام شد. از نمونه های آکرلی حاوی ۱ درصد نانوذره زیرکونیوم اکساید و ۱ درصد نانوذره تیتانیوم اکساید در ترکیب با سه نسبت وزنی متفاوت از سایلن بر نانوذره ۳۵ درصد، ۱۰۰ درصد و ۴۰۰ درصد (در مجموع ۶ نمونه) استفاده شد. سپس استحکام خمشی نمونه های رزین آکرلی حاوی نانوفیلر اصلاح شده با نسبت های وزنی متفاوت از سایلن بر نانوذره بررسی شد. تفاوت استحکام خمشی بین نمونه ها ناچیز بود اما دو نمونه حاوی نانوفیلر اصلاح شده با ۳۵ درصد وزنی سایلن بر نانوذره، دارای بالاترین استحکام خمشی بودند، به همین دلیل نسبت وزنی ۳۵ درصد سایلن بر نانوذره به عنوان مقدار مناسب عامل اتصال دهنده سایلنی انتخاب شد.

تهیه نمونه های رزین آکرلی حاوی نانوذره:

از پلی متیل متاکریلات برای تهیه نمونه های مطالعه استفاده شد و جهت کاهش خطا همه نمونه های رزین آکرلی توسط یک نفر تهیه شد و تعداد کل نمونه های تهیه شده و نمونه های خطا دار در جدول ۲ نمایش داده شده است و نمونه های حاوی نانوذره تیتانیوم اکساید، درصد خطای وجود حباب بیشتری حین تهیه نمونه ها از خود نشان

جدول ۲: تعداد کل نمونه های تهیه شده در هر گروه و نمونه های خطادار هر گروه

گروه	تعداد کل نمونه های تهیه شده	نمونه های خطادار
کنترل	۱۵	۱
تیتانیوم ۱ درصد	۱۵	۳
تیتانیوم ۵ درصد	۱۵	۵
زیرکونیوم ۱ درصد	۱۵	۱
زیرکونیوم ۵ درصد	۱۵	۲

سپس مراحل حذف موم با قرار دادن مفل در آب جوش به مدت ۷ دقیقه و جدا کردن دو قسمت مفل و برداشتن مولد چوبی و حذف باقی مانده موم با استفاده از برس و مایع ظرف شویی، انجام شد.

در مرحله بعد، مفل گچی به یک لایه جدا کننده بیوفیلیم (Separator) (Cel-Lak, SS White Art, Iran) آغشته شد.

سپس پودر رزین آکریلی هر ۵ گروه به صورت جداگانه که قبلا توسط ترازوی الکترونیکی به صورت دقیق وزن شده بود، با نسبت استاندارد ۲/۵ به ۱ پودر به مونومر، با مونومر مخلوط شد و پس از ریختن و پهن کردن محلول رزین آکریلی روی مفل، مفل سه بار تحت فشار ۹۰ مگاپاسکال در دستگاه پرس (Dentalfarm, Torino, Italy) قرار گرفت و اضافات آکریل بین هر مرحله از پرس حذف شد.

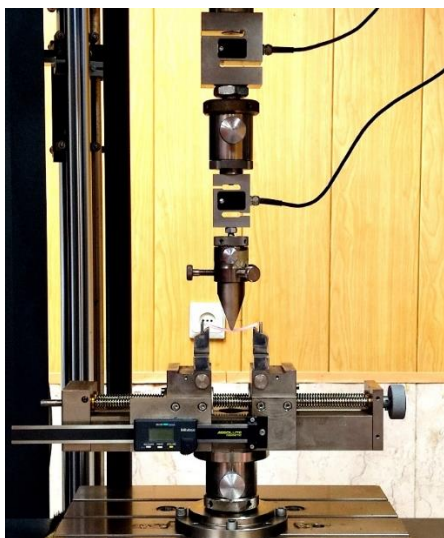
در مرحله بعد رزین آکریلی موجود در مفل با استفاده از حمام آب ۹۵ درجه به مدت ۲ ساعت، کیور شد و سپس بعد از رسیدن به دمای محیط مفل ها از حمام آب خارج شدند، سپس مراحل دفلاکس انجام شد. جهت فینیش نمونه ها، ابتدا لبه های اضافی توسط فرز هندپیس آکریل بر برداشته شد و در مرحله بعدی جهت رسیدن به ابعاد



