Original Article

https://doi.org/10.48305/v0i0.2147

Journal of Isfahan Dental School

2024; 20(3): 184-95

Investigating the Fracture Toughness of Ceramic Laminate Veneers Reinforced with Barium Titanate Nanoparticles Using the Finite Element Method

Masomeh Rostamzadeh[1]
Farshad Rahimi[2]

1. **Corresponding Author:** Department of Prosthodontics, School of Dentistry, Kurdistan University of Medical Sciences, Sanandaj, Iran.
Email: masomehrostamzadeh460@gmail.com
2. Student Research Committee, Kurdistan University of Medical Sciences, Sanandaj, Iran.

Abstract

Introduction: The issue of enhancing ceramic laminates with nanoparticles to decrease their failure rate can be explored using the finite element method. The purpose of this study was to investigate the potential strengthening of ceramic laminates by incorporating barium titanate nanoparticles in the crystalline phase.

Materials & Methods: This experimental-analytical study was conducted in the spring of 2023 in the Faculty of Dentistry of Kurdistan University of Medical Sciences. The laboratory study utilized Ansys software to create eight meshed 3D models of IPS e.max Press ceramic laminates reinforced with 5%, 10%, and 20% concentrations of barium titanate nanoparticles. Two forces at 60 and 125 degrees were applied to the incisor palatal surface of the ceramic laminates. Finite element analysis using von Mises equivalent stress predicted material failure probability. The data were analyzed and interpreted qualitatively.

Results: The results indicated that adding nanoparticles increased von Mises equivalent stress, resulting in improved fracture resistance of ceramic laminates. Increasing nanoparticle concentration raised the maximum equivalent stress but decreased the minimum equivalent stress, leading to decreased fracture strength under lower stresses. However, at a 10% concentration of barium titanate nanoparticles by weight, minimum equivalent stress increased.

Conclusion: Based on the study's findings, incorporating barium titanate nanoparticles into IPS Emax Press ceramic laminates can reduce maximum stress distribution within the laminate structure. This increase in equivalent stress can enhance laminate resistance to cracking and failure.

Key words: Dental veneers; Barium titanate; Fracture; Flexural strength; Finite element analysis

Received: 01.06.2024 **Revised**: 03.09.2024 **Accepted:** 05.11.2024

How to cite: Rostamzadeh M, Rahimi F. Investigating the Fracture Toughness of Ceramic Laminate Veneers Reinforced with Barium Titanate Nanoparticles Using the Finite Element Method. J Isfahan Dent Sch 2024; 20(3): 184-95.

مقاله اصیل پژوهشی

https://doi.org/10.48305/v0i0.2147
Crossref

مجله دانشکده
دندان‌پزشکی اصفهان
۱۴۰۳؛ ۲۰(۳): ۱۸۴ تا ۱۹۵

بررسی مقاومت به شکست لامینیت‌های سرامیکی تقویت شده با نانوذرات باریم تیتانات به روش اجزاء محدود

معصومه رستم‌زاده [۱]
فرشاد رحیمی [۲]

۱. **نویسنده مسؤول:** استادیار، گروه پروتزهای دندانی، گروه پروستودانتیکس، دانشکده‌ی دندان‌پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران.
Email: Masomehrostamzadeh460@gmail.com
۲. کمیته‌ی تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران.

چکیده

مقدمه: موضوع تقویت لامینیت‌های سرامیکی با نانوذرات، به جهت کاهش نرخ شکست آن‌ها می‌تواند توسط روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گیرد. هدف این مطالعه، بررسی پتانسیل تقویت لامینیت‌های سرامیکی توسط نانوذره باریم تیتانات در فاز کریستالی بود.

مواد و روش‌ها: این مطالعه‌ی تجربی- تحلیلی در بهار ۱۴۰۳ در دانشکده‌ی دندان‌پزشکی دانشگاه علوم پزشکی کردستان انجام شد. مطالعه شامل تهیه‌ی ۸ مدل با استفاده از نرم‌افزار Ansys 2024 R1، سه بعدی مش‌بندی شده لامینیت‌های سرامیکی (Innovative Pressable Solutions) IPS تقویت شده با غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد نانوذره‌ی باریم تیتانات می‌باشد. دو نیرو با زاویه‌ی ۶۰ و ۱۲۵ درجه به سطح انسیزوپالاتال لامینیت‌های سرامیکی وارد شدند. تحلیل اجزاء محدود با استفاده از تنش معادل فون مایزز که پیش‌بینی‌کننده‌ی احتمال شکست مواد است انجام شد. داده‌ها به روش آنالیز کیفی تحلیل و تفسیر شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، افزودن نانوذرات باعث افزایش مقدار تنش معادل فون مایزز و درنتیجه رفتار بهتر لامینیت‌های سرامیکی در برابر شکست می‌شود. با افزایش غلظت نانوذرات میزان حداکثر تنش معادل افزایش می‌یابد اما در مقابل، میزان حداقل تنش معادل کاهش می‌یابد و رفتار نمونه‌ها در مواجه با تنش‌های پایین‌تر از نظر استحکام شکست بدتر می‌شود. البته برای غلظت ۱۰ درصد وزنی نانوذره‌ی باریم تیتانات مقدار حداقل تنش معادل نیز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: مطابق یافته‌ها افزودن نانوذرات باریم تیتانات به ساختار لامینیت‌های سرامیکی IPS می‌تواند توزیع تنش حداکثر در ساختمان لامینیت را کاهش داده و با افزایش میزان تنش معادل که پیش‌بینی‌کننده‌ی رفتار لامینیت پیش از بروز شکست می‌باشد، می‌تواند ساختمان لامینیت را نسبت به بروز ترک و در نهایت شکست مقاوم سازد.

کلید واژه‌ها: ونیرهای دندانی؛ باریم تیتانات؛ شکست؛ استحکام خمشی؛ آنالیز اجزاء محدود

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲ **تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳** **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵**

استناد به مقاله: رستم‌زاده معصومه، رحیمی فرشاد. بررسی مقاومت به شکست لامینیت‌های سرامیکی تقویت شده با نانوذرات باریم تیتانات به روش اجزاء محدود. مجله دانشکده دندانپزشکی اصفهان. ۱۴۰۳؛ ۲۰(۳): ۱۸۴-۱۹۵.

مقدمه

در طول دهه‌ی گذشته، به نظر می‌رسد که علاقه‌ی فزاینده‌ای به استفاده از مواد سرامیکی در دندان‌پزشکی به وجود آمده است. لامینیت‌های سرامیکی جهت برآورده کردن خواسته‌های بیماران برای بهبود زیبایی نسبت به سایر درمان‌های زیبایی ترجیح داده شده‌اند (۱). لامینیت‌های سرامیکی دندانی به دلیل سازگاری زیستی، دوام، جذابیت‌های ظاهری و زیبایی به طور گسترده در اقدامات ترمیمی دندان‌ها استفاده می‌شوند. امروزه تقاضای فزاینده‌ای برای ترمیم‌های زیبایی دندانی وجود دارد که از نظر بصری با دندان مطابقت داشته باشند و به طور مؤثری به بافت دندان بچسبند و در عین حال زیبایی را به نحو چشمگیری تأمین کنند (۲).

