Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 37, 3. 2026. (63-80)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

An overview of Some Ceramics used in Restorative Dentistry

Review Article

Parisa Rastgoo Oskoui [1], Mohammad Rezvani [2]

10.22067/jmme.2026.95218.1218

Abstract

In recent decades, the dental community has studied ceramic restorative materials with excellent optical properties and the ability to restore shape and function to the mechanical needs of the anterior and posterior regions. Metal-free restorations have gained popularity, especially for rehabilitation with superior aesthetic results. Technological advances in the production of ceramic materials used in dentistry have revolutionized the production of metal-free dental restorations. Ceramic restorations have gained popularity among clinicians over the past two decades due to their favorable optical properties (better adaptation to tooth structure), acceptable mechanical properties (high fracture and wear resistance), biological properties (biocompatibility and inertness), chemical stability (resistance to pH and temperature changes), and thermal properties (good thermal insulation). According to a nationwide survey, ceramics have a lower production cost, which has led to the replacement of conventional metal-ceramic restorations with all-ceramic restorations in recent years.

Keywords Apatite, Aesthetics, Restorative Dentistry, Glass Ceramic, Strength

1- Introduction

The dental ceramic materials market, a vital component of modern dentistry, is poised for significant growth. This growth trajectory is supported by a strong annual growth rate. The main driving force behind this market is the increasing demand for aesthetic dental solutions as patients prioritize natural-looking restorative options. The evolution of dental technologies and materials has also contributed significantly to the upward trend of this market. One of the major growth factors in the dental ceramic materials market is the increasing prevalence of dental disorders and diseases such as tooth decay and periodontal diseases, which have necessitated the need for treatment. With the increasing world population, the incidence of these diseases is increasing and the demand for dental restorations is increasing[1]. Dental ceramics have gained popularity among patients and dentists due to their ability to mimic the appearance of natural teeth and provide desirable results. In addition, increasing awareness about oral health and the importance of timely interventions has led to an increase in dental visits, further fueling the demand for dental ceramic materials.

2. A review of studies conducted on various types of dental ceramic materials

Advances in dental materials science have also played a pivotal role in driving the market. Innovations in ceramic manufacturing technologies have led to the development of materials with superior mechanical properties, increasing their suitability for a wide range of dental applications. The introduction of computer-aided design systems has revolutionized the fabrication of dental restorations, enabling the provision of precise and customized solutions that are aligned with the individual needs of the patient[2]. These technological advancements have not only improved the quality of dental restorations, but also reduced chairside time, thereby increasing efficiency in dental offices and laboratories. In addition, rising disposable income levels in emerging economies have facilitated greater access to advanced dental care, significantly contributing to market growth. With the rapid urbanization and improvement in healthcare infrastructure, especially in the Asia-Pacific and Latin America regions, more people are seeking advanced treatment options, including ceramic-based dental restorations[3]. This has led to a wider customer base and increased market penetration in regions that were previously underserved by modern dental practices[4].

* Manuscript received September 02, 2025 , Revised October 01, 2025 , Accepted January 26, 2026.

[1] PhD of Metallurgical and Materials Engineering. Department of Materials Sciences and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

[2] Corresponding Author: Professor. Department of Materials Sciences and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. **Email**: m_rezvani@tabrizu.ac.ir



Fig 1. Image of artificial teeth made with the natural gradient of human tooth color.

These factors, coupled with strategic initiatives by market players to expand their geographical footprint, are expected to drive sustainable growth in the dental ceramic materials market[5]. Despite promising opportunities, the dental ceramic materials market also faces certain threats and challenges that could hinder its growth. One notable limitation is the high cost of ceramic restorations, which could limit their accessibility for some patients. While advances in technology have improved the efficiency of manufacturing processes, the initial investment required for ceramic materials and equipment remains a barrier for some dental practices. In addition, the market faces competition from alternative materials, such as composite resins and metals, that may offer cost advantages or specific benefits in specific applications. Addressing these challenges will be crucial for market players to maintain and expand their position in the industry[6].

3- Glass ceramic

Apatite glass-ceramic is another type of material used for dental restorative materials as a fluorine-containing coating in which fluorapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$) is crystallized. Also, in order to adjust the wear behavior to natural teeth and to improve optical properties such as translucency, various types of ceramic restorations are coated with a glass-ceramic containing apatite, which is usually available in all classic tooth shades. Researchers fabricated restorations with a needle-shaped apatite microstructure, similar to natural teeth[7].

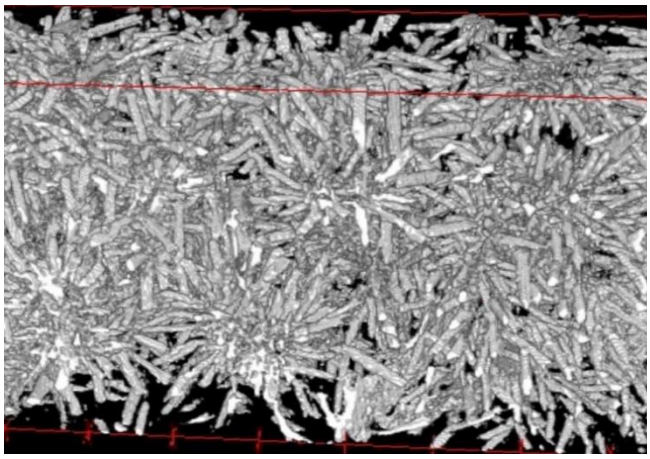


Fig 2. 3D computer visualization of apatite crystal growth in apatite glass-ceramics for dental applications.

4- Opportunities and Threats

The dental ceramic materials market offers numerous opportunities driven by technological advancements and changing patient expectations. One of the major opportunities is the ongoing development of new ceramic formulations and manufacturing technologies that enhance the properties and applications of these materials. Innovations such as hybrid ceramics and improved CAD/CAM systems are expected to expand the scope of ceramic restorations and meet a wider range of patient needs and preferences. As research continues to expand the frontiers of materials science, the market is poised to benefit from the introduction of advanced products that offer superior performance and aesthetics[8].

Another promising opportunity is the increasing demand for cosmetic dentistry procedures, especially among the younger population. The desire for a beautiful smile and the increasing influence of social media on personal perceptions have increased interest in cosmetic treatments, creating a robust market for ceramic-based restorations. This trend is increasing day by day with a significant increase in income. With the increasing number of beauty seekers, the demand for ceramic veneers, crowns, and other aesthetic solutions is expected to experience significant growth[9].

Despite the promising opportunities, the dental ceramic materials market also faces certain threats and challenges that could hinder its growth. One of the significant constraints is the high cost of ceramic restorations, which could limit their accessibility for some patients. While advances in technology have improved the efficiency of manufacturing processes, the initial investment required for ceramic materials and equipment remains a barrier for some dental practices. In addition, the market faces competition from alternative materials, such as composite resins and metals, which may offer cost advantages or specific benefits in specific applications. Addressing these challenges will be crucial for market players to maintain and expand their position in the industry[10].

5- Conclusion

Modern dentistry has experienced a transformative transformation with the integration of CAD/CAM technology, which has significantly impacted the selection and application of all-ceramic materials. This manuscript highlights the fundamental shift from traditional to digital approaches for clinicians with the aim of improving patient outcomes. This study emphasizes the necessity of selecting materials that provide exceptional strength and durability, while also considering the aesthetic factors, such as color stability and translucency, that are essential to achieving esthetics. CAD/CAM technology enables clinicians to have precise control over design and fabrication, thereby optimizing appointments, improving patient comfort, and promoting interdisciplinary collaboration. This guide serves as a practical resource for clinicians navigating the complexities of all-ceramic material selection in contemporary digital dentistry, helping them achieve reliable and long-lasting restorative treatments. In practical application, the selection of prosthetic materials

should be guided by a comprehensive assessment of the clinical scenario, including the biomechanical demands of the restoration, the patient's aesthetic expectations, and the long-term stability of the selected material and cement system. For anterior restorations, highly translucent ceramics such as feldspathic porcelain and lithium disilicate are preferred due to their optical properties, while their need for adequate support and careful occlusal management is also considered. In posterior areas or for load-bearing restorations, high-strength materials (such as zirconia, zirconia-reinforced lithium silicate) demonstrate greater durability and fracture resistance, resulting in increased use of these materials. Hybrid ceramics offer a versatile option that balances flexibility and moderate strength for a variety of applications. The long-term success of these restorations is highly dependent on the selection and appropriate use of resin cements.