شکل ۲: افزودن نانوذرات به پودر رزین آکریلی با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم به طور جداگانه برای هر یک از نمونه ها



شکل ۳: مولد های چوبی تهیه شده توسط دستگاه لیزر



شکل ۴: آزمون استحکام خمشی سه نقطه ای

در نهایت خود نرم افزار با استفاده از فرمول زیر استحکام خمشی نمونه ها را نیز محاسبه می کرد:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$$

که در این فرمول، σ استحکام خمشی (مگاپاسکال)، F حداکثر نیرویی است که توسط میله مرکزی در زمان شکست نمونه وارد می شود (نیوتون)، L فاصله بین دو پایه فیکسچر (میلی متر)، b عرض نمونه (میلی متر) و d ضخامت نمونه (میلی متر) می باشد.

پس از جمع آوری، داده ها جهت آنالیز وارد نرم افزار SPSS-24 شدند. در این مطالعه برای اهداف توصیفی از میانگین و انحراف معیار و برای اهداف تحلیلی از آزمون آنالیز واریانس یکطرفه استفاده شد. سطح معنی داری برای تمامی آزمون ها کمتر از ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

نهایی نمونه ها، اضافات توسط فرز هندپیس الماسی استوانه ای برداشته شد و در نهایت پالیش توسط مولت هندپیس صورتی انجام شد.

در کل مراحل فینیش نمونه ها، طول و عرض نمونه ها توسط خط کش و ضخامت نمونه توسط گیج فلز چک شد و از رسیدن به ابعاد نهایی طبق استاندارد ISO Specification No.1567 اطمینان حاصل شد. در نهایت نمونه ها برای مدت ۱ هفته در آب ۳۷ درجه سانتی گراد در دستگاه Oven جهت آزاد شدن مونومر های باقی مانده و شبیه سازی محیط دهان نگهداری شدند.

اندازه گیری استحکام خمشی

اندازه گیری استحکام خمشی نمونه ها بر اساس استاندارد بین المللی ISO/DIS 1567 و با انجام آزمون استحکام خمشی سه نقطه ای صورت گرفت. برای اندازه گیری استحکام خمشی از دستگاه Universal Testing (ZWICK Z250, Zwick Roell Group, Machine Herefordshire, UK) استفاده شد.

دستگاه تست استحکام خمشی دارای یک میله مرکزی وارد کننده نیرو در مرکز و دو پایه فیکسچر جهت ساپورت نمونه در کناره ها است، فاصله بین دو پایه فیکسچر مطابق استاندارد ۵۰ میلی متر بود و میله مرکزی وارد کننده نیرو در وسط و در فاصله مساوی از هر دو پایه بر نمونه نیرو وارد کرد سرعت حرکت رو به پایین میله مرکزی (Crosshead speed)، ۱ میلی متر در دقیقه بود. اعمال نیرو تا لحظه شکست نمونه ها ادامه پیدا می کرد و حداکثر نیرویی که منجر به شکست نمونه ها، می شد در نرم افزار کامپیوتری ثبت می گردید. (شکل ۴)

نتایج:

در این مطالعه، به مقایسه پنج گروه کنترل فاقد نانوذره، گروه حاوی ۱ درصد تیتانیوم اکساید، گروه حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید، گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید و گروه حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید از نظر میانگین استحکام خمشی در رزین آکریلی گرمایخت پرداخته شد. آنالیز FTIR نشان داد که عمل هیدرولیز و کاندنسیشن گروه سایلنی کامل انجام شده و سطح ذرات به صورت اصلاح شده در آمده بود و داده های آنالیز انجام واکنش حضور عامل باندینگ سایلنی را روی سطح نانوذرات TiO_2 و ZrO_2 تایید کرد.

