



Effect of TiO₂ Nanoparticles on the Tensile and Compressive Behavior of Bisphenol A Applicable in Dental Materials

Ali Kamali

MSc Graduate, Department of Materials
Engineering, Engineering Faculty Shiraz
University, Shiraz, Iran

Seyed Mojtaba Zebarjad*

Professor, Department of Materials Engineering,
Dept. of Materials Science and Engineering, Shiraz
University, Engineering Faculty, Shiraz, Iran

Abstract

Teeth have always been recognized as one of the most important organs of the human body, and their preservation and protection have always been considered a serious matter. One of the problems facing modern humans is the issue of dental caries, which manifests in various forms. Throughout history, researchers have attempted to repair dental defects using various materials, among which dental composites can be mentioned. One of the materials used in the production of dental composites is bisphenol A derivatives, which play the role of the matrix. These polymeric materials, which often have light-curing capability, can serve as a suitable matrix for the incorporation of ceramic reinforcements. In this study, an attempt was made to investigate the tensile and compressive properties of a commercial dental composite by adding titanium dioxide nanoparticles (at 0, 0.5, and 1 wt% ratios). Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the presence of titanium dioxide and its proper bonding with the matrix. Mechanical evaluations revealed that the presence of titanium dioxide nanoparticles in the dental composite increased the tensile strength from 25 to 41 MPa and the compressive fracture strength from 180 to 210 MPa.

Keywords: dental composite, Titanium dioxide nanoparticles, Bisphenol A, Bis-GMA, TEGDMA

Received: 31/March/2026

Accepted: 29/April/2026

eISSN: 3115-7610

ISSN: 3115-7572

* Corresponding Author: mojtabazebarjad@shirazu.ac.ir

اثر نانو ذرات TiO_2 روی رفتار کششی و فشاری بیسفنول A قابل کاربرد در مواد دندانانی

علی کمالی

کارشناس ارشد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

سید مجتبی زبرجد*

استاد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

دندان همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ارگان‌های بدن شناخته می‌شود؛ به‌طوری که حفظ و حراست از آن به‌عنوان موضوعی جدی همیشه مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مشکلاتی که بشر امروز با آن روبه‌روست، معضل پوسیدگی دندان است که در اشکال مختلفی ظاهر می‌شوند. بدین ترتیب، محققان در طول تاریخ تلاش کرده‌اند تا با استفاده از مواد مختلف به ترمیم نقص‌های به وجود آمده در دندان بپردازند که در این میان می‌توان به کامپوزیت دندانانی اشاره کرد. یکی از موادی که در راستای ساخت کامپوزیت دندانانی به کار گرفته می‌شود، مشتقات بیسفنول A است که نقش زمینه را بازی می‌کند. این مواد پلیمری که اغلب توانایی پخت نوری را دارا هستند، می‌توانند به‌عنوان زمینه‌ای مناسب جهت ورود تقویت‌کننده‌های سرامیکی عمل کنند. در این تحقیق نیز تلاش شده است تا با استفاده از اضافه کردن نانوذرات اکسید تیتانیوم (با نسبت ۰/۵ و ۱ درصد وزنی) به یک کامپوزیت دندانانی تجاری خواص کششی و فشاری آن مورد مطالعه قرار گیرد. طیف‌سنجی مادون‌قرمز حضور اکسید تیتانیوم و همچنین پیوند مناسب آن را با زمینه تأیید کرد. بررسی‌های مکانیکی نشان داد که حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم در کامپوزیت دندانانی باعث افزایش استحکام کششی از ۲۵ به ۴۱ مگاپاسکال و استحکام شکست فشاری از ۱۸۰ به ۲۱۰ مگاپاسکال می‌شود.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت دندانانی، نانوذرات اکسید تیتانیوم، بیسفنول A، Bis-GMA، TEGDMA

مقدمه

دندان به‌عنوان یکی از اعضای مهم در بدن انسان شناخته می‌شود که دارای ساختاری منظم، سفید رنگ و کوچک در دهان است. در یک تقسیم‌بندی می‌توان هر دندان را شامل سه بافت سخت مینا، عاج، سمتموم و یک بافت نرم به نام پالپ در نظر گرفت. همچنین دندان‌ها دارای انواع و شکل‌های مختلفی هستند که می‌توان آن‌ها را به پنج دسته شامل دندان‌های آسیای بزرگ، آسیای کوچک، نیش، پیش و دندان عقل تقسیم کرد. بخش عمده ساختار دندان نیز از هیدروکسی آپاتیت و آب تشکیل شده است که در کنار آن‌ها می‌توان به حضور برخی از پروتئین‌ها و لیپیدها اشاره کرد [۱-۳].

یکی از مواردی که سلامتی دندان‌های انسان را تهدید می‌کند، تخریب آن‌ها به دلیل حضور در برابر عوامل خارجی است که به‌طور کلی با عنوان «پوسیدگی دندان» شناخته می‌شود. همین امر منجر به ایجاد روش‌هایی جهت محافظت و ترمیم دندان شد. در این راستا می‌توان فلوراید را به‌عنوان یکی از موارد مهم در پیشگیری از پوسیدگی دندان ذکر کرد. عمل‌های ترمیمی از دیگر مواردی است که به گسترش علم دندان‌پزشکی کمک شایانی کرد. یکی از مواردی که به‌صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته، استفاده از مواد زیستی دندانی است که به جهت ترمیم، رفع نقص و یا جایگزینی بافت‌های فرسوده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد در قالب سرامیک‌ها، مواد فلزی و پلیمرها مطرح شدند که توانایی قرارگیری در نقاط مذکور را داشتند [۴-۶]. یکی از موادی که در ابتدای امر مورد استفاده قرار گرفت آمالگام نام داشت که ترکیبی از جیوه و نقره را تشکیل می‌داد و به‌عنوان ماده‌ای پرکننده مورد استفاده قرار گرفت [۷]. در ادامه محققان تلاش کردند تا با استفاده از مواد پلیمری، جایگزینی مناسب برای آمالگام پیدا کنند که بتواند علاوه بر ترمیم حفرات دندانی، رنگی متناسب با دندان داشته باشد. بیسفنول A یکی از مواردی است که در ادامه تحقیقات، مورد توجه قرار گرفت و قابلیت مناسبی را به جهت قرارگیری در دهان از خود نشان داد. این ماده در شکل‌های شیمیایی مختلفی تولید می‌شود که می‌تواند منجر به ساخت مواد دندانی با قابلیت پخت به‌وسیله نور شود. این مواد شامل اسامی مختلفی از جمله ¹Bis-GMA، ²TEGDMA و ³UDMA می‌شود که دارای کاربردهای فراوانی در زمینه ساخت مواد دندانی کامپوزیتی هستند [۸]. همچنین این مواد را می‌توان به‌همراه مواد سرامیکی ازجمله اکسید سیلیسیم، اکسید تیتانیوم، هیدروکسی آپاتیت و اکسید زیرکونیم به کار گرفت. یکی از موادی که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، اکسید تیتانیوم است. این ماده توانسته است به‌عنوان ماده‌ای زیست‌سازگار جایگاهی مناسب در پزشکی پیدا کند. خواص سرامیکی آن می‌تواند در راستای بهبود خواص مکانیکی کمک شایانی کند و این در حالی است که اکسید تیتانیوم دارای خواص نوری مناسبی نیز می‌باشد [۹].