با این حال، طول عمر لامینیت‌های سرامیکی به دلیل نیروهای متعددی که به آن‌ها وارد می‌شود، همیشه مورد سؤال بوده و شکستگی این لامینیت‌ها همچنان یک چالش مهم است. عوامل مختلفی می‌توانند بر پیش‌آگهی (Prognosis) طولانی‌مدت لامینیت‌های سرامیکی تأثیر بگذارند که عبارتند از: انتخاب مورد (Case Selection) دقیق، سطح دندان، طراحی، تراش و آماده‌سازی، ضخامت سرامیک، مراحل ساخت لابراتواری، مواد مورد استفاده برای سمان کردن، و نیروهای فانکشنال و پارافانکشنال (۳).

در این زمینه، تقویت لامینیت‌های سرامیکی دندانی توسط نانوذرات، با توجه به خواص مکانیکی برتر و بهینه نانوذرات، ممکن است بتواند مقاومت در برابر شکستگی آن‌ها را افزایش داده و در نتیجه نتایج بالینی را بهبود بخشد.

در لامینیت‌های سرامیکی دندانی، شکستگی به دلیل ترکیبی از عیوب ذاتی، ریزترک‌ها و شکست منجر به شکننده شدن رخ می‌دهد. تقویت این لامینیت‌ها با نانوذرات می‌تواند مقاومت آن‌ها را در برابر شکست به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. الحاق نانوذرات به لامینیت‌های سرامیکی دندانی از طریق تکنیک‌های مختلفی از جمله نفوذ، اشباع و روش های هیدروترمال قابل انجام است. هر تکنیک بسته به کاربرد خاص و نتیجه مطلوب، مزایا و معایب خاص خود را دارد (۴).

ترکیب موفقیت‌آمیز نانوذرات با لامینیت‌های سرامیکی دندانی را می‌توان به ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها مانند افزایش سختی، استحکام و شکل‌پذیری نسبت داد. علاوه بر این، نانوذرات می‌توانند پیوند بین لامینیت سرامیکی و ساختار زیرین دندان را بهبود بخشند و خواص مکانیکی کلی لامینیت را افزایش دهند.

نانوذره‌ی انتخابی در این پژوهش برای تقویت لامینیت‌های سرامیکی، باریم تیتانات (Barium Titanate) می‌باشد. نانوذرات باریم تیتانات به دلیل خواص مکانیکی، نوری و الکتروشیمیایی منحصربه‌فردشان مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات عملکرد دی‌الکتریک، الکترومکانیکی و الکتروکاتالیستی عالی از خود نشان می‌دهند (۵).

نانوذرات باریم تیتانات برای سنتز مواد کامپوزیتی کاربردی زیادی استفاده شده‌اند. افزودن این نانوذرات به ماتریس‌های پلیمری مختلف می‌تواند خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و عملکرد الکتروشیمیایی این مواد را به طور قابل توجهی افزایش دهد. به عنوان مثال، ادغام نانوذرات باریم تیتانات در ماتریس‌های اپوکسی برای افزایش استحکام کششی و استحکام شکست کامپوزیت‌های اپوکسی گزارش شده است (۶).

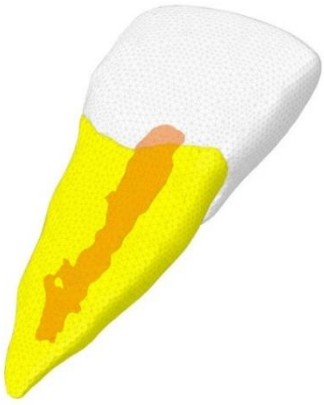
در نتیجه، شکستن لامینیت‌های سرامیکی دندانی و پتانسیل تقویت آن‌ها با نانوذرات، حوزه‌های تحقیقاتی قابل توجهی در زمینه‌ی علم مواد دندانی و پروتزهای دندانی است. با درک مکانیسم‌های اساسی شکستگی و بهینه‌سازی ادغام نانوذرات در ساختمان لامینیت‌های سرامیکی دندانی، محققان می‌توانند مواد پیشرفته‌ای با مقاومت در برابر شکستگی، زیبایی‌شناسی و عملکرد بالینی بهبود یافته تولید کنند. هدف این مطالعه، بررسی پتانسیل تقویت لامینیت‌های سرامیکی توسط نانوذره‌ی باریم تیتانات در فاز کریستالی با استفاده از آنالیز اجزاء محدود می‌باشد. فرضیه‌ی صفر این مطالعه بیان می‌دارد که افزودن نانوذرات باریم تیتانات به صورت یکنواخت به ساختار لامینیت‌های سرامیکی تأثیری بر استحکام شکست آن‌ها ندارد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه‌ی تجربی- تحلیلی در بهار سال ۱۴۰۳ در دانشکده‌ی دندان‌پزشکی دانشگاه علوم پزشکی کردستان و پس از دریافت مصوبه‌ی کارگروه/کمیته‌ی اخلاق در پژوهش به شناسه‌ی IR.MUK.REC.1402.258 جهت بررسی تأثیر افزودن نانوذرات باریم تیتانات به لامینیت‌های سرامیکی IPS Emax Press بر خواص مکانیکی و استحکام به شکست آن‌ها انجام شد.

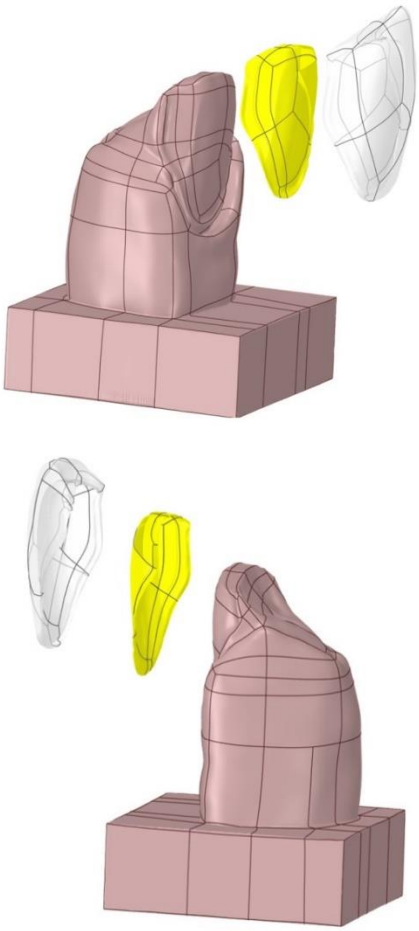
طراحی مدل سه بعدی

یک ماکرو مدل سه بعدی از یک ثنایای مرکزی فک بالا با استفاده از نرم‌افزار ANSYS SpaceClaim 2024 (Ansys Inc., Canonsburg, PA, USA) مطابق با آناتومی دندان ویلر (۷) (شکل ۱) طراحی و ساخته شد. پس از تعریف و تخصیص بخش‌های مختلف دندان از جمله مینا، عاج، سمنتوم، اتاقک پالپ و بافت پالپ، آماده‌سازی سطح دندان جهت طراحی لامینیت سرامیکی به روش Butt-Joint با کاهش ۱ میلی‌متری در لبه انسیزال و با خط خاتمه تراش چمفر با عرض ۰/۵ میلی‌متر در سطح لیبیال طراحی شد (۸). یک لایه سمان با ضخامت ۳۰ میکرومتر نیز طراحی و ساخته شد (۹). ضخامت ثنایای طراحی شده و لایه‌ی سمان ثابت فرض شد.