برای مقایسه بین گروه ها از نظر میانگین استحکام خمشی با توجه به نرمال بودن توزیع این متغیر، از آزمون آنالیز واریانس یکطرفه استفاده گردید. داده های حاصل از تست استحکام خمشی نمونه های هر گروه پس از بدست آوردن میانگین و محاسبه انحراف معیار در جدول ۳ آورده شده اند.

میانگین استحکام خمشی در گروه کنترل $2/75 \pm 76/45$ مگاپاسکال، در گروه حاوی ۱ درصد تیتانیوم اکساید $2/91 \pm 65/16$ ، در گروه حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید $1/52 \pm 61$ ، در گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید $2/77 \pm 98/53$ و در گروه حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید $0/80 \pm 82/58$ مگاپاسکال بود. نتایج آزمون آنالیز واریانس یکطرفه نشان داد که تفاوت معنی داری بین گروه های مطالعه از نظر میانگین استحکام خمشی در رزین آکریلی گرمایخت وجود داشت ($p=0.001$).

برای مقایسات دودویی از آزمون تعقیبی توکی استفاده گردید. نتایج نشان داد که به جز گروه حاوی ۱ درصد

تیتانیوم اکساید با گروه حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید ($p=0.066$)، تفاوت معنی داری بین تمامی گروه ها از نظر میانگین استحکام خمشی وجود داشت ($p<0.001$). با توجه به میانگین اختلاف ها، میانگین استحکام خمشی در گروه کنترل فاقد نانوذره از گروه های حاوی ۱ درصد تیتانیوم اکساید و حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید بیشتر بود (میانگین در گروه کنترل بالاتر بود) ولی گروه های حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید و حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید استحکام خمشی بالاتری نسبت به گروه کنترل فاقد نانوذره داشتند. میزان اختلاف میانگین ایجاد شده در گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید با گروه کنترل، $0.82/22$ مگاپاسکال بود ($P=0.001$) که بالاتر از بقیه گروه ها می باشد؛ به عبارت دیگر، استحکام خمشی ایجاد شده در این گروه نسبت به گروه کنترل بیشتر از سایر گروه ها بود.

گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید، نسبت به گروه حاوی ۱ درصد تیتانیوم اکساید، $33/37$ مگاپاسکال استحکام خمشی بیشتری ایجاد می کرد و گروه حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید، $17/41$ مگاپاسکال استحکام خمشی بیشتری نسبت به گروه حاوی ۱ درصد تیتانیوم اکساید ایجاد نمود. گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید نسبت به گروه حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید، $37/54$ مگاپاسکال استحکام خمشی بیشتری ایجاد می نماید و گروه حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید، $21/57$ مگاپاسکال استحکام خمشی بیشتری نسبت به گروه حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید ایجاد نمود. در مقایسه بین گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید با گروه حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید می توان نتیجه گرفت که گروه حاوی ۱ درصد

¹ Fourier-transform infrared spectroscopy

و عدم معناداری مقایسه دودویی گروه‌ها در جدول ۳ نشان داده است.

بالاترین میانگین استحکام خمشی در گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید و پایین ترین استحکام خمشی مربوط به گروه حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید بود.

زیرکونیوم اکساید، ۱۵/۹۸ واحد مگاپاسکال بیشتر از گروه حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید استحکام خمشی ایجاد نمود. گروه حاوی ۱ درصد تیتانیوم اکساید در مقایسه با گروه حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید، ۴/۱۶ مگاپاسکال استحکام خمشی بیشتری ایجاد نمود ولی این تفاوت از نظر آماری معنی دار نبود ($p=0.066$). موارد مربوط به معناداری

جدول ۳: مقایسه استحکام خمشی در گروه های مورد مطالعه

متغیر	گروه	میانگین	انحراف معیار	p-value
استحکام خمشی (مگاپاسکال)	کنترل فاقد نانوذره	۷۶/۴۵ ^a	۲/۷۵	۰/۰۰۱*
	حاوی ۱ درصد تیتانیوم اکساید	۶۵/۱۶ ^b	۲/۹۱	
	حاوی ۵ درصد تیتانیوم اکساید	۶۱/۰۰ ^b	۱/۵۲	
	حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید	۹۸/۵۳ ^c	۲/۷۷	
	حاوی ۵ درصد زیرکونیوم اکساید	۸۲/۵۸ ^d	۰/۸۰	

حروف همنام در مقایسه دو به دو از نظر آماری تفاوت معناداری ندارند.