6- Reference

[1]. X. Liu, X. Yao, R. Zhang, L. Sun, Z. Zhang, Y. Zhao, T. Zhang, J. Yan, Y. Zhang, and X. Wu, "Recent advances in glass-ceramics: performance and toughening mechanisms in restorative dentistry," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 112, no. 1, pp. 11–36, 2024. [Online].Available: https://doi.org/10.1002/jbm.b.35334

[2] F. P. d. F. C. Pietoso, S. F. Santos, L. H. d. Silva, and P. F. Cesar, "Production and characterization of feldspathic-muscovite glass composite for dental prosthesis," *Brazilian Oral Research*, vol. 39, pp. 110–132, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2025.vol39.066

[3] Zeng, Y.; Shen, Y.; Lin, H.; Tan, Q.; Sun, J.; Shen, L.; Li, R.; Xu, Y.; Teng, J., A synergistic approach integrating potassium ferrate oxidation with polyacrylamide flocculation to enhance sludge dewatering and its mechanisms. *Journal of Environmental Management*,*2025*,*382*,*125323*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125323

[4] L. D. Silva, V. O. Soares, O. Peitl Filho, F. C. Serbena, M. Rampf, C. Ritzberger, M. Dittmer, and E. D. Zanotto, "Exploring new machinable, strong lithium metasilicate-based glass-ceramics for dental applications," *Ceramics International*, vol. 50, no. 17, pp. 31335–31344, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.437

[5] D. Abozaid, A. Azab, M. A. Bahnsawy, M. Eldebawy, A. Ayad, R. Soomro, E. Elwakeel, and M. A. Mohamed, "Bioactive restorative materials in dentistry: a comprehensive review of mechanisms, clinical applications, and future directions," *Odontology*, vol. 1, pp. 1–29, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10266-025-01162-w

[6] W. Höland, V. Rheinberger, E. Apel, C. van't Hoen, M. Höland, A. Dommann, M. Obrecht, C. Mauth, and U. Graf-Hausner, "Clinical applications of glass-ceramics in dentistry," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 17, pp. 1037–1042, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10856-006-0441-y

[7] A. A. Madfa, F. A. Al-Sanabani, N. H. Al-Qudami, J. S. Al-Sanabani, and A. G. Amran, "Use of zirconia in dentistry: An overview," *The Open Biomaterials Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, 2014. [Online]. Available:https://www.academia.edu/download/33611171/Use_of_Zirconia_in_Dentistry_An_Overview.*The_Open_Biomaterials_Journal*_2014.pdf

[8] T. Nakamura, S. Okamura, H. Nishida, A. Kawano, S. Tamiya, K. Wakabayashi, and T. Sekino, "Fluorescence and physical properties of thulium and erbium co-doped dental zirconia," *Dental Materials Journal*, vol. 40, no. 5, pp. 1080–1085, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.4012/dmj.2020-387

[9] D.-c. Li, W.-b. Liu, S.-j. Zhao, H.-s. Feng, D.-h. Yang, and S.-j. Gao, "Effect of cerium oxide and erbium oxide as colorants on the chromaticity and mechanical properties of dental zirconia ceramic," *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, vol. 15, no. 47, pp. 10–36, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8225.2011.47.022

[10] H. S. Dettlinger, F. Fuchs, H. Hoelzig, J. Dörschner, J. J. Choi, P. Kemmesies, E. Günther, and A. Koenig, "Optical properties and microstructure of CAD/CAM silicate glass-ceramics with different levels of translucency," *Dental Materials*, 2025. [Online]. Available:https://doi.org/10.1016/j.dental.2025.08.001

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۷، ۳، ۱۴۰۵. (۸۰-۶۳)

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

مروری بر برخی از سرامیک‌های مورد استفاده در دندانپزشکی ترمیمی*

مقاله مروری

پریسا راستگو اسکویی[۱] محمد رضوانی[۲]

DOI: 10.22067/jmme.2026.95218.1218

چکیده *جوامع بشری همیشه به دنبال راهی برای جایگزینی دندان از دست رفته یا آسیب دیده بوده‌اند. فلزات به دلیل استحکام مکانیکی مطلوب در این زمینه مورد توجه قرار دارند اما به دلیل زیبایی ظاهری استفاده از آن‌ها محدود شده است. پیشرفت‌های تکنولوژیکی در زمینه تولید دندانپزشکی، انقلابی در تولید ترمیم‌های دندانی بدون فلز ایجاد کرده است. با افزایش محبوبیت سرامیک‌های دندانی در میان مردم، انواع مختلفی از آن‌ها تولید می‌شوند و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در انتخاب سرامیک‌های دندانی، باید دو فاکتور مهم استحکام سرامیک دندانی و زیبایی ظاهری آن در نظر گرفته شود. لازم است سرامیک دندانی علاوه بر داشتن ظاهر زیبا و طبیعی، دارای استحکام و مقاومت بالایی باشد. هدف از مقاله حاضر، ارائه مروری بر انواع مختلف مواد سرامیکی مورد استفاده در کاربردهای دندانی مانند سرامیک‌های زیرکونیایی، شیشه سرامیک‌های لوسیتی، آپاتیتی و مقایسه ویژگی‌های آن‌ها است.*

واژه‌های کلیدی دندانپزشکی ترمیمی، شیشه سرامیک، استحکام، زیبایی ظاهری، آپاتیت.

An overview of some ceramics used in restorative dentistry

Parisa Rastgoo Oskoui Mohammad Rezvani

Abstract *In recent decades, the dental community has studied ceramic restorative materials with excellent optical properties and the ability to restore shape and function to the mechanical needs of the anterior and posterior regions. Metal-free restorations have gained popularity, especially for rehabilitation with superior aesthetic results. Technological advances in the production of ceramic materials used in dentistry have revolutionized the production of metal-free dental restorations. Ceramic restorations have gained popularity among clinicians over the past two decades due to their favorable optical properties (better adaptation to tooth structure), acceptable mechanical properties (high fracture and wear resistance), biological properties (biocompatibility and inertness), chemical stability (resistance to pH and temperature changes), and thermal properties (good thermal insulation). According to a nationwide survey, ceramics have a lower production cost, which has led to the replacement of conventional metal-ceramic restorations with all-ceramic restorations in recent years.*

Key words Apatite, Aesthetics, Restorative Dentistry, Glass Ceramic, Strength

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۶/۱۱ مقاله اصلاح شده در تاریخ ۱۴۰۴/۷/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۱/۶ است.

(۱) دکتری مهندسی مواد و متالوژی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

Email: m_rezvani@tabrizu.ac.ir

مقدمه

در دهه‌های اخیر جامعه دندانپزشکی مواد ترمیمی سرامیکی با خواص نوری عالی و قادر به بازیابی شکل و عملکرد را با توجه به نیازهای مکانیکی نواحی قدامی و خلفی مورد مطالعه قرار داده است. ترمیم‌های بدون فلز، به ویژه برای توان‌بخشی با نتایج زیبایی برتر شهرت یافته‌اند. پیشرفت‌های تکنولوژیکی در زمینه تولید مواد سرامیکی مورد استفاده در دندانپزشکی، انقلابی در تولید ترمیم‌های دندانی بدون فلز ایجاد کرده است. ترمیم‌های سرامیکی در طول دو دهه گذشته به دلیل ویژگی‌های نوری مطلوب (مطابقت بهتر با ساختار دندان)، خواص مکانیکی قابل قبول (مقاومت شکست و سایش بالا)، خواص بیولوژیکی (زیست سازگاری و بی‌اثر بودن)، پایداری شیمیایی (مقاومت در برابر تغییرات pH و دما) و ویژگی‌های حرارتی (عایق حرارتی خوب) در بین پزشکان محبوبیت پیدا کرده‌اند. طبق یک نظرسنجی سراسری، سرامیک‌ها هزینه تولید پایین‌تری دارند که منجر به جایگزینی ترمیم‌های فلزی ـ سرامیکی مرسوم با ترمیم‌های تمام سرامیکی در سال‌های اخیر شده است [1].

همچنین بازار مواد سرامیکی دندانی یکی از اجزای حیاتی دندانپزشکی مدرن، آماده رشد قابل توجهی است. این مسیر رشد با نرخ رشد سالانه قوی پشتیبانی می‌شود. نیروی محرکه اصلی این بازار، افزایش تقاضا برای راه‌حل‌های زیبایی دندانپزشکی است. زیرا بیماران گزینه‌های ترمیمی با ظاهر طبیعی را در اولویت قرار می‌دهند. تکامل فناوری‌ها و مواد دندانپزشکی نیز به طور قابل توجهی در روند صعودی این بازار نقش داشته است. یکی از عوامل اصلی رشد در بازار مواد سرامیکی دندانی، افزایش شیوع اختلالات و بیماری‌های دندانی مانند پوسیدگی دندان و بیماری‌های پریودنتال (بیماری لثه، یک عفونت مزمن است که بافت‌های اطراف دندان‌ها، از جمله لثه‌ها، لیگامان پریودنتال و استخوان فک را تحت تأثیر قرار می‌دهد) است که نیاز به درمان را ضروری کرده است. با افزایش جمعیت جهان، میزان بروز این بیماری‌ها رو به افزایش است و تقاضا برای ترمیم‌های دندانی افزایش می‌یابد. جذابیت سرامیک‌های دندانی به دلیل توانایی‌شان در تقلید از ظاهر دندان‌های طبیعی و ارائه نتایج مطلوب در بین بیماران و دندانپزشکان افزایش یافته است. علاوه بر این افزایش آگاهی در مورد سلامت دهان و دندان و اهمیت مداخلات به موقع منجر به افزایش مراجعات به دندانپزشکی شده و تقاضا برای مواد سرامیکی دندانی را بیشتر کرده است. نمودار پیش‌بینی تغییرات فروش مواد دندانی سرامیکی در شکل (۱) نشان داده شده است [2].

پیشرفت‌ها در علم مواد دندانی نیز نقش محوری در پیشبرد بازار داشته است. نوآوری در فناوری‌های تولید سرامیک منجر به توسعه موادی با خواص مکانیکی برتر شده و مناسب بودن آن‌ها را برای طیف وسیعی از کاربردهای دندانپزشکی افزایش داده است. معرفی سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر (Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing) انقلابی در ساخت ترمیم‌های دندانی ایجاد کرده و امکان ارائه راه‌حل‌های دقیق و سفارشی را فراهم کرده است که با نیازهای فردی بیمار همسو هستند. این پیشرفت‌های تکنولوژیکی نه تنها کیفیت ترمیم‌های دندانی را بهبود بخشیده است، بلکه زمان کار با صندلی را نیز کاهش داده و در نتیجه کارایی در مطب‌ها و آزمایشگاه‌های دندانپزشکی را افزایش داده است [3].