شکل ۱: مدل سه بعدی دندان ثنایای مرکزی ماگزیلا

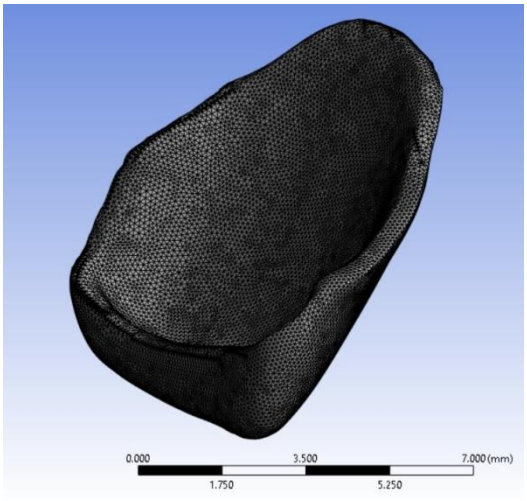
در مرحله‌ی بعد، لامینیت سرامیکی در محیط نرم‌افزار Exocad 24 (Exocad, Darmstadt, Germany) به ضخامت ۱ میلی‌متر در لبه‌ی انسیزال و ۰/۵ میلی‌متر در سطح لیبیال طراحی شد و مدل سه بعدی آن به محیط نرم‌افزار ANSYS انتقال داده شد. مدل‌های دندان آماده‌سازی شده، سمان و لامینیت در محیط نرم‌افزار اسمبل شدند (شکل ۲).



شکل ۲: مدل سه بعدی اسمبل شده دای، سمان و لامینیت سرامیکی

مدل‌سازی سه بعدی اجزاء محدود

عناصر جامد چهار وجهی خطی (Linear tetrahedral solid elements) در تجزیه و تحلیل اجزا محدود استفاده شد و مش‌بندی با اندازه‌ی عناصر ۱۰ میکرومتر انجام گردید. پس از انجام آزمون هم‌گرایی با مقایسه‌ی توزیع تنش در نواحی مارژین و باکال، در مدل سه بعدی لامینیت سرامیکی تعداد کل عناصر ۲۱۶۲۲۸ عدد و تعداد گره‌ها ۳۲۶۱۸۳ عدد بود (شکل ۳).



شکل ۳: لامینیت سرامیکی مش‌بندی شده

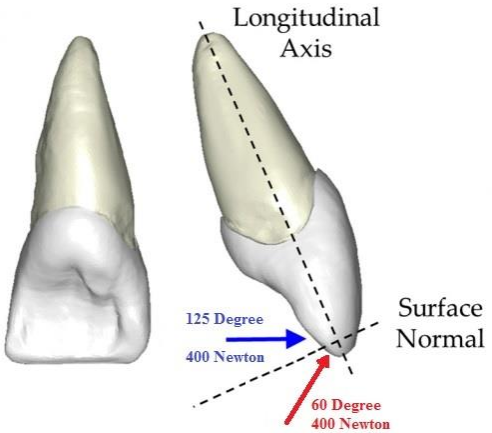
نواحی تماس سمان با سطح داخلی لامینیت و نواحی فینیش لاین جهت ایجاد شرایط مرزی و محدود کردن اثر پارامترهای تأثیرگذار بر استحکام شکست لامینیت سرامیکی از جمله خاصیت الاستیک اینترفیس های لامینیت–سمان، سمان–لایه باندینگ و باندینگ–مینای دندان و همچنین لقی فیزیولوژیک دندان، به صورت ساپورت ثابت (۱۰) تعریف شد.

جنس لامینیت‌های سرامیکی IPS Emax. Press Glass Ceramic (Ivoclar, New York,USA) انتخاب شد و به ژئومتری مدل سه بعدی لامینیت سرامیکی تخصیص داده شد. خواص مکانیکی لامینیت‌های IPS Emax. با استفاده از اطلاعات ارائه شده توسط شرکت سازنده و مطالعات مرتبط در بخش داده‌های مهندسی نرم‌افزار ANSYS Workbench وارد شد.

به منظور تقویت لامینیت‌های سرامیکی، نانوذره انتخابی باریم تیتانات (BaTiO3) بود و خواص مکانیکی آن در فاز کریستالی پس از قرار گرفتن در شرایط هیدرو ترمال (۱۱) مانند استحکام فشاری، استحکام کششی، مدول یانگ و ضریب پواسون در بخش داده‌های مهندسی نرم‌افزار وارد شد.

جهت تقویت لامینیت‌های سرامیکی غلظت‌های مختلفی از نانوذرات با فرض توزیع یکنواخت به ژئومتری مدل سه بعدی که نقش نمونه کنترل را ایفا می‌کند، اضافه شد (شکل ۳).

دو بار مکانیکی مختلف به صورت Remote Force به ناحیه‌ی پالاتال لبه انسیزال هر مدل شامل مدل بدون نانوذره (کنترل) و مدل‌های حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات اعمال شد (۱۲). یک نیروی ۴۰۰ نیوتن (۱۲) با زاویه‌ی ۶۰ درجه بین محور طولی دندان و بردار عمود بر سطح پالاتال دندان، حرکات اینتر کاسپال حین فانکشن را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین، یک نیروی ۴۰۰ نیوتنی با زاویه‌ی ۱۲۵ درجه، حرکات پروتروزیو را شبیه‌سازی می‌کند. این نیروها در فاصله‌ی تقریبی ۱ میلی‌متر تا حاشیه‌ی لبه‌ی انسیزال به مدل اعمال شدند، جایی که آن‌ها بر روی چندین گره (۲۰ گره) در مرکز سطح پالاتال توزیع شدند تا از تمرکز استرس غیر واقعی روی یک گره منفرد جلوگیری شود. نیروهای اعمال شده در این مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴: تصویر شماتیک مقدار و جهت نیروهای وارده

اتصالات اطراف لامینیت مدل‌سازی شده از نظر شرایط مرزی در تمام درجات آزادی برای تقلید از شرایط واقعی محدود شدند. ذکر این نکته ضروری است که منطقه‌ی تماس بین تمام اینترفیس‌ها کاملاً متصل و با استفاده از محدودیت‌های نرم‌افزاری به صورت صلب مدل‌سازی شده است. چنین محدودیت‌هایی تمام درجات آزادی انتقالی و چرخشی را در ناحیه‌ی تماس ثابت می‌کنند و یک پیوند همگن توزیع شده ایده‌آل را ایجاد می‌نماید.

همه‌ی مواد در مطالعه‌ی حاضر همگن، خطی الاستیک و همسانگرد در نظر گرفته شدند. خواص مکانیکی این مواد بر

اساس داده‌های مطالعات مرتبط و اطلاعات شرکت‌های سازنده در جدول ۱ فهرست شده‌اند.