بحث:

نانوذرات بالای ۷ درصد می‌تواند باعث تغییر قابل توجهی در رنگ رزین آکریلی شود (۱۷، ۲۸). بنابراین در این مطالعه، غلظت‌های ۱٪ و ۵٪ برای نشان دادن نسبت غلظت کم و بالا انتخاب شدند و مشخص شد که فقط آکریل‌های حاوی اکسید زیرکونیوم استحکام خمشی بالاتری نسبت به گروه کنترل دارند و اکسید تیتانیوم به عنوان نانوفیلر سبب کاهش استحکام خمشی در رزین آکریلی شد.

مرور نتایج مطالعات مختلف صورت گرفته نشان می‌داد که همسو با نتایج مطالعه حاضر، مطالعاتی وجود دارد که به این نتیجه رسیده اند افزودن نانو ذراتی مانند زیرکونیوم اکساید، سیلیکون اکساید،

در این مطالعه دو نانوذره اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فردشان انتخاب شدند. پیش از این، غلظت‌های آزمایش شده نانوذرات در مطالعات مختلف از ۰/۵٪ تا ۱۰٪ متغیر بود، که این تنوع بالا، بحثی را در مورد تأثیر نانوذرات بر خواص مکانیکی رزین آکریلی بیس پروتز ایجاد کرده است. به طور کلی، غلظت‌های پایین اضافه شده به رزین آکریلی، اثرات مطلوب و مثبتی را نشان دادند، در حالی که غلظت‌های بالا بر استحکام خمشی اثر منفی داشتند (۳۷-۱۷، ۲۵). علاوه بر این، گزارش شد که غلظت

را پخش و توزیع یکنواخت تر نانوفیلر در ماتریکس رزینی دانستند، هر چند که عیب این روش تداخل احتمالی در نسبت پودر به مونومر پیشنهادی توسط برند های مختلف می باشد و از این رو افزودن نانوفیلر به پودر به جای مونومر نیز می تواند مدنظر قرار بگیرد.

در مطالعه Ihab و همکاران،^(۳۶) که با هدف ارزیابی تاثیر افزودن نانوذرات زیرکونیوم اکساید اصلاح شده و اصلاح نشده با سایلن بر استحکام ضربه ای، کششی و ثبات رنگ رزین آکرلیلی گرمایخت انجام شد، تاثیر نانوفیلر زیرکونیوم اکساید در دو غلظت ۳ و ۵ درصد بدون اصلاح سطح و دو غلظت ۳ و ۵ درصد با اصلاح سطح به وسیله TMPSM مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که رزین های آکرلیلی دارای ۵ درصد نانوفیلر زیرکونیوم اکساید اصلاح سطح شده دارای استحکام ضربه ای بیشتری نسبت به گروه کنترل می باشند، در حالی که رزین های آکرلیلی حاوی نانوفیلر اصلاح نشده تفاوت معناداری با گروه کنترل نداشتند. در مطالعه حاضر نیز از نانوذرات اصلاح سطح شده با سایلن TMPSM استفاده شد و احتمالاً علت استحکام بالاتر این نانوذرات نسبت به نانوذرات اصلاح نشده، پخش بهتر، کاهش تجمع (Agglomeration) و توزیع غیریکنواخت نانوذرات در ماتریکس رزینی و انطباق بهتر با پلیمر آلی ناشی از عامل اتصال دهنده سایلنی باشد. از سویی دیگر، از علل احتمالی افزایش خواص مکانیکی رزین آکرلیلی با افزودن نانوفیلر زیرکونیوم اکساید می توان به استحکام برشی بالا در حدفاصل ماتریکس رزینی و نانوفیلر (ناشی از تشکیل کراس لینک و باند های فرامولکولی که نانوفیلر را می پوشاند و از پیشروی ترک جلوگیری می کند) و کاهش پیشروی ترک ناشی از باند خوب بین نانوفیلر و ماتریکس رزینی، اشاره کرد.^(۳۷) همچنین مشخص شد که افزودن زیرکونیوم اکساید سبب تغییر قابل توجه رنگ رزین