علاوه بر این افزایش سطح درآمد قابل تصرف در اقتصادهای نوظهور، دسترسی بیشتر به مراقبت‌های پیشرفته دندانپزشکی را تسهیل کرده و به طور قابل توجهی به رشد بازار کمک کرده است. با افزایش سرعت شهرنشینی و بهبود زیرساخت مراقبت‌های بهداشتی، به ویژه در مناطق آسیا و اقیانوسیه و آمریکای لاتین، افراد بیشتری به دنبال گزینه‌های درمانی پیشرفته، از جمله ترمیم‌های دندانی مبتنی بر سرامیک هستند. این امر منجر به ایجاد پایگاه مشتری گسترده‌تر و افزایش نفوذ بازار در مناطقی شده است که قبلا از خدمات مطب‌های مدرن دندانپزشکی محروم بوده‌اند. پیش‌بینی می‌شود این عوامل همراه با ابتکارات استراتژیک فعالان بازار برای گسترش ردپای جغرافیایی خود، رشد پایدار در بازار مواد سرامیکی دندانی را به دنبال داشته باشند [4]. در این راستا، مطالعه حاضر با هدف مرور بر تحقیقات انجام‌شده روی مواد سرامیکی دندانی انجام شد.



شکل ۱ پیش‌بینی تغییرات فروش مواد دندانی سرامیکی [2]

مروری بر مطالعات انجام‌شده درباره انواع مواد سرامیکی دندانی

طیف گسترده‌ای از سرامیک‌ها برای ساخت ترمیم‌های غیر مستقیم در بازار موجود است و می‌توان آن‌ها را بر اساس ترکیب/ ریزساختار یا روش ساخت طبقه‌بندی کرد. با توجه به ترکیب، سرامیک‌ها را می‌توان به شیشه ـ سرامیک، چند بلوری و پایه رزین ـ سرامیک طبقه‌بندی کرد. این طبقه‌بندی به پزشکان کمک می‌کند تا مزایا و معایب هر ماده خاص در حفره دهان حین کاربرد را درک کنند. علاوه بر این پزشکان را قادر می‌سازد تا هنگام استفاده از سیمان‌های رزینی، بهترین روش آماده‌سازی سطح برای تحویل مواد ترمیمی غیر مستقیم را تشخیص دهند [5].

به طور کلی انتخاب مواد ترمیمی و سیمان‌های چسباننده در محیط‌های درمانی مدرن به دلیل پیشرفت‌های جدید در سیمان، به طور فزاینده‌ای پیچیده شده است. پزشکان با انواع پیچیده‌ای از سیمان‌های رزینی مواجه هستند که هر کدام ساز و کارهای پلیمریزاسیون متفاوتی دارند و از نظر قدرت چسبندگی، ویژگی‌های جابه‌جایی و موارد مصرف با هم متفاوت هستند. موفقیت پایدار یک ترمیم با طول عمر آن منعکس می‌شود که از طریق انتخاب یک عامل چسباننده در روش سیمان‌سازی حاصل می‌شود. برای ایجاد پیوند مناسب با عامل چسباننده، لازم است سطح سرامیک تقویت شود. در مقابل، باید از زبر شدن بیش از حد سطح جلوگیری شود زیرا ممکن است منجر به شروع و انتشار ترک در داخل سرامیک شود و در نهایت با شکستگی ترمیم سرامیکی پایان یابد. تغییرات شیمیایی در سطح سرامیک را می‌توان با حکاکی شیمیایی و بهبود حفظ مکانیکی چسب یا با تنظیم میل ترکیبی سطح برای ترکیبات چسب ایجاد کرد. یک اتصال چسبی کامپوزیتی از رزین بادوام و پایدار، به یک ترمیم پروتزی حکاکی شیمیایی صحیح در یک طرف و هم به سطح دندان در طرف دیگر نیاز دارد [6].

شیشه سرامیک‌ها

شیشه ـ سرامیک‌های دندانی با تبلور کنترل‌شده شیشه‌های اکسیدی تولید می‌شوند و گروه مهمی از مواد زیستی مورد استفاده در دندانپزشکی مدرن را تشکیل می‌دهند. این مواد همچنین برای دانشمندانی که اصول تبلور را مطالعه می‌کنند، از اهمیت بالایی برخوردارند. شیشه ـ سرامیک‌های دندانی باید الزامات سختگیرانه‌ای را برای پروتزهای ترمیمی برآورده کنند و فرایند کار را برای دندانپزشکان ساده کنند و راحتی بیمار را افزایش دهند. شیشه ـ سرامیک‌های دندانی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که زیبایی‌شناسی استثنایی، شفافیت، استحکام بالا، دوام شیمیایی، مقاومت در برابر سایش، زیست‌سازگاری، رسانایی حرارتی کم و سختی مشابه دندان‌های طبیعی داشته باشند. برخی از آن‌ها همچنین زیست‌فعال هستند تا پاسخ مطلوبی را از دندان و استخوان نگه‌دارنده ارائه دهند. این امر امکان درمان حساسیت‌های فراوان، بازسازی استخوان آلوئولار (آلوئول دندانی (dental alveolus) پایه دندان حفره‌ای استخوانی است که ریشه دندان در آن قرار گرفته است) و بهبود بافت‌های پریودنتال را فراهم می‌کند [7].

با توجه به افزایش تقاضا برای درمان‌های زیبایی دندان با خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب، جستجوی مواد و تکنیک‌های توسعه مناسب در حرفه دندانپزشکی و بیماران بسیار مهم شده است. ظاهر جذاب دندان با لبخندی زیبا می‌تواند به بهبود اعتماد به نفس در بسیاری از زمینه‌های زندگی کمک کند. به عنوان مثال، روکش‌ها/ روکش‌ها/ بریج‌های شیشه ـ سرامیکی به دلیل نتایج زیبایی بالا، به یک روش ترمیمی محافظه‌کارانه در دندان تبدیل شده‌اند. یکی از روش‌های بهبود خواص شیشه

سرامیک‌ها، تبلور کنترل‌شده بلورها در زمینه شیشه‌ای است. این روش به دانشمندان کمک می‌کند تا استحکام، شکستگی، شوک حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش دهند. اگرچه این بلورها ویژگی‌های ذکرشده شیشه سرامیک‌ها را بهبود می‌بخشند، اما سایر خواص زیبایی‌شناختی مانند شفافیت نیز باید توجیه شوند [8].

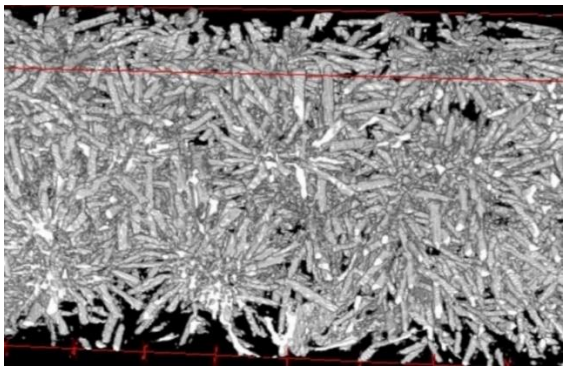
شیشه ـ سرامیک‌های پایه میکا مواد سنتی هستند که معمولا به عنوان شیشه ـ سرامیک‌های دندانپزشکی استفاده می‌شوند. این شیشه ـ سرامیک‌ها دارای معایبی مانند خطر بالای شکستگی، مقاومت مکانیکی پایین و شرایط تولید دشوار هستند [9]. به منظور غلبه بر ضعف این موارد، تحقیقات مختلفی به منظور افزایش استحکام این شیشه ـ سرامیک‌ها انجام شده است. به عنوان مثال با جایگزینی K^+ یا Na^+ با Ba^{2+} یا Ca^{2+} به عنوان یون‌های بین لایه‌ای بلورهای میکا، شیشه ـ سرامیک‌های میکا با استحکام و چقرمگی بالا تولید شده‌اند. مقاومت شیمیایی و خواص مکانیکی این شیشه ـ سرامیک‌ها نیز می‌تواند با افزودن ZrO_2 بهبود یابد [10]. اونو (Uno) و همکارانش نشان دادند که ZrO_2 تتراگونال، استحکام خمشی و چقرمگی شکست را به ۵۰۰MPa و$Mpa\sqrt{m}$ ۳,۲ افزایش می‌دهد که مربوط به انحراف ترک توسط صفحات میکا و ذرات ZrO_2 است [11].

یکی دیگر از انواع شیشه ـ سرامیک‌های دندانی، لوسیت با مقاومت مکانیکی ۱۶۴MPa و ضریب انبساط حرارتی بالا است. با توجه به استحکام کم این شیشه ـ سرامیک‌ها به ندرت برای ترمیم‌های خلفی ثابت استفاده می‌شوند. این شیشه ـ سرامیک بر روی یک چهارچوب فلزی انعطاف‌پذیر و سخت روکش می‌شود. برای جلوگیری از احتمال جدا شدن شیشه سرامیک‌ها از سطح فلز، معمولا تف‌جوشی در محدوده دمایی ۵۵۰°C تا ۹۰۰°C انجام می‌شود و برای جلوگیری از ترک و شکست، باید انقباض کنترل شود [12,13]. شرکت Ivoclar به طور قابل توجهی روی بلوک‌های چند رنگ شیشه سرامیک‌های مبتنی بر لوسیت با روش CAD/CAM تحقیق کرده است. این بلوک‌ها به تقلید دقیق خواص نوری دندان‌های طبیعی کمک می‌کنند و از چهار تا هشت لایه رنگی اصلی و میانی تشکیل شده است [14].