سپس شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار شکستن لامینیت سرامیکی تحت شرایط بارگذاری مختلف اجرا می‌شود. نتایج شامل حداکثر و حداقل توزیع تنش و میانگین تنش ناشی از بارگذاری در سراسر سطح لامینیت سرامیکی می‌باشد.

در مرحله‌ی اول از الگوی ماکزیمم توزیع تنش برای بررسی رفتار لامینیت‌های سرامیکی بدون نانوذره و تقویت شده با نانوذره در شرایط بارگذاری استفاده شد. سپس شبیه‌سازی حداکثر استحکام شکست لامینیت‌های سرامیکی انجام گرفت.

مبنای این شبیه‌سازی استفاده از مفهوم تنش معادل (Equivalent Stress) است. تنش معادل، در واقع یک مشتق اسکالر انرژی کرنشی- برشی در واحد حجم است که در نقاط مختلف یک ماده‌ی تحت تنش اندازه‌گیری می‌شود و به تعیین احتمال شکست ماده‌ی مذکور با توجه به معیارهای شکست فون مایزز (von Mises) کمک می‌کند (۱۶). یک تفسیر فیزیکی از معیار فون مایزز این است که تسلیم ماده، زمانی آغاز می‌شود که انرژی الاستیک تغییر شکل‌دهنده به مقدار بحرانی برسد. به همین دلیل، معیار فون مایزز به عنوان معیار انرژی کرنش حداکثر تغییر شکل پیش از شکست نیز شناخته می‌شود (۱۷).

یافته‌ها

در این مطالعه به مقایسه چهار نمونه کنترل فاقد نانوذره و نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد نانوذره باریم تیتانات در دو گروه نیروی وارده به لامینیت سرامیکی با زاویه‌های ۶۰ و ۱۲۵ درجه از نظر تنش معادل فون مایزز برای تحلیل احتمال شکست لامینیت‌های سرامیکی IPS Emax. Press پرداخته شد.

در مرحله‌ی اول برای تأیید اثرات نانوذره باریم تیتانات بر کاهش الگوی ماکزیمم تنش ایجاد شده تحت نیروی وارده، تست حداکثر تنش اصلی (Maximum principal stress) در نرم‌افزار بر روی مدل مش‌بندی شده انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ و گراف توزیع حداکثر تنش اصلی در شکل ۵ آورده شده است.

با توجه به جدول مشاهده می‌شود که حداکثر تنش اصلی در نمونه با ۵ درصد نانوذرات تیتانات باریم (۱۴۱/۸۱ مگاپاسکال) در مقایسه با نمونه شاهد (۱۴۵/۱۸ مگاپاسکال) در فرمت مقدار حداکثر تنش اصلی ماکزیمم کمتر است.

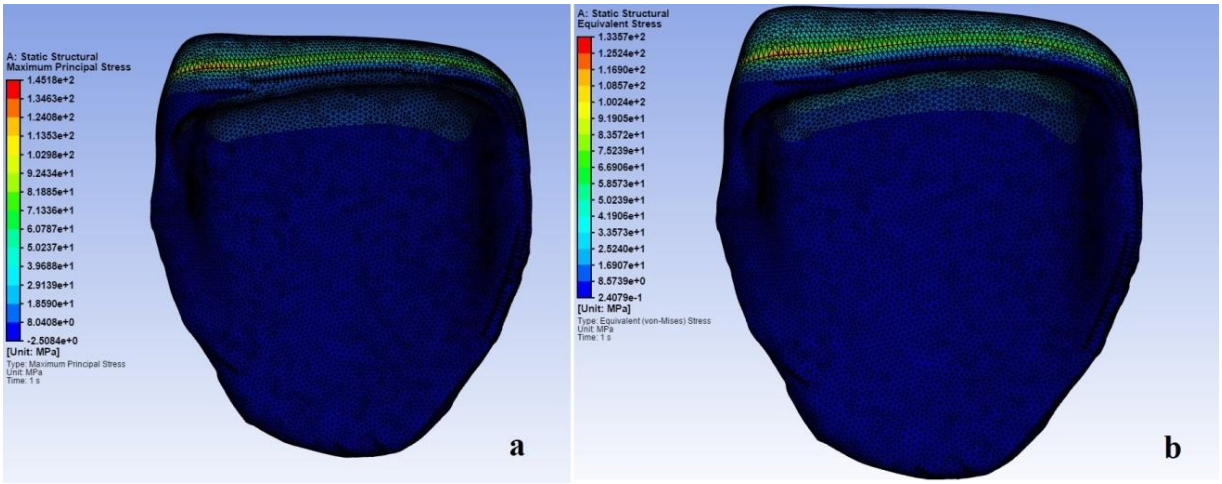
این یافته نشان می‌دهد که افزودن ۵ درصد نانوذرات تیتانات باریم به لامینیت سرامیکی IPS Emax ممکن است منجر به تولید لامینیت مقاوم‌تری شود که می‌تواند در برابر تنش‌های بالاتر به صورت بهتر و مؤثرتری مقاومت کند. این یافته نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات می‌تواند دوام و طول عمر لامینیت‌های سرامیکی را بهبود بخشد و پتانسیل کاهش

جدول ۱: خواص مکانیکی مواد استفاده شده در مطالعه. اطلاعات ارائه شده توسط شرکت سازنده

مواد و ساختارها	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مدول الاستیسیته (یانگ) (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	استحکام کششی (مگاپاسکال)	استحکام فشاری (مگاپاسکال)
مینا (۱۳)	۲/۶۱	۸۴۱۰۰	۰/۳۳	۳۰۵	۳۸۴
عاج (۱۳)	۱/۷۹	۱۸۶۰۰	۰/۳۲	۹۷/۸	۲۹۷
لایه‌ی ادهزیو(*)	–	۵۰۰۰	۰/۲۹	–	–
سمان Ivoclar Vivadent(*)	–	۴۵۰۰	۰/۲۴	–	–
لامینیت سرامیکی (*)	۲/۵	۹۵۰۰۰	۰/۲۳	۲/۱۱	۵۳۰
نانوذره باریم تیتانات در فاز کریستالی (۱۱،۱۴،۱۵)	۵/۹	۱۵۰۰۰۰	-۰/۰۰۲	۸۵/۵	۵۶۱

جدول ۲: مقادیر تنش اصلی ماکزیمم برای لامینیت سرامیکی

لامینیت سرامیکی IPS Emax. Press	حداکثر تنش اصلی ماکزیمم (مگاپاسکال)	میانگین تنش اصلی ماکزیمم (مگاپاسکال)
کنترل بدون نانوذره	۱۴۵/۱۸	۴/۹۴۵۴
نمونه‌ی حاوی ۵ درصد نانوذره باریم تیتانات	۱۴۱/۸۱	۴/۹۴۸۵



شکل ۵: تنش اصلی ماکزیمم در نمونه‌ی کنترل (a) و نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانوذره (b)

شکنندگی و مقاومت به شکست تحت تنش‌های بالا را افزایش دهد.