در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از ترکیب یک کامپوزیت تجاری با ترکیب مشخص و نانوذرات اکسید تیتانیوم، خواص فیزیکی و مکانیکی مربوطه مورد ارزیابی قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

مواد ترمیمی دندان در دما، افزودنی‌های متفاوت و درصد‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. رامالهو و همکاران^۴ [۱۰] اثر دما بر خواص مکانیکی و تریبولوژیکی مواد کامپوزیت ترمیمی دندان را مورد آزمایش قرار دادند. در این تحقیق تلاش شده است با استفاده کامپوزیت‌های دندانی تجاری آزمایش‌هایی ازجمله آزمون سختی، سایش، خمش و آزمون دینامیکی بر روی قطعات تولید شده از آن‌ها انجام شود. کامپوزیت دندانی تهیه شده در این آزمون مربوط

1. Bisphenol A Glycidyl Methacrylate
2. Triethylene Glycol Dimethacrylate
3. Urethane Dimethacrylate
4. Ramalho et al.

به شرکت های Synergy، Alert و Surefil هستند که به طور عمده از Bis-GMA، TEGDMA و مواد پرکننده تشکیل شده اند. یکی از موارد دیگر که می توان به آن اشاره کرد، تحقیق ژنگ و دارول^۱ [۱۱] در بررسی خواص مکانیکی رزین کامپوزیت مبتنی بر Bis-GMA، TEGDMA و HEMA تقویت شده با هیدروکسی آپاتیت بود. آن ها با آزمایش بر روی کامپوزیت تولید شده به این نتیجه رسیدند که هیدروکسی آپاتیت به صورت ویسکر نسبت به هیدروکسی آپاتیت به صورت پودر خواص مکانیکی بهتری را به کامپوزیت دندانی می بخشد. همین امر نشان دهنده وابستگی خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت های تقویت شده به نوع زمینه، شکل و اندازه ی ماده ی تقویت کننده و همچنین میزان آن است.

میائو و همکاران^۲ [۱۲] با استفاده از رزین حاوی نسبت برابر از Bis-GMA و TEGDMA دست به تولید کامپوزیتی زدند که در آن از مواد پرکننده ای شامل دیاتومایت و اکسید سیلیسیوم استفاده شده بود. میزان مواد معدنی موجود در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد وزنی تعیین شد که براساس آن نسبت های مختلفی از اکسید سیلیسیوم و دیاتومایت مورد استفاده قرار گرفت. آزمون های خمش و سختی نشان داد که بهترین ترکیب مورد استفاده در ساخت کامپوزیت نسبت ۴۰ به ۶۰ درصد وزنی است که به ترتیب میزان اکسید سیلیسیوم و دیاتومایت را نشان می داد. در این پژوهش همچنین تأثیر حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد خواص مکانیکی با افزایش مقادیر به بالای نیم درصد وزنی کاهش می یابد. اثر افزودن TiO2 تا کمتر از ۰/۵٪ همچنین توسط یو و همکاران^۳ [۱۳] بر روی رزین های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته بود که نتایج مشابهی را دربرداشت و دلیل این امر می تواند ایجاد پدیده ی کلوخه ای شدن در سیستم باشد.

الشریف و همکاران^۴ [۱۴] با بررسی اثر درصد وزنی ذرات آلومینا بر خواص مکانیکی رزین Bis-GMA کامپوزیت دندان پزشکی پرتویخت به این نتیجه رسیدند که با افزودن ذرات آلومینا نیز استحکام خمشی و سختی افزایش می یابد. یکی از تحقیقات دیگری که بر روی کامپوزیت های دندانی صورت گرفت توسط لین و همکاران^۵ [۱۵] بود. در این پژوهش تلاش شد تا تأثیر حجم پرکننده و میزان سیلانه شدن سطح اکسید سیلیسیوم بر روی خواص کامپوزیت مطالعه شود. بدین ترتیب درصدهای حجمی مختلفی از اکسید سیلیسیوم به ترکیبی از Bis-GMA و TEGDMA اضافه شد که براساس آن به بررسی خواص کششی پرداخته شد. همچنین ترکیبات فوق در مدت زمان های متفاوت در معرض اتانول قرار گرفتند و در بازه های زمانی مختلف خواص کششی آن ها مورد بررسی قرار گرفت. در حقیقت با افزایش درصد حجمی از اکسید سیلیسیوم استحکام کاهش می یابد و این در حالی است که با ایجاد سطحی سیلانه شده، می توان استحکام را به واسطه حضور اکسید سیلیسیوم افزایش داد. همچنین نتایج نشان داد که استحکام قطعات به واسطه قرارگیری در اتانول کاهش می یابد و این کاهش به واسطه حضور اکسید سیلیسیوم سیلانه نشده بیشتر احساس می شود.