شیشه ـ سرامیک‌های دندانی لیتیوم LS2، نسل سوم شیشه ـ سرامیک‌های دندانی با استحکام خمشی بالا (بالای ۳۰۰ MPa) است که تقریبا دو برابر بیشتر از شیشه ـ سرامیک‌های لوسیتی است. یکی از ویژگی‌های قابل توجه در این گروه از شیشه ـ سرامیک‌ها، خواص مکانیکی قابل قبول است. ژانگ (Zhang) و همکارانش این شیشه ـ سرامیک را با شیشه ـ سرامیک تقویت‌شده با لوسیت، شیشه ـ سرامیک فلدسپاتیک و شیشه ـ سرامیک فلورآپاتیت مقایسه کردند و گزارش دادند که LS2 بالاترین چقرمگی شکست، استحکام خمشی، مدول الاستیک و بلورینگی را نشان می‌دهد [15]. این مواد که در سیستم‌های روکش، بریج، آنله و اینله استفاده می‌شوند، به صورت شمش بلوری و قابل پرس حرارتی در دسترس هستند. این شیشه ـ سرامیک به دلیل داشتن خواص نوری عالی مانند شفافیت، کاندیدای امیدوارکننده‌ای برای زیبایی یا ترمیم‌های تمام‌عیار است [16]. شیشه ـ سرامیک‌های LS2 عمدتا از حدود ۳۰ تا ۷۰ درصد بلورهای لیتیوم دی‌سیلیکات ($Li_2Si_2O_5$) با ابعاد چند میکرومتر و ساختار سوزنی‌شکل در زمینه شیشه‌ای تشکیل شده‌اند. فازهای دیگری مانند متاسیلیکات لیتیوم، فسفات لیتیوم (Li_3PO_4)، کریستوبالیت و فازهای کوارتز مانند محلول‌های جامد $LiAlSi_2O_6$ و SiO_2 نیز متبلور می‌شوند. شیشه ـ سرامیک LS2 معمولا توسط CAD/CAM ماشین‌کاری می‌شود. برای برآورده کردن الزامات چالش‌برانگیز فرایند CAD/CAM، یک یا اغلب دو عملیات حرارتی خاص انجام می‌شود [17].

شیشه ـ سرامیک آپاتیت نوع دیگری از مواد مورد استفاده برای مواد ترمیمی دندان به عنوان روکش حاوی فلوئور است که در آن فلوروآپاتیت ($Ca_5(PO_4)_3F$) متبلور می‌شود. همچنین به منظور تنظیم رفتار سایشی با دندان طبیعی و ارتقای خواص نوری مانند شفافیت، انواع مختلف ترمیم‌های سرامیکی با شیشه سرامیکی حاوی آپاتیت که معمولا در تمام رنگ‌های کلاسیک دندان موجود است، روکش می‌شوند. محققان ترمیم‌هایی با ریزساختار آپاتیت سوزنی‌شکل، مشابه دندان‌های طبیعی، ساختند [18]. بلورهای آپاتیت سوزنی‌شکل تأثیر مثبتی بر خواص زیبایی‌شناختی و خواص مکانیکی مختلف دارند. در مورد فرسایش اسیدی ناشی از بزاق، شیشه سرامیک‌های فلورآپاتیت و دندان‌های آنتاگونیست (دندان‌های آنتاگونیست به دندان‌هایی گفته می‌شوند که در فک مقابل یکدیگر قرار دارند و در هنگام جویدن با هم در تماس هستند)، نرخ سایش و ضریب اصطکاک بیشتری در محیط بزاق نسبت به محیط خشک دارند [19]. در مورد بلورینگی فاز فلورآپاتیت، تحقیقاتی انجام شد که ثابت کرد درصدهای مختلف CaO و دمای عملیات حرارتی می‌تواند میزان

تبلور فاز فلورآپاتیت را تغییر دهد. میزان تبلور بیشتر، می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود دهد و به طور قابل توجهی بر رفتارهای اصطکاکی و سایشی شیشه ـ سرامیک تأثیر بگذارد. علاوه بر این، شیشه سرامیک‌های ساخته‌شده می‌توانند شرایط محیط‌های خورنده شیمیایی شدید را تحمل کنند و با افزایش مقاومت شیمیایی و به حداقل رساندن شکستگی، طول عمر ترمیم را بهبود بخشند. تصویرسازی سه‌بعدی کامپیوتری از رشد کریستال آپاتیت در شیشه ـ سرامیک آپاتیتی برای کاربردهای دندانپزشکی در شکل (۲) نشان داده شده است [20].



شکل ۲ تصویرسازی سه‌بعدی کامپیوتری از رشد کریستال آپاتیت در شیشه ـ سرامیک آپاتیتی برای کاربردهای دندانپزشکی [20]

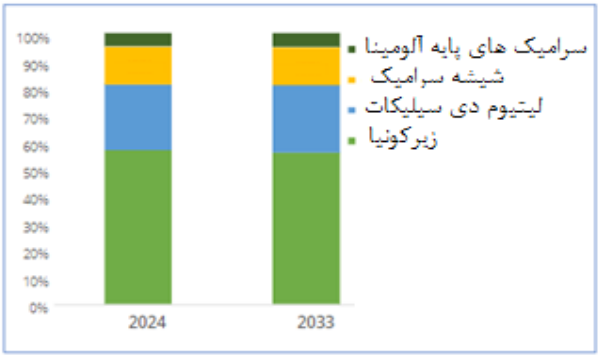
سرامیک‌های چندبلوری

سرامیک‌های چندبلوری با فقدان فاز شیشه‌ای مشخص می‌شوند و در این مواد دانه‌ها به صورت متراکم چیده شده‌اند که منجر به خواص مکانیکی بالاتر در مقایسه با شیشه سرامیک‌ها می‌شود. با این حال عدم وجود فاز شیشه‌ای و ویژگی‌های ناهمسانگرد دانه‌ها منجر به شفافیت کمتر در این سرامیک‌ها می‌شود. آلومینا و زیرکونیا سرامیک‌های چندبلوری اصلی مورد استفاده در دندانپزشکی هستند. زیرکونیا عمدتا برای ساخت طیف وسیعی از ترمیم‌ها، از دندان‌های تکی گرفته تا پروتزهای کامل متکی بر ایمپلنت استفاده می‌شود. این ترجیح به دلیل استحکام بالا، مقاومت عالی در برابر شکستگی و زیبایی آن است. زیرکونیا شامل ۳ فاز است: مونوکلینیک، تتراگونال و مکعبی. ذرات فاز مونوکلینیک پایدار تقریبا ۴ تا ۵ درصد بزرگ‌تر از دانه‌های تتراگونال هستند [21]. فاز تتراگونال از نظر مکانیکی مستحکم است و در صورت وجود تنش، مانند ترک یا قرار گرفتن در معرض محیط مرطوب، توانایی تبدیل به فاز مونوکلینیک را دارد. این تبدیل منجر به دانه‌های مونوکلینیک بزرگ‌تر می‌شود که می‌توانند از انتشار بیشتر ترک جلوگیری کنند. فاز تتراگونال ناهمسانگرد است که منجر به انحراف نور در مرزهای دانه می‌شود و منجر به شفافیت کمتر می‌شود. فاز مکعبی کمترین خواص مکانیکی اما بالاترین خواص نوری را دارد زیرا در جهات مختلف بلورشناسی همسانگرد است و ضریب شکست آن به جهت‌گیری دانه وابسته نیست. نسبت بیشتر فاز مکعبی منجر به افزایش شفافیت همراه با خواص مکانیکی کمتر می‌شود. علاوه بر این، فاز مکعبی قابلیت تبدیل به فاز دیگری را ندارد [22]. نسل اول زیرکونیا حاوی ۳ درصد مولی ایتریا (همچنین به عنوان Y۳ شناخته می‌شود) برای تثبیت فاز تتراگونال استفاده می‌شود. این دیسک‌ها تک‌رنگ بودند و ترمیم‌های ساخته‌شده از آن‌ها دارای استحکام بالایی بود اما زیبایی ظاهری مناسبی نداشتند [23]. نسل دوم دیسک‌های زیرکونیای چندرنگ هستند تا درجه‌بندی طبیعی رنگ در دندان را از ناحیه انسیزال تا سرویکال تقلید کنند و در نتیجه نیاز به رنگ‌آمیزی در ترمیم‌های یکپارچه را به حداقل برسانند [24]. علاوه بر این، این دیسک‌ها با مقادیر مختلفی از ایتریا تولید شدند: ۳ درصد مولی ایتریا (Y۳) که منجر به بیشترین نسبت فاز تتراگونال می‌شود؛ ۴ درصد مولی ایتریا (Y۴) که منجر به تولید تقریبا ۷۵ درصد فاز تتراگونال و ۲۵ درصد فاز مکعبی می‌شود و در قطعات با ۵ درصد مولی ایتریا (Y۵) تقریبا ۵۰ درصد فاز تتراگونال و ۵۰ درصد فاز مکعبی متبلور می‌شود. با توجه به تفاوت شفافیت بین یک دندان طبیعی در ناحیه برش (که عمدتا مینا است و شفافیت بالاتری را نشان می‌دهد) و ناحیه سرویکال (که عمدتا عاج است و شفافیت کمتری دارد) [25]، نسل سوم زیرکونیا توسعه یافت تا نه تنها درجه‌بندی رنگ از برش به سرویکال، بلکه درجه‌بندی شفافیت را نیز تکرار کند. این دیسک‌ها حاوی مقدار بیشتری ایتریا در ناحیه انسیزال (که منجر به درصد بالاتری از فاز مکعبی و شفافیت بالاتر می‌شود) و مقدار کمتری ایتریا در ناحیه سرویکال (که منجر به درصد بالاتری از فاز تتراگونال و شفافیت کمتر می‌شود) هستند. هدف، حذف نیاز به لایه‌بندی ناحیه انسیزال با پرسلان فلدسپاتیک به دلایل زیبایی است، زیرا لایه‌بندی می‌تواند نقطه ضعفی در ترمیم ایجاد کند که منجر به لب‌پریدگی و شکستگی شود [26].