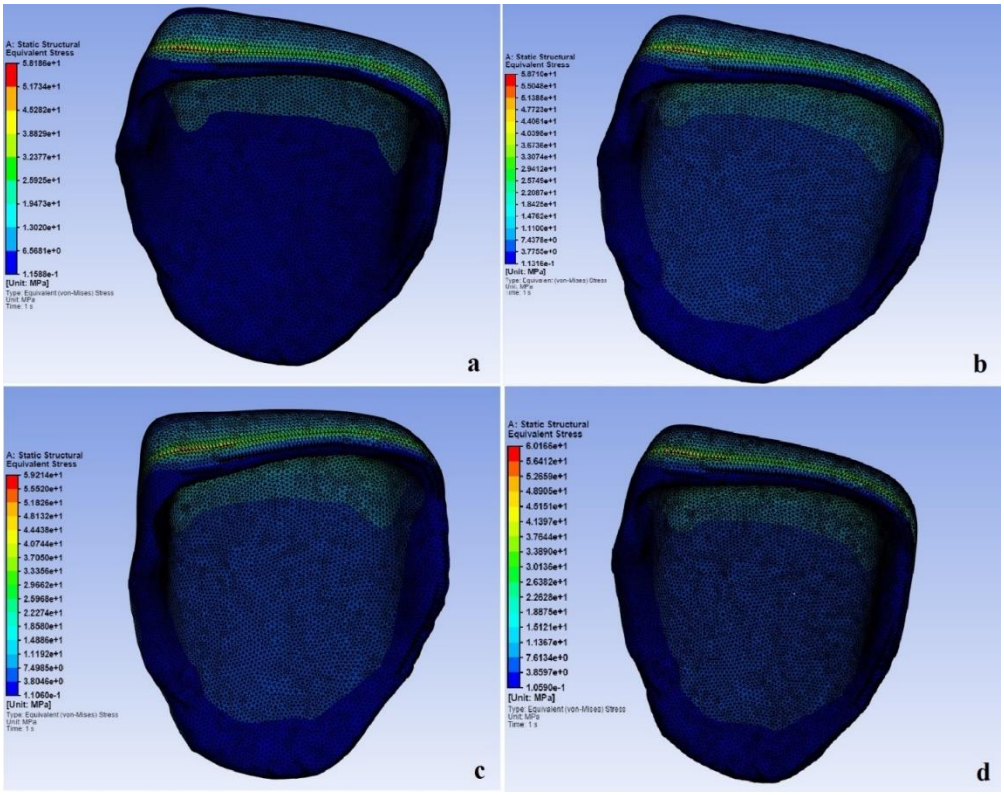
سپس توزیع تنش بر روی لامینیت‌های سرامیکی مدل‌سازی شده با توجه به معیار تنش معادل یا مؤثر(استرس فون مایزز) محاسبه شد. تأثیر نیروهای وارده و نتایج تنش معادل در سطوح باکال و پالاتال لامینیت در زاویه‌ی ۶۰ درجه (شکل ۶) و زاویه‌ی ۱۲۵ درجه (شکل ۷) نشان داده شده است.

برای مقایسه‌ی بین گروه‌ها از نظر میانگین تنش معادل از تحلیل کیفی استفاده گردید. داده‌های حاصل از آنالیز اجزاء محدود نمونه‌ها پس از بدست آوردن میانگین تحت نیروی ۴۰۰ نیوتون با زاویه ۶۰ درجه در جدول ۳ آورده شده‌اند.

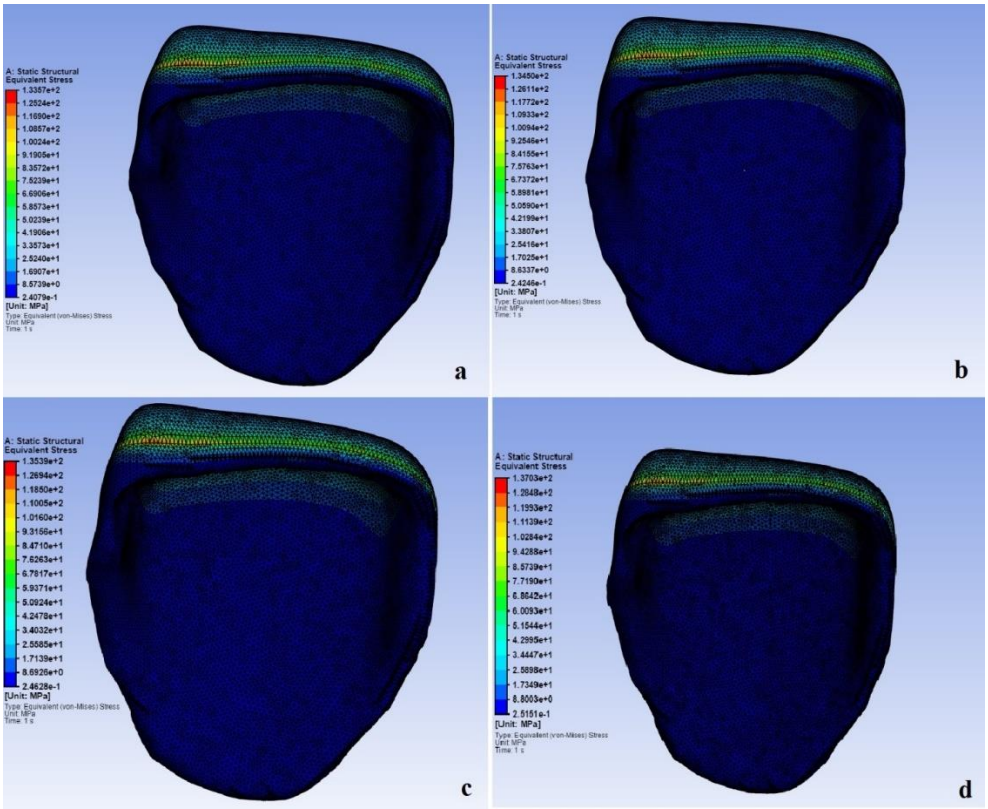
مشاهده می‌شود که درتست بارگذاری ۴۰۰ نیوتونی با زاویه‌ی ۶۰ درجه برای شبیه‌سازی نیروهای اینترکاسپال با افزایش میزان درصد وزنی نانوذرات BaTiO3 در لامینیت سرامیکی تقویت شده IPS Emax. Press، حداکثر تنش معادل نیز افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات BaTiO3 به مواد سازنده‌ی لامینیت سرامیکی، منجر به افزایش حداکثر تنشی می‌شود که روکش می‌تواند پیش از بروز شکست تحمل کند. بیشترین مقدار حداکثر تنش معادل با مقدار ۱۶۶/۶۰ مگاپاسکال برای لامینیت تقویت شده با ۲۰ درصد وزنی نانوذرات BaTiO3 مشاهده شد. با این حال، توجه به این نکته مهم است که حداقل تنش معادل نسبتاً ثابت باقی می‌ماند، که نشان می‌دهد توانایی این ماده برای تحمل تنش‌های کمتر با افزودن نانوذرات BaTiO3 تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

داده‌های حاصل از آنالیز اجزاء محدود نمونه‌ها پس از بدست آوردن میانگین تحت نیروی ۴۰۰ نیوتون با زاویه ۱۲۵ درجه در جدول ۴ آورده شده‌اند.