آلومینیوم اکساید و نقره سبب بهبود خواص مکانیکی رزین آکرلیلی می شوند.^(۳۰،۳۱،۲۹،۲۶،۲۳) از سویی دیگر مطالعاتی نیز وجود دارد که همسو با نتایج مطالعه حاضر، به این نتیجه رسیده اند که افزودن نانوذراتی مانند تیتانیوم اکساید، سبب

تضعیف خواص مکانیکی رزین آکرلیلی، هر چند به میزان اندک می شوند.^(۳۳،۳۴،۳۵) به نظر می رسد آنچه که در رابطه با مقایسه اثرات این مواد مختلف حائز اهمیت می باشد، میزان و جهت اثر این مواد بر استحکام خمشی رزین آکرلیلی و همچنین یافتن درصد وزنی مطلوب این مواد در رزین آکرلیلی، جهت رسیدن به بهترین استحکام خمشی در دسترس با در نظر گرفتن سایر فاکتور ها مانند زیست سازگاری، صرفه اقتصادی، تاثیر بر تخلخل و زبری سطحی، سختی و رنگ است.

در مطالعه Gad و همکاران،^(۱۷) که با هدف بررسی نانوفیلر اکسید تیتانیوم بر خواص رزین آکرلیلی به صورت مطالعه مروری انجام شد، به این موضوع اشاره کردند که تعداد کمی از مقالات، بی تاثیر بودن نانوفیلر اکسید تیتانیوم بر خواص مکانیکی رزین، چند مقاله دیگر بهبود خواص مکانیکی و سایر مقالات، تاثیر منفی بر خواص مکانیکی را گزارش داده اند و به این نتیجه رسیدند که برای بهبود خواص مکانیکی توسط این نانوفیلر، باید غلظت صحیح، روش صحیح اصلاح سطح و روش مناسب افزودن به رزین مشخص شود. آن ها با مرور مطالعات مختلف به هیچ نتیجه واحدی نرسیدند و انجام مطالعات بیشتر، به خصوص مطالعات بالینی جهت یافتن روش مناسب افزایش استحکام رزین آکرلیلی با نانوفیلر اکسید تیتانیوم را پیشنهاد دادند. همچنین ادعان داشتند که علت اصلی احتمالی تفاوت در نتایج مطالعات مختلف، روش افزودن نانوذره اکسید تیتانیوم به رزین آکرلیلی می باشد و مزیت افزودن نانوفیلر به مونومر

عکس دارد. در بررسی مقایسه‌ای نمونه‌ها توسط مشاهده چشمی، میزان تغییر رنگ نمونه های حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید از نمونه های حاوی نانوذرات زیرکونیوم بیشتر بود و افزایش غلظت نانوذرات میزان تغییر رنگ را نیز افزایش می داد. میزان تغییر رنگ نمونه حاوی یک درصد زیرکونیوم اکساید از سایر نمونه ها کمتر بود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی آزمون تغییر رنگ توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر انجام گردد. با تمام این اوصاف، می توان افزودن ۱ درصد نانوفیلر اکسید زیرکونیوم را به عنوان روش مناسبی برای بهبود خواص مکانیکی رزین آکریلی گرمپخت در نظر گرفت، البته برای استفاده از نانوفیلر اکسید زیرکونیوم در حیطه بالینی، نیاز به مطالعات بیشتر برای بررسی سایر خواص مکانیکی و فیزیکی رزین آکریلی حاوی این نانوفیلر وجود دارد.