تحقیق دیگری که در بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی می توان بدان استناد کرد، بررسی خواص کامپوزیت دندانی حاوی Bis-GMA و TEGDMA به عنوان رزین و الیاف شیشه به مانند تقویت کننده است. این تحقیق توسط کرو ز و همکاران^۶ [۱۶] صورت گرفته است که براساس آن ترکیبی برابر از Bis-GMA و TEGDMA تولید شد و در ادامه الیاف شیشه با نسبت ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی به آن ها اضافه شد. از تحقیقات مهم دیگری که در زمینه

1. Zhang & Darvell
2. Miao et al.
3. Yu et al.
4. Alsharif et al.
5. Lin et al.
6. Krause et al.

ایجاد کامپوزیت‌های دندانی صورت گرفته است می‌توان به تحقیق فانگ^۱ [۱۷] اشاره کرد. در این تحقیق از ترکیب برابر Bis-GMA و TEGDMA به‌عنوان زمینه پلیمری استفاده شد. همچنین نانوالیاف نایلون به‌عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفت که در مقادیر ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد وزنی به زمینه اضافه شد. در این پژوهش آزمون‌های خمش و ضربه بر روی نمونه‌های تولید شده صورت گرفت.

براساس مرور بر تحقیقات انجام شده، به نظر می‌رسد که اثر افزودن نانوذرات اکسید تیتانیوم بر روی رفتار مکانیکی و حرارتی بیسفنول A مورد نقد قرار نگرفته است. در این پژوهش تلاش شده است تا با ترکیب یک محصول تجاری و نانوذرات اکسید تیتانیوم به بررسی خواص آن پرداخته شود. کامپوزیت دندانی تجاری حاوی درصد‌های مختلفی از اکسید سیلیسیم، Bis-GMA و TEGDMA است که در ادامه با درصد‌های مختلف وزنی از نانوذرات اکسید تیتانیوم تقویت می‌شوند.

روش

در پژوهش حاضر تلاش شد تا با استفاده از کامپوزیت تجاری خریداری شده و نانوذرات اکسید تیتانیوم به کامپوزیت دندانی جدیدی دست پیدا کرد. کامپوزیت دندانی تجاری محصول شرکت DenFil و نانوذرات اکسید تیتانیوم با اندازه‌های متوسط ۲۵ نانومتر از محصولات شرکت بایا صنعت هستند. براساس آنچه سازنده کامپوزیت دندانی تجاری ذکر کرده است، این ماده دارای ترکیباتی است که در جدول ۱ ذکر شده است:

جدول ۱. مواد مورد استفاده در کامپوزیت دندانی تجاری

ردیف	نام ماده
۱	باریوم آلومینا سیلیکات با اندازه کمتر از ۱ میکرومتر
۲	سیلیکا در حالت عملیات سطحی شده با اندازه کمتر از ۰/۰۴ میکرومتر
۳	Bis-GMA
۴	TEGDMA
۵	تری اتیلن گلیکول دی متاکریلیت

در این تحقیق دو سری نمونه تولید شدند. سری اول نمونه‌های استاندارد از کامپوزیت‌های تجاری و سری دوم کامپوزیت‌های تجاری تقویت شده با نانوذرات اکسید تیتانیوم هستند.

جهت تولید نمونه‌های تجاری، در ابتدا مقدار مشخصی از کامپوزیت دندانی با استون جهت سهولت هم‌زدن مخلوط شده و پس از قرارگیری در دستگاه اولتراسونیک به مدت ۴۰ دقیقه مخلوط حاصل جهت حذف مقدار باقی‌مانده استون روی دستگاه همزن مغناطیسی قرار گرفت. در همین حین با استفاده از همزن مغناطیسی، خروج استون از مخلوط تسریع گشت، سپس با رسیدن به غلظتی مشخص، مخلوط حاصل به آونی با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد منتقل شد و نهایتاً استون اضافی بدین طریق از مخلوط خارج گشت. جهت اطمینان بیشتر از خروج استون، مخلوط به مدت ۱ روز در شرایط اتاق قرار گرفت.

به‌منظور تولید نمونه کامپوزیتی حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم، مشابه با آنچه در بالا ذکر شد، در ابتدا مقدار مشخصی از کامپوزیت دندانی با استون جهت فرایند هم‌زدن صوتی مخلوط شده و با توجه به وزن کامپوزیت، مقدار مشخصی از نانوپودر TiO_2 به نسبت‌های وزنی ۰/۵ و ۱ درصد با استون جهت فرایند همزن صوتی مخلوط گشت. پس از قرارگیری جداگانه هریک از مخلوط‌های مذکور در دستگاه اولتراسونیک به مدت ۴۰ دقیقه، هر دو مخلوط وارد

یک بشر و باز هم به مدت ۴۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک قرار گرفتند، سپس مخلوط حاصل جهت حذف مقدار باقی مانده آستون روی دستگاه همزن مغناطیسی قرار گرفته و با استفاده از همزن مغناطیسی، این امر تسریع گردید. با رسیدن به غلظتی مشخص، مخلوط حاصل به آونی با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد منتقل شد و نهایتاً آستون اضافی بدین طریق از مخلوط خارج گردید. جهت اطمینان بیشتر از خروج آستون، مخلوط به مدت یک روز در شرایط اتاق قرار گرفت.

در این تحقیق جهت بررسی پیوندهای برقرار شده در کامپوزیت از طیف سنج مادون قرمز استفاده شد. دستگاه مذکور Shimadzu ژاپن بوده و طیف‌هایی با فرکانس $4000-400\text{ cm}^{-1}$ را مورد آنالیز قرار می‌دهد.