مشابه اعمال نیرو با زاویه ۶۰ درجه، مشاهده می شود که حداکثر تنش با افزودن نانوذرات BaTiO3 افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده استحکام شکست بالاتری بر اساس معیار تنش معادل فون مایزز است است. با این حال، حداقل تنش با افزودن ۲۰ درصد نانوذرات BaTiO3 به جز در نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی نانوذره کاهش می‌یابد. این یافته نشان می‌دهد که در تنش‌های با مقدار کم لامینیت سرامیکی حاوی ۱۰ درصد BaTiO3 نسبت به سایر نمونه‌ها شاخص شکنندگی



شکل ۶: توزیع تنش معادل فون مایزز در نمونه‌ی کنترل (a)، نمونه‌ی ۵ درصد (b)، نمونه‌ی ۱۰ درصد (c) و نمونه‌ی ۲۰ درصد وزنی (d) تحت نیروی ۴۰۰ نیوتونی با زاویه ۶۰ درجه



شکل ۷ : توزیع تنش معادل فون مایزز در نمونه‌ی کنترل (a)، نمونه‌ی ۵ درصد (b)، نمونه‌ی ۱۰ درصد (c) و نمونه‌ی ۲۰ درصد وزنی (d) تحت نیروی ۴۰۰ نیوتونی با زاویه‌ی ۱۲۵ درجه.

جدول ۳: مقادیر مربوط به حداکثر، حداقل و میانگین تنش معادل تحت نیروی ۴۰۰ نیوتونی با زاویه‌ی ۶۰ درجه

لامینیت سرامیکی IPS Emax. Press	حداکثر تنش معادل (مگاپاسکال)	حداقل تنش معادل (مگاپاسکال)	میانگین تنش معادل (مگاپاسکال)
کنترل بدون نانوذره	۵۶/۱۸۶	۰/۱۱۵۸۸	۵/۶۲۳۴
نمونه‌ی حاوی ۵ درصد نانوذره باریم تیتانات	۵۸/۷۱۰	۰/۱۱۳۱۶	۵/۶۳۴۱
نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد نانوذره باریم تیتانات	۵۹/۲۱۴	۰/۱۱۰۶	۵/۶۴۴۵
نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد نانوذره باریم تیتانات	۶۰/۱۶۶	۰/۱۰۵۹	۵/۶۶۴۷

جدول ۴: مقادیر مربوط به حداکثر، حداقل و میانگین تنش معادل تحت نیروی ۴۰۰ نیوتونی با زاویه‌ی ۱۲۵ درجه

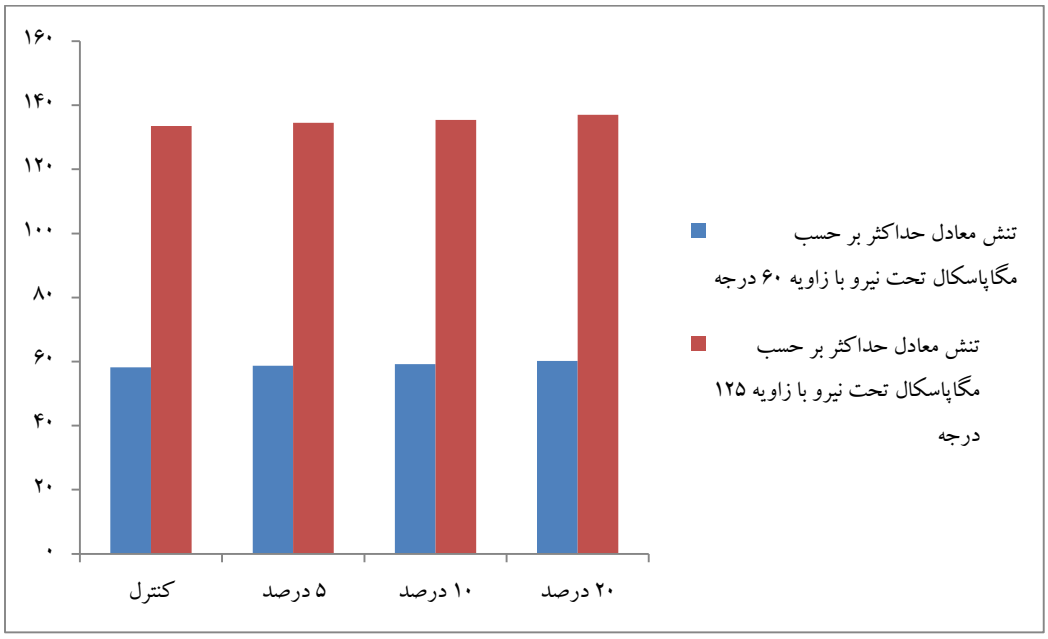
لامینیت سرامیکی IPS Emax. Press	حداکثر تنش معادل (مگاپاسکال)	حداقل تنش معادل (مگاپاسکال)	میانگین تنش معادل (مگاپاسکال)
کنترل بدون نانوذره	۱۳۳/۵۷	۰/۲۴۰۷۹	۶/۷۲۷۱
نمونه‌ی حاوی ۵ درصد نانوذره باریم تیتانات	۱۳۴/۵	۰/۲۴۲۴۶	۶/۷۶۲۵
نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد نانوذره باریم تیتانات	۱۳۵/۳۹	۰/۲۴۶۲۸	۶/۷۹۷۳
نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد نانوذره باریم تیتانات	۱۳۷/۰۳	۰/۲۱۱۵۱	۶/۸۶۴۸

(Brittleness index) بالاتری داشته و نسبت به شکست مقاوم‌تر است.

نمودار مقایسه‌ی میزان تنش معادل حداکثر تحت نیروهای وارده بر نمونه‌های لامینیت‌های سرامیکی در نمودار ۸ نشان داده شده است.

بحث

این مطالعه به بررسی میزان تنش معادل فون مایزز برای پیش‌بینی احتمال شکست لامینیت‌های سرامیکی IPS Emax. Press پس از ادغام یکنواخت نانوذرات باریم تیتانات با درصدهای وزنی مختلف (۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی)



نمودار ۸: مقایسه‌ی تنش معادل حداکثر تحت نیروهای مختلف

با استفاده از آنالیز اجزاء محدود انجام شد. فرضیه صفر این بود که افزودن نانوذرات تفاوت قابل‌توجهی در استحکام شکست لامینیت‌های سرامیکی ایجاد نمی‌کند. با افزودن غلظت‌های مختلف نانوذره، مقدار تنش معادل فون مایزز افزایش یافت و این مقدار با افزایش غلظت افزایش می‌یابد که این یافته با انجام آنالیز اجزا محدود توسط نرم‌افزار تأیید شد و فرضیه‌ی صفر مطالعه رد شد و در نهایت مشخص شد که افزودن نانوذرات BaTiO3 به روکش‌های سرامیکی تقویت‌شده IPS Emax. Press به نظر می‌رسد استحکام مواد را به‌ویژه در رده‌ی حداکثر تنش معادل افزایش می‌دهد.

تحلیل المان محدود یک روش عددی برای مطالعه توزیع تنش است. مزیت این روش این است که می توان تعداد زیادی از متغیرها را بر روی یک مدل مطالعه کرد و خطر خطاهای آزمایش را کاهش داد. تنش درونی ساختارهای بالینی را می‌توان بدون مطالعه‌ی مستقیم روی بیماران با هر ابعاد و شکل ساختاری مورد مطالعه تحلیل کرد (۱۸).