تشکر و قدردانی

از مسئولین محترم پژوهشکده دندانپزشکی تهران، جناب آقای دکتر نوائی و معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی کردستان که ما را در انجام این پژوهش یاری رساندند کمال تشکر را داریم.

تضاد منافع:

هیچگونه تضاد منافی وجود ندارد.

آکریلی می شود، متغیر رنگ در این مطالعه بررسی نشد ولی در طی انجام مطالعه تغییر قابل توجه رنگ با افزودن هر دو نوع نانوذره تیتانیوم اکساید و زیرکونیوم اکساید مشاهده شد.

در مطالعه وجدانی و قوام‌الدینی^(۳۸) که با هدف مقایسه استحکام خمشی متیل متاکریلات تقویت شده با سیم فلزی یا با الیاف شیشه انجام شد، میانگین استحکام خمشی رزین تقویت شده با الیاف برابر ۸۷/۸۷ مگاپاسکال، با سیم برابر ۸۷/۸۱ مگاپاسکال و بدون تقویت، برابر ۶۷/۶۷ مگاپاسکال بود. نتایج مطالعه ایشان با مطالعه حاضر همسو بود؛ با این تفاوت که میانگین استحکام کششی نمونه کنترل در مطالعه ایشان کمتر از مقدار ۷۶/۴۵ مگاپاسکال مطالعه حاضر بود و همچنین گروه حاوی ۱ درصد زیرکونیوم اکساید با میانگین استحکام خمشی ۹۸/۵۳ مگاپاسکال انتخاب بهتری نسبت به سیم و الیاف به نظر می رسد.

نتیجه گیری:

با توجه به یافته‌ها می توان به این نتایج رسید که استفاده از نانوفیلر اکسید زیرکونیوم در هر دو غلظت ۱ و ۵ درصد، می تواند باعث بهبود استحکام خمشی رزین آکریلی شود ولی افزودن نانوفیلر اکسید تیتانیوم در هر دو غلظت ۱ و ۵ درصد، سبب تضعیف استحکام خمشی رزین آکریلی می شود. در ضمن مشخص شد که احتمالاً مقدار استحکام خمشی با غلظت نانوفیلر افزوده شده به رزین آکریلی رابطه

منابع:

1. Alhareb AO, Ahmad ZA. Effect of Al₂O₃/ZrO₂ reinforcement on the mechanical properties of PMMA denture base. J Reinf Plastic Comp 2011; 30(1):86-93.
2. Kareem S, Moudhaffer M. The effect of zirconium