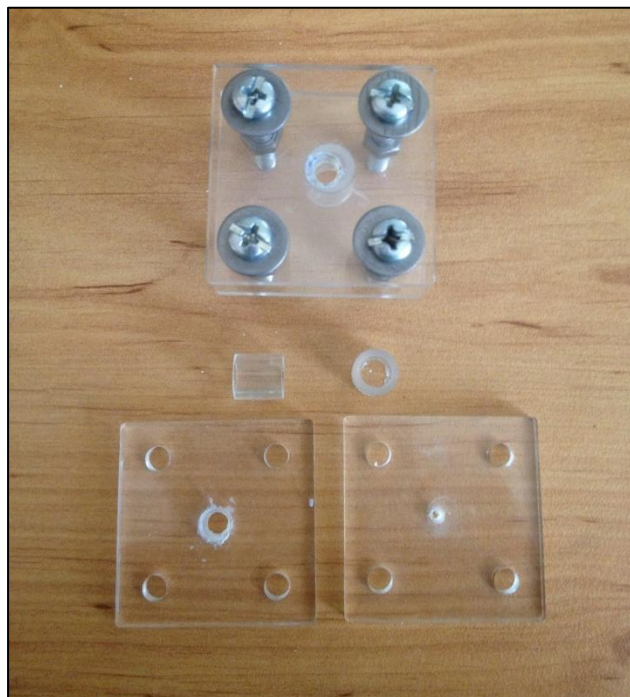
یکی از خواص مکانیکی مورد بررسی در این تحقیق، آزمون کشش است. در این آزمون که براساس استاندارد ASTM D638-03 صورت گرفت، نمونه‌ها در قالب‌هایی از جنس پلکسی گلاس پخت شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. نرخ کرنش برابر با ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه تعیین و طول مورد بررسی به اندازه‌ی ۱۰ میلی‌متر مشخص گردید. آزمون کشش با استفاده از دستگاه تست کشش Santam STM-150 انجام پذیرفت.

شکل ۱، قالب کشش جهت تولید نمونه‌های استاندارد مطابق با ASTM D638-03 را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، قالب دارای دو حفره بزرگ و کوچک است. حفره بزرگ مخصوص وارد کردن ماده و حفره کوچک به جهت خروج هوا و جلوگیری از ایجاد حفره در نمونه‌های کامپوزیتی تعبیه شده است.



شکل ۱. قالب کشش جهت تولید نمونه‌های استاندارد شامل سوراخ‌هایی جهت ورود کامپوزیت و خروج هوا

آزمون فشار براساس استاندارد ASTM D605 صورت گرفت. بدین‌منظور نمونه‌ها در قالب‌هایی از جنس پلکسی گلاس پخت شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. نرخ کرنش برابر با ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه تعیین و نسبت طول به قطر نمونه بین ۱/۵ تا ۲ مشخص گردید. آزمون مذکور نیز با استفاده از دستگاه Santam STM-150 صورت پذیرفت و جهت اطمینان از نتایج و تکرارپذیری آزمایش از هر قطعه سه نمونه با شرایط یکسان مورد آزمون فشار قرار گرفت. شکل ۲، قالب نمونه‌های فشاری که دارای یک حفره بزرگ جهت وارد کردن ماده و یک حفره کوچک به جهت خروج هوا و جلوگیری از ایجاد حفره در نمونه‌های کامپوزیتی تعبیه شده است را نمایش می‌دهد.

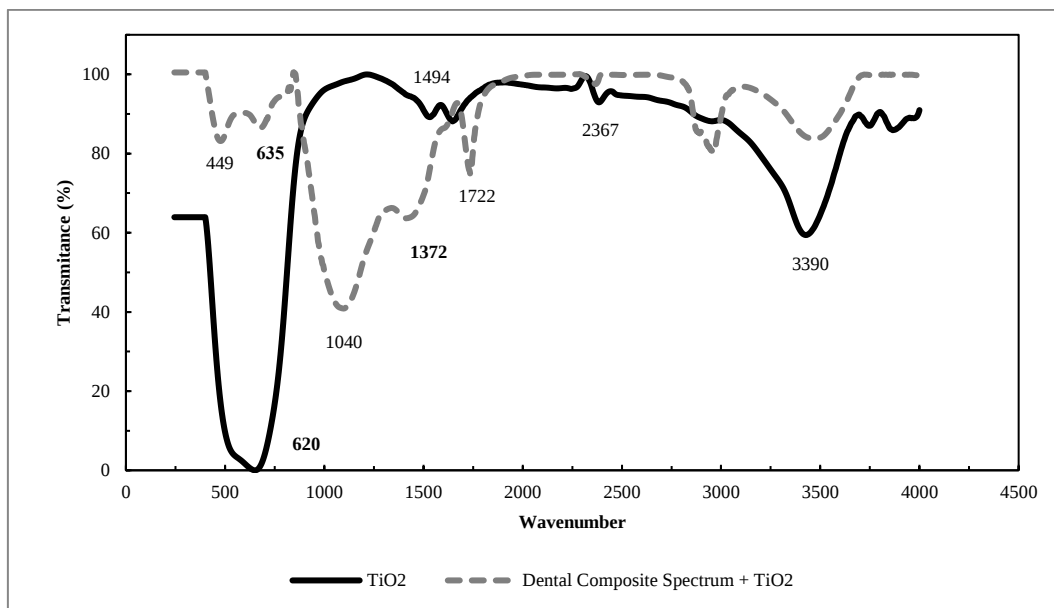


شکل ۲. قالب آزمون فشار جهت تولید نمونه‌های استاندارد شامل سوراخ‌هایی جهت ورود کامپوزیت و خروج هوا

سطح شکست نمونه‌های آزمایش کشش، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مورد بررسی قرار گرفت. میکروسکوپ مورد استفاده، Cambridge-S360 Type نام دارد که ساخت انگلستان بوده که جهت مطالعه فاصله کاری ۹ تا ۱۲ میلی‌متر و با شتاب‌دهندگی ۲۰ کیلوولت مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیش از قرارگیری نمونه‌ها در میکروسکوپ الکترونی، پوشش‌دهی توسط طلا انجام شد که به دلیل پلیمری بودن نمونه‌ها امری ضروری است. پوشش‌دهی توسط دستگاه Polaron SC7640 ساخت کشور انگلستان صورت گرفت.