پیشرفت دیگر در زمینه سرامیک‌های چندبلوری، توسعه روش‌های تولید است که هدف نهایی آن ساخت ترمیم‌های دارای سایه‌های رنگی است. رایج‌ترین فناوری‌های مورد استفاده برای ساخت قطعات زیرکونیا، روش‌های پلیمریزاسیون با استفاده از

چاپگرهای پردازش نور دیجیتال و همچنین فناوری رسوب ژل به صورت سه‌بعدی است. اگرچه تولید زیرکونیا پتانسیل امیدوارکننده‌ای را نشان می‌دهد، اما چندین حوزه وجود دارد که نیاز به بررسی بیشتر دارند، از جمله نسبت بحرانی پودر به مایع در دوغاب، ویسکوزیته بالای دوغاب، به دام افتادن حباب هوا که منجر به ایجاد تخلخل‌ها می‌شود و تجمع بقایای پودر در چاپ که منجر به نقاط شکست و نقص‌های بین لایه‌ای می‌شود [23].

ترکیب خواص مکانیکی قوی و بهبود در زیبایی ترمیم‌های زیرکونیای یکپارچه، این ماده را به یکی از پرکاربردترین مواد توسط پزشکان در سناریوهای مختلف بالینی تبدیل کرده است. طبق یک بررسی سیستماتیک، روکش‌های زیرکونیای یکپارچه روی دندان‌های طبیعی میزان بقای بسیار طولانی مدتی دارند که از ۹۱٪ تا ۱۰۰٪ متغیر است. تجزیه و تحلیل دیگری از روکش‌های ایمپلنت تکی نشان داد که روکش‌های زیرکونیای یکپارچه در مقایسه با ترمیم‌های فلزی ـ سرامیکی، میزان بقای کوتاه‌مدت قابل مقایسه‌ای دارند. گزارش شده است که روکش‌های زیرکونیای یکپارچه میزان لب‌پریدگی بسیار کمتری دارند (۰٪ در زیرکونیای یکپارچه در مقابل ۷٫۶۱٪ برای فلز ـ سرامیک). همچنین یک بررسی سیستماتیک دیگر نشان داده است که زیرکونیا ماده مناسبی برای پروتزهای ثابت دندانی قدامی است و میزان موفقیت آن بیش از ۸۰٪ در یک دوره ۳ تا ۱۰ ساله است [27]. در مورد پروتزهای کامل متکی بر ایمپلنت، ترمیم‌های زیرکونیای یکپارچه میزان بقای بالای ۹۷٫۲۳٪ را با میانگین دوره پیگیری ۴ سال نشان داده‌اند. پیش‌بینی میزان تولید محصولات مختلف سرامیکی به صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است [28].



شکل ۳ پیش‌بینی میزان تولید محصولات سرامیکی مختلف [28]

سرامیک‌های بر پایه رزین

نوع جدیدتر مواد ترمیمی، سرامیک‌های بر پایه رزین هستند که با هدف ترکیب مزایای مواد پلیمری و سرامیکی معرفی شده‌اند. این مواد حاوی یک زمینه آلی با نسبت بالایی از ذرات سرامیکی هستند که به عنوان پرکننده تعبیه شده‌اند. در سال ۲۰۱۳، انجمن دندانپزشکی آمریکا (American Dental Association) (ADA) در مورد رویه‌ها و نام‌گذاری‌های دندانپزشکی، موادی با «ترکیبات عمدتا معدنی مقاوم» را به عنوان سرامیک‌های دندانی به رسمیت شناخت، که با نسخه قبلی که در آن «ترکیبات معدنی مقاوم غیر رزینی» معیار مواد سرامیکی بود، تفاوت داشت. در مقایسه با مواد تمام سرامیکی، مواد رزین ـ زمینه شکننده نیستند و خواص جذب شوک دارند که می‌تواند از نظر بالینی مهم باشد، به خصوص در ترمیم‌های ایمپلنت که اثر میرایی رباط پریودنتال (رباط پریودنتال (Periodontal ligament) که به عنوان رباط دور دندانی نیز شناخته می‌شود، بافت همبندی است که دندان را به استخوان فک متصل می‌کند) وجود ندارد. نسخه اولیه سرامیک‌های رزین ـ زمینه (Lava Ultimate, 3M) «نانوسرامیک رزین» نامیده می‌شود که حاوی نانوذرات سیلیس و زیرکونیا و ذرات نانوخوشه‌ای (۸۰ درصد وزنی) است که در یک زمینه پلیمری با پیوند عرضی بالا گنجانده شده‌اند. پرکننده‌های سرامیکی با یک عامل اتصال سیلان برای بهبود پیوند بین پرکننده و رزین ـ زمینه عملیات حرارتی می‌شوند. این امر منجر به افزایش مدول الاستیسیته (۱۴٫۵ گیگا پاسکال) به مقادیر نزدیک به عاج دندان با مقاومت سایشی و مقاومت شکستگی بالاتر از رزین‌های کامپوزیتی شده است [29]. نوع دیگر سرامیک زمینه رزینی (VITA Enamic، VITA North America) یک «شبکه سرامیکی نفوذ یافته با پلیمر» است که در آن دو شبکه سه‌بعدی در هم نفوذ کرده‌اند. شبکه سرامیکی حاوی فلدسپار و شبکه پلیمری حاوی پلیمرهای متاکریلات است. مدول الاستیسیته این قطعات (۲۸ گیگا پاسکال) بین عاج و مینای دندان قرار دارد [30]. یکی دیگر از سرامیک‌های مبتنی بر رزین (CERASMART، GC) دارای یک «نانو سرامیک انعطاف‌پذیر» است و از ذرات آلومینا ـ باریم ـ سیلیکات تعبیه‌شده در داخل یک زمینه پلیمری تشکیل شده است که در مقایسه با انواع ذکرشده سرامیک‌های مبتنی بر رزین، استحکام خمشی بالاتر و مدول الاستیسیته پایین‌تر (۱۰ گیگا پاسکال) دارد [31].

پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید، امکان ساخت روکش‌های چاپ‌شده را با مزایایی مانند هزینه‌های کمتر برای تجهیزات و مواد، امکان ساخت چندین ترمیم همزمان و عدم نیاز به تعویض

فرزها، فراهم کرده است. در سال ۲۰۲۳، ADA الزام «فشرده شدن، پختن، صیقل دادن یا آسیاب کردن» مواد را حذف کرد و اجازه داد مواد چاپ سه‌بعدی به عنوان روکش‌های سرامیکی دائمی در نظر گرفته شوند. مواد قابل چاپ موجود که در حال حاضر به عنوان ترمیم‌های نهایی تبلیغ می‌شوند، حاوی حداکثر ٪۵۰ محتوای پرکننده هستند. محتوای پرکننده کمتر، در مقایسه با مواد آسیاب‌شده، باعث می‌شود رزین در حین چاپ بهتر در مخزن رزین جریان یابد و همچنین به نور اجازه می‌دهد تا برای پخت مناسب از آن عبور کند [32]. گزارش شده است که محتوای پرکننده در برخی از رزین‌های آزمایش‌شده بر پایه سیلیس است، در حالی که زمینه بر پایه متاکریلات، از جمله اورتان دی متاکریلات و بیسفنول A–گلیسیدیل متاکریلات است. علاوه بر این، رزین‌های دیگری از جمله تری اتیلن گلیکول دی متاکریلات و بیسفنول A–دی متاکریلات اتوکسیله، برای کاهش ویسکوزیته و بهبود جریان‌پذیری رزین مایع اضافه می‌شوند. فناوری‌های نوآورانه به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهند که محتوای پرکننده را افزایش دهند و خواص مکانیکی ترمیم‌ها را بهبود بخشند [33]. از آنجا که این دسته از مواد نسبتا جدید در بازار هستند، داده‌های محدودی در مورد عملکرد بالینی این مواد در دسترس است. جدا شدن به عنوان عارضه اصلی قطعات سرامیکی بر پایه رزین (Lava Ultimate، M۳) گزارش شده است که منجر به منع مصرف این ماده برای ترمیم‌های با پوشش کامل شده است. در یک کارآزمایی بالینی بر روی ترمیم‌های متکی بر ایمپلنت، و میزان جدا شدن ٪۸۰ در سال اول استفاده بالینی گزارش شد. طبق کارآزمایی‌های بالینی کوتاه‌مدت و بررسی‌های سیستماتیک، سایر سرامیک‌های زمینه رزینی، عملکرد بالینی قابل قبول و میزان بقای قابل مقایسه‌ای با سایر ترمیم‌های سرامیکی در هنگام استفاده به عنوان ترمیم‌های پوشش جزئی یا پوشش کامل نشان داده‌اند [34].

ویژگی‌های زیبایی‌شناسی

دندان‌های طبیعی به داشتن فلورسانس سفید در زیر نور ماورای بنفش معروف هستند. هنگام ساخت ترمیم دندان از شیشه سرامیک، باید عوامل فلورسانس اضافه شود تا پرسلان‌هایی با فلورسانس نزدیک به دندان‌های طبیعی تولید شود. برای تولید ترکیبات فلورسانس مناسب، که با ترکیب طبیعی مطابقت داشته باشد، باید شرایطی رعایت شود. شیشه سرامیک دندانی فلورسنت باید دارای فلورسانس و رنگ‌های طبیعی باشد که تناژهایی نزدیک به سایه دندان‌های طبیعی دارند. رنگ ماده فلورسنت باید سفید باشد تا از کدر شدن ترکیب شیشه ـ سرامیک یا کاهش شفافیت آن جلوگیری شود. مواد فلوئورسانس باید رنگ دندان سرامیکی مصنوعی را القا کنند تا فلورسانس را با طیف رنگ آبی ـ سفید متمایل به سبز هنگامی که با اشعه ماورای بنفش در طول موج حدود ۳۶۵۰Å روشن می‌شود، نشان دهد [35].