3. Silicate nanopowder reinforcement on some mechanical and physical properties of heat cured poly methyl methacrylate denture base materials. *J Baghdad Coll Dent* 2015; 325(3129):1-7.
4. Asopa V, Suresh S, Khandelwal M, Sharma V, Asopa SS, Kaira LS. A comparative evaluation of properties of zirconia reinforced high impact acrylic resin with that of high impact acrylic resin. *The Saudi Journal for Dental Research. Saudi J Dent Res* 2015; 6(2): 146-51.
5. Maji P, Choudhary RB, Majhi M. Structural, optical and dielectric properties of ZrO₂ reinforced polymeric nanocomposite films of polymethylmethacrylate (PMMA). *Optik* 2016; 127(11):4848-53.
6. Komagamine Y, Kanazawa M, Sasaki Y, Sato Y, Minakuchi S. Prognoses of new complete dentures from the patient's denture assessment of existing dentures. *Clin Oral Invest* 2017; 21:1495-501.
7. Vojdani M, Bagheri R, Khaledi AA. Effects of aluminum oxide addition on the flexural strength, surface hardness, and roughness of heat-polymerized acrylic resin. *J Dent Sci* 2015; 7(3):238-44.
8. Sabarigirinathan C, Vinayagavel K, Rupkumar P, Sriramprabhu G, Choubey A, Elavarasan S, Parimala V, Gandhimathy J. A Comparative Study to Evaluate the Mechanical Properties of Zirconium Oxide Added Polymethyl Methacrylate by Two Different Methods at Two different Concentrations–In Vitro Study. 2015. *Ann Int Med Dent Res*: 161-65.
9. Yu W, Wang X, Tang Q, Guo M, Zhao J (2014) Reinforcement of denture base PMMA with ZrO₂ nanotubes. *J Mech Behav Biomed Mater* 2014; 32:192-7.
10. Topouzi M, Kontonasaki E, Bikiaris D, Papadopoulou L, Paraskevopoulos KM, Koidis P. Reinforcement of a PMMA resin for interim fixed prostheses with silica nanoparticles. *J Mech Behav Biomed Mater* 2017; 69:213-22.
11. Vallittu PK, Lassila VP. Effect of metal strengthener's surface roughness on fracture resistance of acrylic denture base material. *J Oral Rehabil* 1992; 19(4):385-91.
12. Gad MM, Fouda SM, Al-Harbi FA, Nöpänkangas R, Raustia A. PMMA denture base material enhancement: a review of fiber, filler, and nanofiller addition. *Int J of Nanomedicine* 2017:3801-12.
13. Sabzi M, Mirabedini SM, Zohuriaan-Mehr J, Atai M. Surface modification of TiO₂ nano-particles with silane coupling agent and investigation of its effect on the properties of polyurethane composite coating. *Progress in Organic Coatings* 2009; 65(2):222-8.
14. Acosta-Torres LS, López-Marín LM, Nunez-Anita RE, Hernández-Padrón G, Castaño VM. Biocompatible metal-oxide nanoparticles: Nanotechnology improvement of conventional prosthetic acrylic resins. *Int J Nanomed* 2011; 2011(1):941561.
15. Ayad NM, Badawi MF, Fatah AA. Effect of reinforcement of high-impact acrylic resin with zirconia on some physical and mechanical properties. *Arch Oral Res* 2008; 4(3).
16. Gad MM, Al-Thobity AM, Rahoma A, Abualsaud R, Al-Harbi FA, Akhtar S. Reinforcement of PMMA denture base material with a mixture of ZrO₂ nanoparticles and glass fibers. *Int J Dent* 2019; 2019(1):2489393.
17. Asar NV, Albayrak H, Korkmaz T, Turkyilmaz I. Influence of various metal oxides on mechanical and physical properties of heat-cured polymethyl methacrylate denture base resins. *J Adv Prosthodont* 2013; 5(3):241-7.
18. Gad MM, Abualsaud R. Behavior of PMMA denture base materials containing titanium dioxide nanoparticles: A literature review. *Int J Biomater* 2019; 2019(1):6190610.
19. Hashem M, Rez MF, Fouad H, Elsarnagawy T, Elsharawy MA, Umar A, et al. Influence of titanium oxide nanoparticles on the physical and thermomechanical behavior of poly methyl methacrylate (PMMA): a denture base resin. *Sci Adv Mater* 2017; 9(6):938-44.
20. Sodagar A, Khalil S, Kassae MZ, Shahroudi AS, Pourakbari B, Bahador A. Antimicrobial properties of poly (methyl methacrylate) acrylic resins incorporated with silicon dioxide and titanium dioxide nanoparticles on cariogenic bacteria. *J Orthod Sci* 2016; 5(1):7-13.
21. Omer RA, Ikram FS. Effect of Addition of Zirconium Oxide Nanoparticles on Flexural Strength and Porosity of Heat Cure Acrylic Resin. *Al-Kitab Journal for Pure Sciences* 2018; 2(2):96-119.
22. Sun T, Liu G, Ou L, Feng X, Chen A, Lai R, et al. Toxicity Induced by Zirconia Oxide Nanoparticles on Various Organs After Intravenous Administration in Rats. *J Biomed Nanotechnol* 2019; 15(4):728-41.
23. Shakeel M, Jabeen F, Shabbir S, Asghar MS, Khan MS, Chaudhry AS. Toxicity of Nano-Titanium Dioxide (TiO₂-NP) Through Various Routes of Exposure: a Review. *Biol Trace Elem Res* 2016; 172(1):1-36.