یافته‌ها و بحث

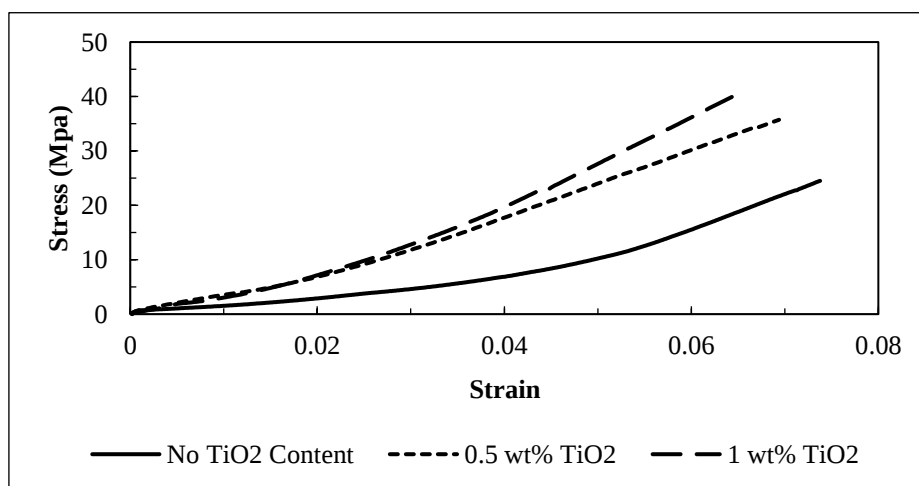
طیف‌سنجی فروسرخ یا مادون‌قرمز با استفاده از تاباندن امواج فروسرخ با طول موج‌های مختلف و بررسی طیف جذبی مواد، می‌تواند پیوندهای مختلف موجود در مواد را مورد مطالعه قرار دهد. در تحقیق حاضر طیف‌سنجی فروسرخ کمک می‌کند تا حضور پیوندهای موجود در کامپوزیت دندان‌ی مورد بررسی قرار گیرد. یکی دیگر از مواردی که می‌توان به بحث در مورد آن پرداخت، وجود پیوند میان نانوذرات اکسید تیتانیوم و زمینه پلیمری (BIS-GMA) است. در ادامه می‌توان به شکل ۳ اشاره کرد که به مقایسه طیف جذبی مربوط به کامپوزیت دندان‌ی نمونه حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم پرداخته است.



شکل ۳. طیف‌سنجی مادون قرمز مربوط به نانوذرات اکسید تیتانیوم و زمینه کامپوزیتی حاوی اکسیدهای سیلیسیم و تیتانیوم

پیک‌های نشان داده شده در شکل ۳ نیز دارای نقاط شاخصی هستند که مربوط به اکسید تیتانیوم و کامپوزیت دندانی حاوی آن است. پیک‌های قابل مشاهده اکسید تیتانیوم در طول موج‌های 620 ، 1040 ، 1372 ، 1494 ، 1722 ، 2367 و 3390 cm^{-1} واقع است. پیک‌هایی که در بازه 500 تا 800 قرار می‌گیرند مربوط به پیوندهای Ti-O و Ti-O-Ti هستند که در پیک مربوط به اکسید تیتانیوم در محدوده 620 cm^{-1} واقع شده است. همچنین در نقطه 3390 cm^{-1} می‌توان به حضور باند OH در نانوذرات اشاره کرد. طول موج‌های مطرح شده از موارد شاخص به حساب می‌آیند.

نتایج به دست آمده از آزمون کشش در شکل ۴ ارائه شده است. در بررسی‌های انجام شده سه پارامتر مورد بررسی قرار گرفت که می‌توان به تنش شکست، کرنش شکست و مدول یانگ اشاره نمود. اطلاعات به دست آمده از موارد ذکر شده در جدول ۲ آمده است.

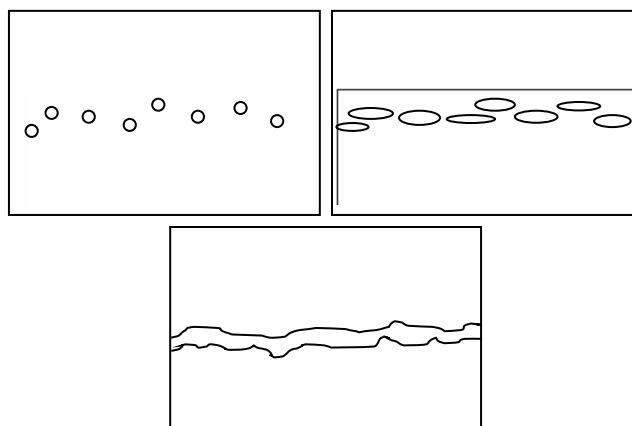


شکل ۴. نمودار تنش-کرنش مربوط به آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیتی حاوی درصد‌های مختلف از نانوذرات اکسید تیتانیوم

جدول ۲. تأثیر نانوذرات اکسید تیتانیوم روی رفتار کششی کامپوزیت دندانی

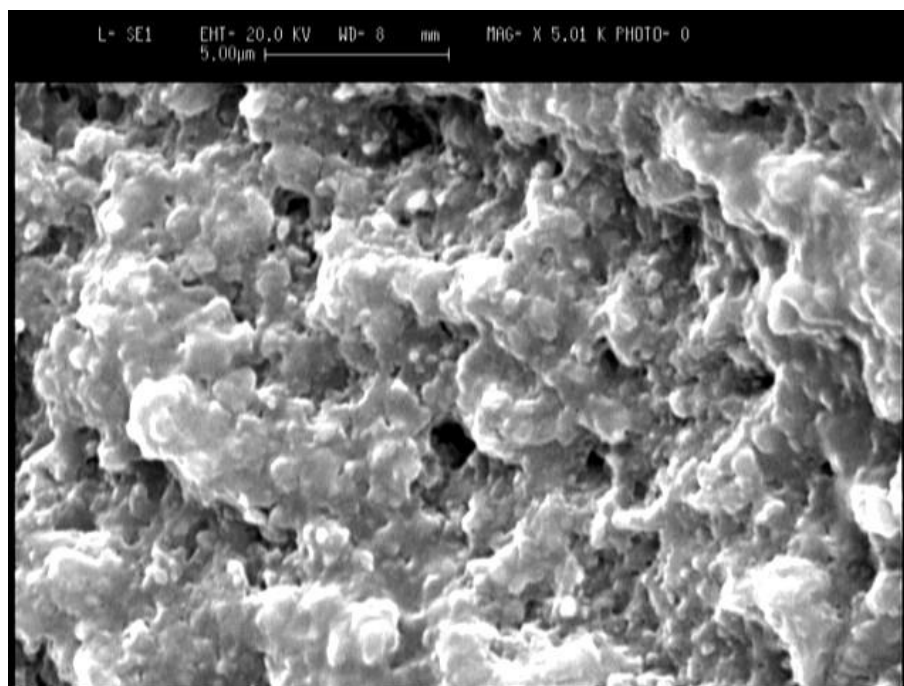
نمونه کامپوزیتی	تنش (MPa)	کرنش شکست	مدول یانگ (MPa)
Dental Composite- 0 wt% TiO ₂	۲۵	۰/۰۷۵	۶۲۲
Dental Composite - 0.5 wt% TiO ₂	۳۵	۰/۰۷	۶۵۰
Dental Composite - 1 wt% TiO ₂	۴۱	۰/۰۶۴	۸۵۶