برای توسعه رنگ‌ها و فلورسانس در مناطق UV در سرامیک‌های دندانی، یک رنگدانه سرامیکی یا ترکیبی از چندین رنگدانه در ترکیب گنجانده شده است. بلورهای رنگدانه‌ها در طول فرایند سینتر به اندازه کافی دست نخورده باقی می‌مانند تا رنگ مورد نظر را در محصول نهایی ایجاد کنند. رنگدانه‌های سرامیکی عمدتا از اکسیدهای نسوز تشکیل شده‌اند، جایی که کاتیون‌های خاکی کمیاب یا فلزات واسطه مانند Co، Cr، Fe، Mn، Ni و V به عنوان مراکز رنگ عمل می‌کنند. با این حال، رنگ ارائه‌شده توسط آن رنگدانه‌ها تا حد زیادی توسط ساختار بلوری ترکیب میزبان که یون‌های فلزات واسطه در آن گنجانده شده‌اند، کنترل می‌شود. بسیار رایج است که رنگ تولیدشده در شیشه مادر با رنگی که در شیشه سرامیک متبلورشده از همان شیشه ایجاد شده است، متفاوت باشد. این تغییر از طریق تغییر شیشه باقی‌مانده که اجزای تشکیل‌دهنده بلورها از آن جدا می‌شوند، ایجاد می‌شود. این تغییر همچنین به ماهیت فاز یا فازهای بلوری توسعه می‌یابد و به سهولت استفاده از عناصر رنگ آمیزی در ساختار بلوری جدید بستگی دارد [36]. همچنین تغییر رنگ ممکن است به نوع جایگزینی کاتیون‌ها در ساختار بلوری مربوط باشد که به صورت محلول جامد جزئی یا کاملا جامد یا به صورت بینابینی در ساختار گنجانده شده است. ادغام اکسیدهای رنگی مانند CeO_2، CoO، CuO، Fe_2O_3، MnO_2، و TiO_2 در شیشه ـ سرامیک به همین ترتیب میدان اطراف را برای تولید شیشه ـ سرامیک میکای رنگی ذاتی تغییر می‌دهد [37]. سایه رنگ تولیدشده توسط CeO_2 همچنین می‌تواند از طریق گنجاندن رنگ‌های نسبتا بی‌اثر مانند Er_2O_3 برای قرمز، MnO_2 یا Cr_2O_3 برای خاکستری و TiO_2 برای زرد به سفید اصلاح شود. رنگ شیشه سرامیک دندانی در ناحیه نور مرئی بین ۳۸۰–۷۰۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود. هنگامی که شیشه سرامیک مصنوعی دندان در دهان بیمار قرار می‌گیرد، دیده می‌شود که رنگ

سرامیک به دلیل تغییر در شرایط نوری با رنگ‌های طبیعی دندان مطابقت ندارد. دلیل آن ممکن است این باشد که دندان‌های مصنوعی با طیف رنگی یکسان فلورسانس نمی‌دهند، به خصوص زمانی که منبع روشنایی، نور روز نباشد و نور ماورای بنفش باشد. بنابراین دندان‌های مصنوعی در شرایط نوری مختلف مانند دندان‌های طبیعی رفتار نمی‌کنند [38]. این اثر متامریک یک مسئله پیچیده برای بیمار است زیرا دندان‌های او در زیر نورهای مختلف با رنگ‌های متفاوتی به نظر می‌رسند. بنابراین، دندان‌های مصنوعی باید حاوی اجزای فلورسانس باشند تا فلورسانس طبیعی را در شیشه سرامیک القا کنند. ترکیب فلورسانس باید برای سلامتی انسان مطابق با معیارهای ایمن باشد و در برابر دمای سینتر تغییر نکند و رادیواکتیو نباشد. برای تحقق این الزامات، اجزای فلورسانس در حالت ایدئال باید دندان شیشه سرامیکی را وادار کنند که فلورسانس را با رنگ آبی ـ سفید متمایل به سبز در هنگام روشن شدن با اشعه ماورای بنفش در طول موج حدود ۳۶۵۰Å نشان دهد [39]. تصویر دندان‌های مصنوعی با شیب طبیعی رنگ دندان انسان در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ تصویر دندان‌های مصنوعی ساخته‌شده با شیب طبیعی رنگ دندان انسان

شرایطی وجود دارد که برای تولید ترکیبات فلورسانس مناسب که بتواند با دندان طبیعی مطابقت داشته باشد، باید رعایت شود. ترکیب فلورسانس باید فلورسانس و رنگ‌های طبیعی را نشان دهد که تناژهایی نزدیک به سایه‌های دندان طبیعی داشته باشد، یعنی رنگ دندان‌ها باید در نور مرئی و نور UV یکسان باشد. رنگ ماده فلورسنت باید سفید باشد و باعث کدر شدن شیشه سرامیک یا کاهش شفافیت آن نشود. هنگام ساخت دندان‌های شیشه سرامیکی مصنوعی، برخی از انواع مواد فلوئورسانس برای تولید پرسلان‌هایی با فلورسانس نزدیک به دندان‌های طبیعی اضافه می‌شود [40]. برای تولید رنگ‌های قابل قبول برای استفاده در شیشه سرامیک‌های دندانی، رنگ‌هایی که اضافه می‌شوند باید شیشه سرامیک‌های زرد تا زرد متمایل به قرمز تولید کنند. به جز اورانیوم، هیچ کاتیون فلز واسطه یا فلز خاکی کمیاب شناسایی نشده است که اثر زرد شفافی را به همراه داشته باشد. با این حال، مقررات مربوط به رادیواکتیویته، استفاده از اورانیوم را محدود می‌کند. همچنین استفاده از ترکیب اکسیدهای Ce و Ti می‌تواند رنگ‌های زرد را در لعاب‌ها و شیشه‌ها ایجاد کند [41]. استفاده از CeO_2 به خودی خود هیچ رنگی در شیشه ایجاد نمی‌کند، اما در ترکیب با TiO_2 زرد پررنگ را ایجاد می‌کند [37]. رنگ زرد را می‌توان با ترکیب اکسید فلز خاکی کمیاب Er_2O_3 تغییر داد [42]. شیشه سرامیک حاوی ترکیب CeO_2 و TiO_2 در نور مرئی عملکرد خوبی دارد، اما در این قطعات، فلورسانس در نور فرابنفش موج بلند اتفاق نمی‌افتد، زیرا وجود TiO_2 به شدت اشعه ماورای بنفش را جذب می‌کند و در نتیجه مشکل تغییر رنگ با نور ایجاد می‌شود [43]. سایر ترکیبات فلورسانس بر اساس اکسیدهای سریم و تربیوم فلورسانس را در زیر نور فرابنفش تولید می‌کنند. فلورسانس اکسید تربیوم همراه با طیف‌های جذب اکسید سریم به طور شگفت‌انگیزی فلورسانس مشابه دندان‌های طبیعی را ایجاد می‌کند. در نور مرئی، CeO_2 عنصر کلیدی برای رنگ زرد است. CeO_2 همچنین به عنوان یک عامل فلورسانس قوی در شیشه سرامیک عمل می‌کند و فلورسانس زرد را تحت نور فرابنفش با طول موج بلند (۳۶۵۰ Å) ایجاد می‌کند. یک شیشه سرامیک آلکالی یا آلومینوسیلیکات خاکی قلیایی می‌تواند فلورسانس را از طریق افزودن یک فعال‌کننده مانند یوروپیوم نشان دهد. در شیشه سرامیک با تحریک اشعه ماورای بنفش فلورسانس اتفاق می‌افتد و رنگی شبیه به رنگ دندان‌های طبیعی ایجاد می‌شود. استفاده از فعال‌کننده یوروپیوم برای تولید فلورسانس و کمک به جلوگیری از ایجاد رنگ‌های تیره در شیشه سرامیک‌های لوسیت/فلدسپات استفاده می‌شود. این شیشه سرامیک‌ها دارای ترکیب پایه آلومینوسیلیکات هستند که به آن یوروپیوم اضافه می‌شود. شیشه سرامیک دندانی معمولا شامل فازهای بلوری ریز هستند که در زمینه شیشه‌ای پراکنده شده و در دمای ۹۰۰ تا ۱۰۰۰°C سینتر می‌شوند. مواد فلورسنت حاوی یوروپیوم به عنوان فعال‌کننده فلورسانس (فلورسانس قرمز در مورد یوروپیوم سه ظرفیتی و فلورسانس آبی در مورد یوروپیوم

دو ظرفیتی) عمل می‌کنند. ترکیبات سرامیکی که فقط حاوی یوروپیوم به عنوان فعال‌کننده هستند، فلورسانس آبی ـ سفید یا بنفش ـ سفید نامطلوب را پس از سینتر نشان می‌دهند [44]. یک راه حل پیشنهادی برای مشکل عدم تطابق رنگ، جایگزینی بخشی از یوروپیوم با عنصر دیگری است که به موجب آن توزیع طول موج برای ایجاد رنگ‌های فلورسنت، که بیشتر با دندان‌های طبیعی مرتبط هستند، گسترش می‌یابد.

فرصت‌ها و تهدیدها

بازار مواد سرامیکی دندانی، فرصت‌های فراوانی را ارائه می‌دهد که ناشی از پیشرفت‌های تکنولوژیکی و انتظارات در حال تغییر بیماران است. یکی از فرصت‌های مهم، توسعه مداوم فرمولاسیون‌های سرامیکی جدید و فناوری‌های تولید است که خواص و کاربردهای این مواد را افزایش می‌دهد. انتظار می‌رود نوآوری‌هایی مانند سرامیک‌های هیبریدی و سیستم‌های بهبودیافته CAD/CAM، دامنه ترمیم‌های سرامیکی را گسترش دهند و طیف وسیع‌تری از نیازها و ترجیحات بیماران را برآورده کنند. با ادامه تحقیقات برای گسترش مرزهای علم مواد، بازار آماده است تا از معرفی محصولات پیشرفته‌ای که عملکرد و زیبایی‌شناسی برتر ارائه می‌دهند، بهره‌مند شود [45,46].