24. Erdem B, Hunsicker RA, Simmons GW, Sudol ED, Dimonie VL, El-Aasser MS. XPS and FTIR Surface Characterization of TiO₂ Particles Used in Polymer Encapsulation. *Langmuir* 2001; 17(9):2664-9.
25. Matsuyama K, Mishima K. Preparation of poly (methyl methacrylate)-TiO₂ nanoparticle composites by pseudo-dispersion polymerization of methyl methacrylate in supercritical CO₂. *Journal of Supercritical Fluids* 2009; 49(2):256-64.
26. Ebrahim M, Seyam A, Gamal S. Effect of zirconium oxide nano-fillers addition on transverse strength and impact strength of heat-polymerized acrylic resin, an in vitro study. *Advanced Dent J* 2019; 1(2):31-6.
27. Gad MM, Al-Thobity AM. The impact of nanoparticles-modified repair resin on denture repairs: a systematic review. *Japanese Dent Sci Rev* 2021; 57:46-53.
28. Al-Thobity AM, Gad MM. Effect of silicon dioxide nanoparticles on the flexural strength of heat-polymerized acrylic denture base material: A systematic review and meta-analysis. *Saudi Dent J* 2021; 33(8):775-83.
29. Gad MM, Abualsaud R, Alqarawi FK, Emam AN, Khan SQ, Akhtar S, Mahrous AA, Al-Harbi FA. Translucency of nanoparticle-reinforced PMMA denture base material: An in-vitro comparative study. *Dent Materials J* 2021; 40(4):972-8.
30. Alsukhayri AA, Alwagdani AA, Ibrahim MI, Fahmi MK. Effect of silver nanoparticles fillers addition on flexural strength, fracture toughness, impact strength, compressive strength and hardness of heat-polymerized acrylic resin. *Int J Adv Res.* 2019; 7(9):1419-22.
31. Azmy E, Al-Kholy MRZ, Fattouh M, Kenawi LMM, Helal MA. Impact of Nanoparticles Additions on the Strength of Dental Composite Resin. *Int J Adv Res* 2022;2022:1165-431.
32. Chęcińska K, Chęciński M, Sikora M, Nowak Z, Karwan S, Chlubek D. The Effect of Zirconium Dioxide (ZrO₂) Nanoparticles Addition on the Mechanical Parameters of Polymethyl Methacrylate (PMMA): A Systematic Review and Meta-Analysis of Experimental Studies. *Polymers* 2022;14(5):1047.
33. Shirkavand S, Moslehifard E. Effect of TiO₂ Nanoparticles on Tensile Strength of Dental Acrylic Resins. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 2014;8(4):197-203.
34. Raj V, Bhat V, John N, Shetty A, Joseph S, Kuriakose R, et al. Assessment of flexural strength and cytotoxicity of heat cure denture base resin modified with titanium dioxide nanoparticles: an in vitro study. *J Contemp Dent Pract* 2021;22(9):1025-9.
35. Sodagar A, Bahador A, Khalil S, Shahroudi AS, Kassae MZ. The effect of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles on flexural strength of poly (methyl methacrylate) acrylic resins. *J Prosthodont Res* 2013;57(1):15-9.
36. Ahmed MA, El-Shennawy M, Althomali YM, Omar AA. Effect of titanium dioxide nano particles incorporation on mechanical and physical properties on two different types of acrylic resin denture base. *World J Nano Sci Engineer* 2016;6(3):111-9.
37. Ihab N, Hassanen K, Ali N. Assessment of zirconium oxide nano-fillers incorporation and silanation on impact, tensile strength and color alteration of heat polymerized acrylic resin. *J Bagh Coll Dent* 2012;24(4):36-42
38. Sun L, Gibson RF, Gordaninejad F, Suhr J. Energy absorption capability of nanocomposites: a review. *Composites Science and Technology* 2009;69(14):2392-409.
39. Vojdani M, Ghavamoddini S. Flexural strength of polymethyl methacrylate reinforced with glass fiber or with metal wire. *J Mashhad Dent Sch* 2006;30(3, 4):327-34.(Persian)