با استفاده از بررسی‌های به‌دست آمده می‌توان نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم، استحکام کششی نمونه‌ها افزایش و میزان کرنش نقطه شکست کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد، حضور اثر نانوذرات اکسید تیتانیوم سبب بهبود خواص کششی کامپوزیت دندانی شده است. اطلاعات موجود نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانوذرات اکسید تیتانیوم، استحکام کششی از ۲۵ مگاپاسکال به ۴۱ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و این در حالی است که کرنش شکست از ۰/۰۷۵ به ۰/۰۶۴ کاهش یافته است. بررسی شیب خط در نمودارهای نمایش داده شده در آزمون کشش نیز حاکی از روند افزایشی آن‌ها است که در شکل این روند روبه‌رشد نشان داده شده است. همین امر می‌تواند تأثیر حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم را بهتر بیان کند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اکسید تیتانیوم توانسته است به‌عنوان تقویت‌کننده‌ای مناسب در زمینه پلیمری عمل کند. بدین ترتیب که با اتصال مناسب میان نانوذرات اکسید تیتانیوم و کامپوزیت دندانی باعث شده تا نیروهای وارد شده به کامپوزیت حاصل، به تقویت‌کننده منتقل شود. از آنجا که اکسید تیتانیوم نیز به‌عنوان ماده‌ای سرمایه‌ی درون سیستم قرار گرفته است، می‌تواند به‌طور طبیعی منجر به افزایش استحکام کششی و کاهش کرنش شکست شده شود که به سبب افزایش تردی در سیستم اتفاق می‌افتد [۱۸]. یکی از مواردی که مورد مطالعه قرار گرفت، بررسی‌های میکروسکوپی مربوط به سطح شکست در آزمون کشش و در مقادیر مختلف نانوذرات اکسید تیتانیوم بود. تصاویر مربوط به موارد مذکور را می‌توان در ادامه مشاهده کرد. نکته مهمی که در حال حاضر قابل بحث است، مشاهده مکانیزم‌های جوانه‌زنی و اشاعه ترک است که منجر به ایجاد صفحات تکه‌تکه شده در سطح نمونه شده است. همان‌گونه که اشاره شد، جوانه‌زنی و اشاعه ترک می‌تواند عامل بسیار مهمی در راستای شکست قطعه و تعیین استحکام نهایی آن باشد. بدین ترتیب که جوانه‌زنی ترک به‌واسطه تنش ایجاد می‌شود و می‌توان آن‌ها را در قالب حباب‌هایی مشاهده کرد که از نقاط ضعیف‌تر به وجود آمده و رشد می‌کنند. این حباب‌ها و نقص‌های ایجاد شده در اثر افزایش تنش، به مرور گسترده‌تر می‌شوند و با عبور از میان ذرات موجود در کامپوزیت، راه خود را باز می‌کنند. نقص‌های مذکور با رسیدن به یکدیگر، به هم می‌پیوندند و ترکی بزرگ‌تر را ایجاد می‌کنند. ترک‌های مذکور می‌توانند با افزایش تنش گسترش یافته و به سطحی آزاد برسند. البته می‌توان انتظار داشت که این ترک‌ها با رسیدن به ذره‌های موجود در کامپوزیت حرکت خود را متوقف کرده و حتی در اثر ازدیاد تنش مسیر خود را عوض کنند. نمایی شماتیک از این پدیده را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد.