یکی دیگر از فرصت‌های امیدوارکننده، افزایش تقاضا برای روش‌های دندانپزشکی زیبایی، به ویژه در میان جمعیت جوان‌تر است. تمایل به لبخند زیبا و تأثیر فزاینده رسانه‌های اجتماعی بر تصورات شخصی، علاقه به درمان‌های زیبایی را افزایش داده و بازاری قوی برای ترمیم‌های مبتنی بر سرامیک ایجاد کرده است. این روند با افزایش درآمد قابل توجه، روز به روز در حال افزایش است. با افزایش تعداد زیباجویان، انتظار می‌رود تقاضا برای روکش‌های سرامیکی، تاج‌ها و سایر راه‌حل‌های زیبایی‌شناسی رشد قابل توجهی را تجربه کند [47].

علی‌رغم فرصت‌های امیدوارکننده، بازار مواد سرامیکی دندانپزشکی با تهدیدها و چالش‌های خاصی نیز روبه‌رو است که می‌تواند مانع رشد آن شود. یکی از محدودیت‌های قابل توجه، هزینه بالای ترمیم‌های سرامیکی است که می‌تواند دسترسی به آن‌ها را برای برخی از بیماران محدود کند. در حالی که پیشرفت در فناوری، کارایی فرایندهای تولید را بهبود بخشیده است، سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز برای مواد و تجهیزات سرامیکی همچنان مانعی برای برخی از مطب‌های دندانپزشکی است. علاوه بر این، بازار با رقابت مواد جایگزین، مانند رزین‌های کامپوزیت و فلزات، روبه‌رو است که ممکن است مزایای هزینه یا مزایای خاصی را در کاربردهای خاص ارائه دهند. پرداختن به این چالش‌ها برای فعالان بازار برای حفظ و گسترش جایگاه خود در صنعت بسیار مهم خواهد بود [48].

نتیجه‌گیری

دندانپزشکی مدرن با ادغام فناوری CAD/CAM، تحولی دگرگون‌کننده را تجربه کرده است که به طور قابل توجهی بر انتخاب و کاربرد مواد تمام سرامیکی تأثیر گذاشته است. این نسخه خطی، تغییر اساسی از روش‌های سنتی به دیجیتال را برای پزشکان با هدف بهبود نتایج بیمار برجسته می‌کند. این مطالعه بر ضرورت انتخاب موادی که استحکام و دوام استثنایی را فراهم می‌کنند، تأکید می‌کند و در عین حال عوامل زیبایی‌شناختی، از جمله پایداری رنگ و شفافیت، که برای دستیابی به زیبایی ضروری هستند را نیز در نظر می‌گیرد. فناوری CAD/CAM پزشکان را قادر می‌سازد تا کنترل دقیقی بر طراحی و ساخت داشته باشند و در نتیجه، قرار ملاقات‌ها را بهینه کنند، راحتی بیمار را بهبود بخشند و همکاری بین رشته‌ای را ارتقا دهند. این راهنما به عنوان یک منبع عملی برای پزشکانی که پیچیدگی‌های انتخاب مواد تمام سرامیکی را در دندانپزشکی دیجیتال معاصر مدیریت می‌کنند، عمل می‌کند و به آن‌ها در دستیابی به درمان‌های ترمیمی قابل اعتماد و طولانی‌مدت کمک می‌کند.

در کاربرد عملی، انتخاب مواد پروتز باید با ارزیابی جامع از سناریوی بالینی، شامل خواسته‌های بیومکانیکی ترمیم، انتظارات زیبایی‌شناختی بیمار و پایداری طولانی‌مدت ماده و سیستم سمان انتخاب‌شده، هدایت شود. برای ترمیم‌های قدامی، سرامیک‌های بسیار شفاف مانند پرسلن فلدسپاتیک و دی‌سیلیکات لیتیوم به دلیل خواص نوری‌شان ترجیح داده می‌شوند، ضمن اینکه نیاز آن‌ها به پشتیبانی کافی و مدیریت دقیق اکلوزال (اکلوزال یکی از مهم‌ترین مفاهیم در علم دندانپزشکی است که به نحوه برخورد و تماس دندان‌ها با یکدیگر هنگام بستن فک‌ها اشاره دارد) نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. در نواحی خلفی یا برای ترمیم‌های تحمل بار، مواد با استحکام بالا (مانند زیرکونیا، سیلیکات لیتیوم تقویت‌شده با زیرکونیا)، دوام و مقاومت بیشتری را در برابر

شکستگی نشان می‌دهند و در نتیجه کاربرد این مواد افزایش می‌یابد. سرامیک‌های هیبریدی یک گزینه همه‌کاره ارائه می‌دهند که انعطاف‌پذیری و استحکام متوسط را برای موارد مختلف متعادل می‌کند. موفقیت طولانی‌مدت این ترمیم‌ها به شدت به انتخاب و کاربرد مناسب سیمان‌های رزینی وابسته است و عواملی مانند استحکام پیوند، مکانیسم پلیمریزاسیون و سازگاری مواد برای نتایج قابل پیش‌بینی تعیین‌کننده هستند.

واژه‌نامه

شیشه سرامیک	Glass Ceramic
لوسیت	Leucite
آپاتیت	Apatite
مونوکلینیک	Monoclinic
تتراگونال	Tetragonal
مکعبی	Cubic
فلورسانس	Fluorescence

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] J. R. Kelly, “Dental ceramics: current thinking and trends,” *Dental Clinics*, vol. 48, no. 2, pp. 513–530, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.cden.2004.01.003

[2] L. H. d. Silva, E. d. Lima, R. B. d. P. Miranda, S. S. Favero, U. Lohbauer, P. F. Cesar, “Dental ceramics: a review of new materials and processing methods,” *Brazilian Oral Research*, vol. 31, p. e58, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0058

[3] A. H. Nejat, “Overview of current dental ceramics,” *Dental Clinics*, vol. 69, no. 2, pp. 155–171, 2025. [Online]. Available: https://www.binasss.sa.cr/abr25/29.pdf

[4] B. B. Dor, A. Villa, C. Hayes, E. Alpert, D. S. Shepard, and S. T. Sonis, “Financial burden of dental care among patients with head and neck cancer,” *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery*, vol. 150, no. 9, pp. 811–818, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1001/jamaoto.2024.2260

[5] S. Habibzadeh, F. Khamisi, S. A. Mosaddad, G. V. d. O. Fernandes, and A. Heboyan, “Full-ceramic resin-bonded fixed dental prostheses: A systematic review,” *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, vol. 22, pp. 310–342, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/22808000241250118

[6] N. C. Lawson and J. O. Burgess, “Dental ceramics: a current review,” *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, vol. 35, no. 3, 2014. [Online].

[7] Y. Jiang, C. Zhang, J. Xu, J. Xu, X. Q. Zhan, N. Ma, and F. C. Tsai, “An overview of dental glass–ceramics: From material design to the manufacturing process,” *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, vol. 6, no. 4, pp. 1120–1139, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/ces2.10224

[8] X. Liu, X. Yao, R. Zhang, L. Sun, Z. Zhang, Y. Zhao, T. Zhang, J. Yan, Y. Zhang, and X. Wu, “Recent advances in glass-ceramics: performance and toughening mechanisms in restorative dentistry,” *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 112, no. 1, pp. 11–36, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/jbm.b.35334

[9] F. P. d. F. C. Pietoso, S. F. Santos, L. H. d. Silva, and P. F. Cesar, “Production and characterization of feldspathic-

muscovite glass composite for dental prosthesis," *Brazilian Oral Research*, vol. 39, pp. 110–132, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2025.vol39.066

[10] S. Gali, K. Ravikumar, B. Murthy, and B. Basu, "Zirconia toughened mica glass ceramics for dental restorations," *Dental Materials*, vol. 34, no. 3, pp. 36–45, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.01.009

[11] S. Uno, M. Okada, H. Taketa, Y. Torii, and T. Matsumoto, "Toughening of highly translucent zirconia by monoclinic ZrO2 and SiO2 particle coating," *Dental Materials Journal*, vol. 39, no. 2, pp. 295–301, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.4012/dmj.2018-415

[12] Z. G. A.-k. Al-Jlaihawi, "Study of the physical properties of a novel lithium aluminosilicate dental glass-ceramic," Sheffield Hallam University, United Kingdom, 2020. [Online].

[13] C. Li, G. Wang, S. Wang, W. Shen, Y. Zhang, J. Kang, and Z. Xiao, "Fluorapatite Glass-Ceramics in Dentistry: Synthesis, Properties, Forming Technology, Applications, Challenges, and Future Perspectives," *Materials*, vol. 18, no. 4, pp. 804–815, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/ma18040804

[14] R. N. Raghavan, "Ceramics in dentistry," in *Sintering of Ceramics-New Emerging Techniques*, 2014. [Online].