مواد سرامیکی را می‌توان با ادغام ذرات ریز فلزات در ماتریس ساختاری آن‌ها تقویت کرد. مکانیسم‌های افزایش استحکام بر نوک ترک ایجاد شده اثر می‌گذارند تا در برابر افزایش عرض ترک مقاومت کنند (۱۹). Esparza-Vázquez و همکاران پس از ادغام نانوذرات در سرامیک، افزایش قابل توجهی در استحکام شکست گزارش کردند (۲۰).

مطالعه‌ی Uyor و همکاران به منظور بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی و ترمومکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی پروپیلن با استفاده از ترکیب نانوذرات باریم تیتانات با ساختارهای ابعادی مختلف با انجام گرفت. ایشان نتیجه گرفتند که نانوکامپوزیت‌های حاوی ترکیبی از نانوذرات سرامیکی باریم تیتانات با ساختارهای ابعادی متفاوت، پاسخ‌های مکانیکی برتری از خود نشان دادند. به عنوان مثال، سختی، مدول الاستیک و دمای نرم شدن این نانوکامپوزیت هیبریدی به طور قابل توجهی افزایش یافت. این بهبودها به اتصال مکانیکی موثر و سخت شدن ساختاری شبکه ماتریسی در حضور نانوذرات باریم تیتانات نسبت داده می‌شود که با نتایج مطالعه‌ی حاضر همسو بود (۲۱).

نانوذرات تیتانات باریم به دلیل خواص الکتریکی عالی، پایداری مکانیکی و شیمیایی شناخته شده‌اند. این نانوذرات ساختاری مکعبی دارند و دارای ضریب کیفیت مکانیکی بالایی هستند که معیاری برای سنجش انرژی تلف شده در یک ماده در نتیجه‌ی تنش مکانیکی است (۲۲). علاوه بر این، نانوذرات تیتانات باریم دارای استحکام مکانیکی بالایی هستند که توانایی یک ماده برای مقاومت در برابر استرس مکانیکی بدون شکستگی است. این ویژگی آن‌ها را در کاربردهای ساختاری مانند ساخت مواد قوی و سبک وزن مفید می کند (۲۳، ۲۴).

نکته‌ی امیدوارکننده‌ی برای اضافه کردن نانوذرات باریم به ساختار لامینیت‌های سرامیکی این است که نانوذرات تیتانات باریم در فاز کریستالی خود معمولاً سفید رنگ هستند. این موضوع به دلیل این واقعیت است که تیتانات باریم یک ماده باندگپ گسترده با فاصله‌ی باند حدود ۳,۲ eV است. این بدان معنی است که نور مرئی را جذب نمی‌کند و در عوض آن را منعکس می‌کند و ظاهری سفید به مواد می‌دهد (۲۵). نانوذرات تیتانات باریم به عنوان یک ماده زیست‌سازگار برای استفاده در کاربردهای زیست پزشکی مانند توسعه‌ی حسگرهای زیستی و سیستم‌های دارورسانی به خدمت گرفته شده‌اند (۲۴).

یکی از مشکلات استفاده از نانوذرات در ساختار لامینیت‌های سرامیکی، بحث پراکندگی نانوذرات است. نانوذرات با آگلومرهای بزرگ و شکل ناهمگن نانوذرات، بر حجم نانو لایه‌های اطراف ذرات تأثیر می‌گذارد و منجر به تجمع می‌شود که بر استحکام ماده تأثیر منفی می گذارد (۲۶). در صورت به حداقل رساندن مقدار کلوخگی (Agglomeration) مطالعات نشان داده‌اند که بهبود مقاومت در برابر شکست پس از ادغام نانوذرات در ساختار لامینیت‌های سرامیکی گزارش امکان‌پذیر می‌باشد (۲۷).

این مطالعه بهبود مقاومت به شکست لامینیت‌های سرامیکی را با غلظت‌های مختلف نانوذرات باریم تیتانات نشان داد. مطالعات بیشتری در مورد ترکیبات مختلف یا بهینه‌سازی

نانوذرات باریم تیتانات و تأثیر آن بر استحکام شکست به خصوص به صورت تجربی و لابراتواری مورد نیاز است. اگرچه روش تحلیل اجزا محدود ابزار مفیدی برای ارزیابی رفتار مکانیکی بافت‌ها تحت بارگذاری‌ها پیچیده و مختلف است، اما به دلیل نیاز به ساده‌سازی مدل دارای محدودیت‌هایی است (۲۸). نتایج این مطالعه باید با توجه به محدودیت‌های مدل فعلی تفسیر شود. محدودیت‌های این مطالعه شامل عدم لحاظ کردن لقی فیزیولوژیک دندان، ثابت فرض کردن ساختارهای زیرین لامینیت و رفتار الاستیک، خطی و همسانگرد مواد است. این محدودیت‌ها باعث تفاوت فاکتورهای بیومکانیکی این مطالعه با مطالعات in-vitro خواهد بود (۲۹).

توجه به این نکته حائز اهمیت است که عملکرد لامینیت‌های سرامیکی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله مواد مورد استفاده، هندسه و جهت لایه‌های لامینیت، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی اعمال شده بر مدل شبیه‌سازی قرار می گیرد. بنابراین، درک کامل این عوامل برای طراحی لامینیت‌های سرامیکی دندانی مؤثر با استحکام شکست بالا ضروری است.

در نهایت، در حالی که شبیه‌سازی محاسباتی می‌تواند بینش‌های ارزشمندی در مورد استحکام شکست لامینیت‌های سرامیکی ارائه کند، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در برابر داده‌های تجربی حاصل از تست‌های آزمایشگاهی برای اطمینان از صحت و قابلیت اطمینان آن‌ها بسیار مهم است.

نتیجه‌گیری

مطابق یافته‌های این مطالعه، افزودن نانوذرات باریم تیتانات به ساختار لامینیت‌های سرامیکی IPS Emax. Press می‌تواند توزیع تنش حداکثر در ساختمان لامینیت را کاهش داده و با افزایش میزان تنش معادل که پیش‌بینی کننده‌ی رفتار لامینیت پیش از بروز شکست می‌باشد می‌تواند ساختمان لامینیت را نسبت به بروز ترک و در نهایت شکست مقاوم سازد. با افزایش درصد نانوذرات BaTiO3 میزان استحکام لامینیت‌های سرامیکی در برابر شکست و افزایش عرض ترک افزایش می‌یابد. با این حال، کاهش حداقل تنش معادل با افزودن ۲۰ درصد نانوذرات BaTiO3 در جهت‌های ۶۰ و ۱۲۵ درجه می‌تواند نشان‌دهنده‌ی ضعف بالقوه در توانایی ماده برای تحمل تنش‌های پایین‌تر در آن جهت در عین مقاومت به شکست در تنش‌های بالاتر باشد که این موضوع در مورد نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی برعکس می‌باشد. علاوه بر این، سطوح تنش کلی در جهت ۱۲۵ درجه بالاتر است، که نشان‌دهنده‌ی نگرانی بالقوه برای دوام و طول عمر لامینیت‌های سرامیکی تحت نیروهای پروتروزیو است.