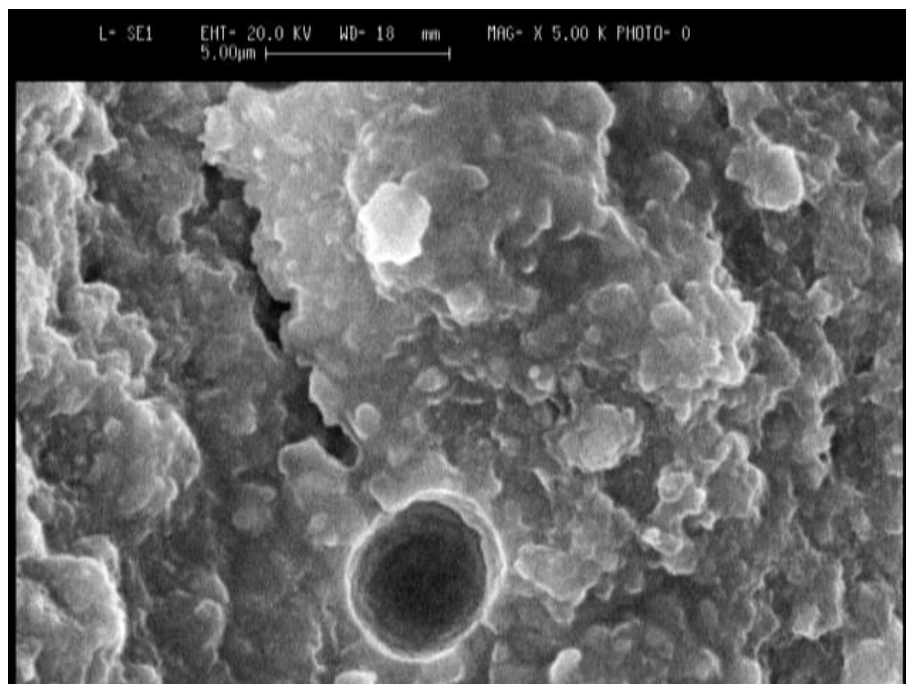


شکل ۵. شماتیک مربوط به مکانیزم جوانه زنی و رشد ترک

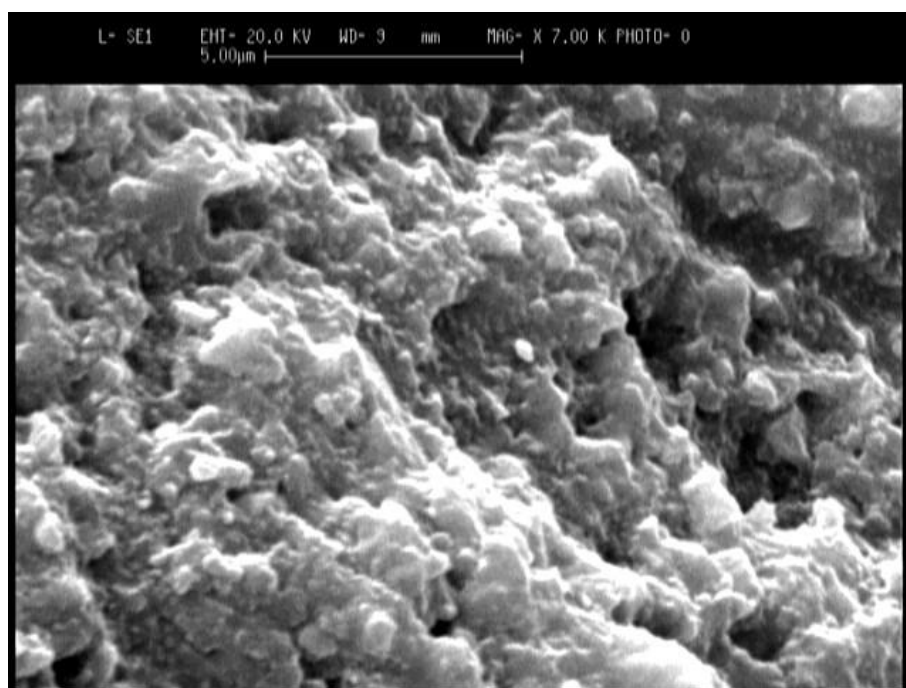
شکل ۶ تصویر سطح شکست نمونه کامپوزیتی را در شرایط عدم حضور اکسید تیتانیوم نشان می دهد که براساس آن می توان سطح لایه لایه شده را نشان داد. همچنین می توان این لایه ها را در سطح شکست نمونه کامپوزیتی حاوی نیم و یک درصد وزنی اکسید تیتانیوم مشاهده کرد (شکل های ۷ و ۸). از مقایسه سطح شکست در حالت عاری از اکسید تیتانیوم با نمونه های حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم می توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی نانوذرات تیتانیوم، پستی و بلندی سطح افزایش می یابد. این امر بدین دلیل است که نانوذرات اکسید تیتانیوم به عنوان نقطه ی تمرکز تنش عمل کرده و جوانه زنی ترک از این نقاط شروع می شود. ترک های به وجود آمده در هنگام اشاعه به یکدیگر برخورد کرده و همین امر منجر به تغییر مسیرشان می شود که در نتیجه پستی بلندی ها افزایش می یابد. از طرف دیگر نانوذرات خود به عنوان مانعی در سر راه ترک عمل می کنند که می توانند مانع از پیشروی ترک شوند. این امر نیز می تواند شاهده ی بر بهبود خواص مکانیکی باشد.



شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه کششی کامپوزیت تجاری



شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه کششی کامپوزیت تجاری تقویت شده با ۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم



شکل ۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه کششی کامپوزیت تجاری تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم

نتایج به دست آمده از آزمون فشار نشان داد با افزایش میزان درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم، استحکام فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. داده‌های استخراج شده از نتایج به دست آمده در قالب مدول یانگ، کرنش شکست و استحکام در کرنش شکست بیان شده است که در جدول قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که در اثر افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم مدول الاستیک کاهش می‌یابد و این در حالی است که کرنش و استحکام شکست افزایش

یافته است. دلیل کاهش مدول الاستیک می تواند پدیده‌ی کلوخه‌ای شدن ذرات تیتانیوم باشد. در مقابل حضور نانوذرات تیتانیوم به عنوان یک سرامیک سخت می تواند استحکام شکست را افزایش دهد.

جدول ۳. داده‌های شاخص مربوط به آزمون فشار در نمونه‌های کامپوزیتی حاوی مقادیر مختلف نانوذرات اکسید تیتانیوم

نمونه کامپوزیتی	کرنش شکست	استحکام در کرنش شکست (MPa)
Dental Composite- 0 wt% TiO ₂	۰/۰۷۱	۱۸۰
Dental Composite - 0.5 wt% TiO ₂	۰/۰۸۰	۲۱۰
Dental Composite - 1 wt% TiO ₂	۰/۰۸۹	۲۰۷

براساس داده‌های به دست آمده می توان نتیجه گرفت که حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم در کامپوزیت منجر به شکست ترد می شود که امری تقریباً بدیهی است. به این دلیل که نانوذرات اکسید تیتانیوم به عنوان عامل تمرکز تنش عمل می نماید.

نتیجه گیری

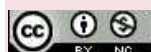
یکی از مهم ترین مواد مورد استفاده در دندان پزشکی، کامپوزیت های دندانی است. کامپوزیت های دندانی مورد استفاده می تواند شامل ترکیبات بیسفنول A و مواد سرامیکی باشد که در اشکال و انواع مختلف تولید می شوند. در این تحقیق تلاش شده است تا تأثیر نانوذرات اکسید تیتانیوم بر روی کامپوزیت دندانی تجاری مورد مطالعه قرار گیرد. بدین ترتیب نمونه های حاوی صفر، نیم و یک درصد وزنی از نانوذرات اکسید تیتانیوم به همراه کامپوزیت تجاری فراهم گردید و خواص کششی و فشاری نمونه های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به نتایج به دست آمده اشاره خواهد شد. طیف سنجی فرو سرخ حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم را به واسطه پیک های ۶۲۰، ۱۴۹۴، ۲۳۶۷ و 3380 cm^{-1} نشان می دهد که علاوه بر آن می تواند حاکی از پیوند با زمینه نیز باشد. همچنین مورد دیگری که می توان بر آن تأکید کرد، حضور پیک های ۴۶۵، ۷۸۸، ۱۰۸۶، ۱۴۵۰ و 2915 cm^{-1} به واسطه حضور ذرات اکسید سیلیسیم است. بررسی خواص کششی نشان داد که با افزایش میزان درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم استحکام کششی از ۲۵ مگاپاسکال به ۴۱ مگاپاسکال افزایش پیدا می کند و این در حالی است که کرنش شکست از ۷/۵ درصد به ۶/۴ درصد کاهش پیدا می کند. آزمون کشش همچنین نشان داد که با افزایش نانوذرات اکسید تیتانیوم مدول یانگ از ۶۲۲ مگاپاسکال به ۸۵۶ مگاپاسکال افزایش پیدا می کند. بررسی میکروسکوپی سطح شکست نمونه های کشش نشان داد که پستی و بلندی هایی در سطح شکست ایجاد می شود که به واسطه حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم افزایش پیدا می کند. دلیل این امر جوانه زنی و اشاعه ترک به واسطه حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم به عنوان مراکز تمرکز تنش است. بررسی آزمون فشار نشان داد که مدول الاستیک در اثر حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم از ۲/۹۸ به ۱/۷۲ کاهش می یابد و دلیل آن می تواند کلوخه ای شدن نانوذرات مذکور باشد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که در اثر حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم تنش شکست از ۱۸۰ مگاپاسکال به ۲۱۰ مگاپاسکال افزایش پیدا می کند. همچنین در این راستا می توان به افزایش کرنش شکست نیز اشاره کرد که از ۷/۱ درصد به ۸/۹ افزایش پیدا می کند.

منابع

1. Berkovitz BKB, Holland GR, Moxham BJ. Oral Anatomy, Histology and Embryology. 6th ed. Elsevier; 2024.
2. White TD, Folkens PA. Teeth. In: Human Osteology. 3rd ed. Academic Press; 2012.

3. Chandra S. Textbook of Dental and Oral Histology and Embryology with MCQs. Jaypee Brothers Medical Publishers; 2004.
4. Chen L, Suh BI. Bisphenol A in dental materials: A review. JSM Dent. 2013;1(1):2013.
5. El-Adl ET, Ebaya MM, Habib ES, Zaghloul NM. Comparative measurement of short-term fluoride release and inhibition of caries around restoration by ion releasing restorative materials: An in vitro study. Sci Rep. 2025;15:1600.
6. Majstorović J, Jenko M, Ovsenik M. Biocompatible materials in dentistry. In: Socratic Lectures: 12th International Symposium. Ljubljana: University of Ljubljana Press; 2025. p. 82-86.
7. Kisumbi BK, Osiro OA, Gathece L, Maina SW. Dental amalgam phase-down: Status, alternatives, strategies and preparedness for implementation: A review. Int J Dent. 2025;2025:6688410.
8. Dursun E, Chabouis HF, Attal JP, Raskin A. Bisphenol A release: Survey of the composition of dental composite resins. Open Dent J. 2016;10:446-53.
9. Guimarães GMF, Bronze-Uhle ES, Lisboa-Filho PN, Fugolin APP, Borges AFS, Gonzaga CC, et al. Effect of the addition of functionalized TiO₂ nanotubes and nanoparticles on properties of experimental resin composites. Dent Mater. 2020;36(11):1444-55.
10. Ramalho A, de Carvalho MD, Antunes PV. Effects of temperature on mechanical and tribological properties of dental restorative composite materials. Tribol Int. 2013;63:186-95.
11. Zhang H, Darvell BW. Mechanical properties of hydroxyapatite whisker-reinforced Bis-GMA-based resin composites. Dent Mater. 2012;28(8):824-30.
12. Miao X, Zhu M, Li Y, Zhang Q, Wang H. Synthesis of dental resins using diatomite and nano-sized SiO₂ and TiO₂. Prog Nat Sci Mater Int. 2012;22(2):94-9.
13. Yu B, Ahn JS, Lim JJ, Lee YK. Influence of TiO₂ nanoparticles on the optical properties of resin composites. Dent Mater. 2009;25(9):1142-7.
14. Alsharif SO, Bin Md Akil H, Abbas Abd El-Aziz N, Arifin Bin Ahmad Z. Effect of alumina particles loading on the mechanical properties of light-cured dental resin composites. Mater Des. 2014;54:430-5.
15. Lin CT, Lee SY, Keh ES, Dong DR, Huang HM, Shih YH. Influence of silanization and filler fraction on aged dental composites. J Oral Rehabil. 2000;27(11):919-26.
16. Krause WR, Park SH, Straup RA. Mechanical properties of BIS-GMA resin short glass fiber composites. J Biomed Mater Res. 1989;23(10):1195-211.
17. Fong H. Electrospun nylon 6 nanofiber reinforced BIS-GMA/TEGDMA dental restorative composite resins. Polymer. 2004;45(7):2427-32.
18. Meyers MA, Chen PY, Lin AYM, Seki Y. Biological materials: Structure and mechanical properties. Prog Mater Sci. 2008;53(1):1-206.

استناد به این مقاله: کمالی، علی، و زبرجد، سید مجتبی. (۱۴۰۵). اثر نانو ذرات TiO₂ روی رفتار کششی و فشاری بیسفنول A قابل کاربرد در مواد دندانپزشکی. فصلنامه پیشرفت‌های مهندسی در حوزه‌ی پزشکی و مواد، ۲(۱)، ۳۰-۴۲.



Journal of Recent Advancements in Material Science and Biomedical Engineering is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.