سپاسگزاری

این مقاله از پایان نامه‌ی دکترای حرفه‌ای دندان‌پزشکی عمومی مصوب در اسفند ماه ۱۴۰۲ در دانشکده‌ی دندان‌پزشکی دانشگاه علوم پزشکی کردستان به شماره‌ی ۱۴۰۲/۲۵۸با کد اخلاق .۱۴۰۲,۲۵۸IR.MUK.REC استخراج شده است.

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از معاونت و مسئولان پژوهشی دانشکده‌ی دندان‌پزشکی دانشگاه علوم پزشکی کردستان و هیأت داوران پایان‌نامه که ما را در انجام، تأمین منابع و بهبود کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

References

1. Babu PJ, Alla RK, Alluri VR, Datla SR, Konakanchi A. Dental ceramics: Part I–An overview of composition, structure and properties. Am J Mater Eng Technol 2015; 3(1): 13-8.
2. Cornacchia TP, Las Casas EB, Cimini CA, Peixoto RG. 3D finite element analysis on esthetic indirect dental restorations under thermal and mechanical loading. Med Biol Eng Comput 2010; 48(11): 1107-13.
3. Alenezi A, Alsweed M, Alsidrani S, Chrcanovic BR. Long-term survival and complication rates of porcelain laminate veneers in clinical studies: a systematic review. J Clin Med 2021; 10(5): 1074.
4. Morimoto S, Albanesi RB, Sesma N, Agra CM, Braga MM. Main clinical outcomes of feldspathic porcelain and glass-ceramic laminate veneers: a systematic review and meta-analysis of survival and complication rates. Int J Prosthodont 2016; 29(1): 38-49.

5. Gorelov BM, Kotenok EV, Makhno SN, Sydorchuk VV, Khalameida SV, Zazhigalov VA. Structure and optical and dielectric properties of barium titanate nanoparticles obtained by the mechanochemical method. Technical Physics 2011; 56: 83-91.
6. Melendez IM, Neubauer E, Angerer P, Danninger H, Torralba JM. Influence of nano-reinforcements on the mechanical properties and microstructure of titanium matrix composites. Compos Sci Technol 2011; 71(8): 1154-62.
7. Nelson SJ. Wheeler's dental anatomy, physiology and occlusion: 1st SAE-E-book. Elsevier Health Sciences; 2015.
8. Rosenstiel SF, Land MF. Contemporary fixed prosthodontics-e-book: contemporary fixed prosthodontics-e-book. Elsevier Health Sciences; 2015.
9. Turgut S, Bagis B. Effect of resin cement and ceramic thickness on final color of laminate veneers: an in vitro study. J Prosthet Dent 2013; 109(3): 179-86.
10. Wakabayashi N, Ona M, Suzuki T, Igarashi Y. Nonlinear finite element analyses: advances and challenges in dental applications. J Dent 2008; 36(7): 463-71.
11. Grether MF, Coffeen WW, Kenner GH, Park JB. The mechanical stability of barium titanate (ceramic) implants in Vitro. Biomater Med Devices Artif Organs 1980; 8(3): 265-72.
12. Arora A, Upadhyaya V, Arora SJ, Jain P, Yadav A. Evaluation of fracture resistance of ceramic veneers with different preparation designs and loading conditions: An: in vitro: study. J Indian Prosthodont Soc 2017; 17(4): 325-31.
13. Mert Eren M, Celebi AT, İçer E, Baykasoğlu C, Mugan A, Yücel T. et al. Biomechanical behavior evaluation of resin cement with different elastic modulus on porcelain laminate veneer restorations using micro-CT-based finite element analysis. Materials 2023; 16(6): 2378.
14. Cordero F. Quantitative evaluation of the piezoelectric response of unpoled ferroelectric ceramics from elastic and dielectric measurements: Tetragonal BaTiO3. J Appl Phys 2018; 123(9): 301-07.
15. Dong L, Stone DS, Lakes RS. Softening of bulk modulus and negative Poisson ratio in barium titanate ceramic near the Curie point. Philosophical magazine letters 2010; 90(1): 23-33.
16. Kolupaev VA. Equivalent stress concept for limit state analysis. Darmstad, Germany: Springer; 2018; 86(1): 16-18.
17. Hill R. The mathematical theory of plasticity. Oxford, UK: Oxford University Press; 1998.
18. Eraslan O, Inan O, Secilmis A. The effect of framework design on stress distribution in implant-supported FPDs: A 3-D FEM study. Eur J Dent 2010; 4(4): 374-82.
19. Siegel RW. Cluster-assembled nanophase materials. Annual Review of Materials Science. 1991 Aug;21(1):559-78.
20. Esparza-Vázquez SJ, Rocha-Rangel E, Rodríguez-García JA, Hernández-Bocanegra CA. Strengthening of alumina-based ceramics with titanium nanoparticles. Materials Sciences and Applications 2014; 2014: 467-74.
21. Uyor UO, Popoola PA, Popoola OM. Network structural hardening of polypropylene matrix using hybrid of 0D, 1D and 2D carbon-ceramic nanoparticles with enhanced mechanical and thermomechanical properties. Journal of Polymer Engineering 2022; 42(6): 520-34.
22. Jiang B, Iocozzia J, Zhao L, Zhang H, Harn YW, Chen Y, Lin Z. Barium titanate at the nanoscale: controlled synthesis and dielectric and ferroelectric properties. Chemical Society Reviews 2019; 48(4): 1194-228.
23. Uchino K. Piezoelectric Devices in the Sustainable Society. Sustainability in Environment 2019; 4(4): 181.
24. Ahamed M, Akhtar MJ, Khan MM, Alhadlaq HA, Alshamsan A. Barium titanate (BaTiO3) nanoparticles exert cytotoxicity through oxidative stress in human lung carcinoma (A549) cells. Nanomaterials (Basel) 2020; 10(11): 2309.
25. Kim Y, Kim H, Oh HT, Kim S, Lee JK. Highly fluorinated barium titanate nanoparticle dispersion for fabrication of lithographically patterned thin films. Materials (Basel) 2019; 12(24): 4045.
26. Karthikeyan V, Chander NG, Reddy JR, Muthukumar B. Effects of incorporation of silver and titanium nanoparticles on feldspathic ceramic toughness. J Dent Res Dent Clin Dent Prospects 2019; 13(2): 98-102.
27. Uno M, Nonogaki R, Fujieda T, Ishigami H, Kurachi M, Kamemizu H, Wakamatsu N, Doi Y. Toughening of CAD/CAM all-ceramic crowns by staining slurry. Dent Mater J 2012; 31(5): 828-34.
28. Ebadian B, Mosharraf R, Khodaeian N. Effect of cantilever length on stress distribution around implants in mandibular overdentures supported by two and three implants. Eur J Dent 2016; 10(03): 333-40.
29. Majd H, Geramy A, Sheikzadeh S, Mirzaie M, Ghorbanipour R. Comparison of different methods used for maxillary molars distalization with Temporary Anchorage Devices (TADs) in different positions: A Finite Element Analysis (FEM) [in Persain]. J Isfahan Dent Sch 2023; 19(01): 1-8.