[15] Y. Zhang, H. Guo, H. Zhang, Y. Deng, B. Wang, and J. Yang, "Effect of added mullite whisker on properties of lithium aluminosilicate (LAS) glass-ceramics prepared for dental restoration," *Journal of Biomedical Nanotechnology*, vol. 14, no. 11, pp. 1944–1952, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1166/jbn.2018.2637

[16] D. U. Tulyaganov, M. F. Alves, K. Dimitriadis, S. Murtazaev, S. Agathopoulos, and H. R. Fernandes, "Fundamentals and advances in production and application of non-stoichiometric lithium disilicate glass-ceramics: A brief review," *Ceramics International*, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.01.350

[17] L. D. Silva, V. O. Soares, O. Peitl Filho, F. C. Serbena, M. Rampf, C. Ritzberger, M. Dittmer, and E. D. Zanotto, "Exploring new machinable, strong lithium metasilicate-based glass-ceramics for dental applications," *Ceramics International*, vol. 50, no. 17, pp. 31335–31344, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.437

[18] D. Abozaid, A. Azab, M. A. Bahnsawy, M. Eldebawy, A. Ayad, R. Soomro, E. Elwakeel, and M. A. Mohamed, "Bioactive restorative materials in dentistry: a comprehensive review of mechanisms, clinical applications, and future directions," *Odontology*, vol. 1, pp. 1–29, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10266-025-01162-w

[19] S. Scutt and D. Gillam, "The Application of Degradable/Bioactive Glasses in Dentistry: An Overview," *Clinical Oral Science and Dentistry*, 2025. [Online].

[20] W. Höland, V. Rheinberger, E. Apel, C. van't Hoen, M. Höland, A. Dommann, M. Obrecht, C. Mauth, and U. Graf-Hausner, "Clinical applications of glass-ceramics in dentistry," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 17, pp. 1037–1042, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10856-006-0441-y

[21] O. Akhlaghi, E. Camposilvan, V. Garnier, Z. Goharibajestani, S. Khabbaz, C. Ow-Yang, Y. Jorand, and L. Gremillard, "Conventional sintering of nano-crystalline yttria-stabilized zirconia enables high-strength, highly

translucent and opalescent dental ceramics," *Dental Materials*, vol. 40, no. 7, pp. 1031–1040, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.05.007

[22] A. A. Madfa, F. A. Al-Sanabani, N. H. Al-Qudami, J. S. Al-Sanabani, and A. G. Amran, "Use of zirconia in dentistry: An overview," *The Open Biomaterials Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, 2014. [Online]. Available: https://www.academia.edu/download/33611171/Use_of_Zirconia_in_Dentistry_An_Overview.*The_Open_Biomaterials_Journal*_2014.pdf

[23] B. F. Costa, L. Durães, E. A. da Silva, I. I. Costa, V. A. Khomchenko, R. A. Vezo, and A. Ramalho, "Synthesis, Structural, and Mechanical Properties of Alumina–Yttria-Stabilized Zirconia Nanocomposites for Prospective Dental Ceramics," *Advanced Engineering Materials*, vol. 27, no. 6, pp. 980–992, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/adem.202401843

[24] F. Zhang, K. Zhang, Y. Zuo, X. Jin, and J. Yang, "Effect of inert glass on the physical and mechanical properties of zirconia dental ceramics fabricated by digital light processing," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 107, no. 7, pp. 4689–4704, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/jace.19793

[25] N. Golriz and N. Hosseinabadi, "Additive manufacturing of ceria and yttria incorporated toughened monolithic zirconia dental ceramic crowns: In vitro simulated aging behavior," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 132, no. 3, pp. 16–25, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.05.037

[26] F. Sharifianjazi, A. H. Pakseresht, M. S. Asl, A. Esmaeilkhanian, H. W. Jang, and M. Shokouhimehr, "Hydroxyapatite consolidated by zirconia: applications for dental implant," *Journal of Composites and Compounds*, vol. 2, no. 2, pp. 26–34, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.29252/jcc.2.1.4

[27] S. Gali, Z. Patel, Y. Akanksha, and V. Karuveetil, "Effect of Coloring Pigments on the Properties of Dental Zirconia—A Systematic Review and Meta-Analysis," *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, vol. 37, no. 6, pp. 1419–1442, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/jerd.13441

[28] H. Zhu, J. Jiang, Y. Wang, S. Wang, Y. He, and F. He, "Additive manufacturing of dental ceramics in prosthodontics: The status quo and the future," *Journal of Prosthodontic Research*, vol. 68, no. 3, pp. 380–399, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_23_00119

[29] L. H. Schlichting, T. H. Resende, K. R. Reis, A. R. Dos Santos, I. C. Correa, and P. Magne, "Ultrathin CAD-CAM glass-ceramic and composite resin occlusal veneers for the treatment of severe dental erosion: An up to 3-year randomized clinical trial," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 128, no. 2, pp. 120–136, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.02.009

[30] E. Jaber and E. S. Elsubeihi, "Influence of Vita Enamic Hybrid Ceramic with Different Thicknesses and Translucencies on the Polymerization of Light-Cured Resin Cement: An In Vitro Study," *European Journal of Dentistry*, 2025. [Online]. Available: https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/html/10.1055/s-0045-1809425

[31] M. B. Blatz, J. Conejo, A. Alammar, and J. Ayub, "Current protocols for resin-bonded dental ceramics," *Dental Clinics*, vol. 66, no. 4, pp. 603–625, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.cden.2022.05.008

[32] L. A. Crins, N. J. Opdam, C. M. Kreulen, B. A. Sterenborg, E. M. Bronkhorst, W. A. Fokkinga, M.-C. D. Huysmans, and B. A. Loomans, "Prospective study on CAD/CAM nano-ceramic (composite) restorations in the treatment of severe tooth wear," *The Journal of Adhesive Dentistry*, vol. 24, pp. 1110–1123, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3290/j.jad.b2838137

[33] J. Attal, G. Tirlet, M. LeCorre, P. Boitelle, E. Dursun, A. Benoit, L. Valtaud, E. Caussin, and P. François, "Posterior Cantilevered Single-Retainer All-Ceramic Resin-Bonded Fixed Dental Prostheses: A 12-Year Clinical Case and Proposed Clinical Recommendations," *Operative Dentistry*, vol. 50, no. 3, pp. 235–244, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.2341/24-116-S

[34] X. Dong, G. Wang, S. Wang, X. Yang, D. Wen, and L. Zhang, "Designing and additive manufacturing of biomimetic interpenetrating phase zirconia-resin composite dental restorations with TPMS structure," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 160, pp. 136–150, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106718

[35] S. S. Hashemikamangar, A. M. Nahavandi, M. Daryadar, S. Valizadeh, and M. Özcan, "Effect of glazing and polishing on opalescence and fluorescence of dental ceramics," *Clinical and Experimental Dental Research*, vol. 8, no. 6, pp. 1645–165, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/cre2.669

[36] Y. Yang, C. Hu, Q. Liu, and J. Li, "Research progress and prospects of colored zirconia ceramics: A review," *Journal of Advanced Ceramics*, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.26599/JAC.2024.9220941

[37] P. M. Abd El Aziz, "Applications of Cerium Oxide Nanoparticles in Dentistry: A Review Article," *ERU Research Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 2581–2594, 2025.

[38] A. K. Lakshya, K. K. Jha, A. Chowdhury, "Stabilization of phase-pure tetragonal zirconia ceramics with minimum CeO2 doping and associated benefits," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 107, no. 10, pp. 6791–6805, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/jace.19997

[39] C. Volpato, A. Philippi, C. Petter, and M. Fredel, *Ceramic Materials and Color in Dentistry*. IntechOpen, London, U.K., 2010. [Online].

[40] T. Nakamura, S. Okamura, H. Nishida, A. Kawano, S. Tamiya, K. Wakabayashi, and T. Sekino, "Fluorescence and physical properties of thulium and erbium co-doped dental zirconia," *Dental Materials Journal*, vol. 40, no. 5, pp. 1080–1085, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.4012/dmj.2020-387

[41] D. A. Aloraini, H. M. Almutairi, A. S. Alzahrani, K. S. Shaaban, and E. A. Wahab, "Enhancement of the structural, mechanical and radiation shielding of borosilicate glasses doped with vanadium ions," Silicon, vol. 16, no. 7, pp. 2791–2800, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s12633-024-02855-7

[42] N. Nikkerdar, A. Golshah, M. S. Mobarakeh, N. Fallahnia, B. Azizie, and E. Shoohanizad, "Recent progress in application of zirconium oxide in dentistry," Journal of Medicinal and Pharmaceutical Chemistry Research, vol. 6, pp. 1042–107, 2024. [Online].

[43] I. Dmitrieva, Er-Doped Glass-Ceramics, 2025. [Online]. Available: https://trepo.tuni.fi/handle/10024/118584

[44] D.-c. Li, W.-b. Liu, S.-j. Zhao, H.-s. Feng, D.-h. Yang, and S.-j. Gao, "Effect of cerium oxide and erbium oxide as colorants on the chromaticity and mechanical properties of dental zirconia ceramic," *Chinese Journal of Tissue*

Engineering Research, vol. 15, no. 47, pp. 10–36, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8225.2011.47.022

[45] N. Maiti, N. Mahapatra, D. Patel, J. Chanchad, A. S. Shah, S. M. Rahaman, and P. Surana, "Application of CAD-CAM in Dentistry," *Bioinformation*, vol. 20, no. 5, pp. 547–590, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.6026/973206300200547

[46] L. Tavares, D. Ferraz, K. Dolenkei, K. Zancopé, A. A. Silva, and L. Raposo, "Variations in Microstructural, Thermal, and Mechanical Properties of Different CAD/CAM Lithium Disilicate Reinforced Glass Ceramics," *Operative Dentistry*, vol. 50, no. 3, pp. 333–344, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.2341/24-133-L

[47] H. S. Dettlinger, F. Fuchs, H. Hoelzig, J. Dörschner, J. J. Choi, P. Kemmesies, E. Günther, and A. Koenig, "Optical properties and microstructure of CAD/CAM silicate glass-ceramics with different levels of translucency," *Dental Materials*, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.dental.2025.08.001

[48] P. Xiao, *Frontiers in Ceramics* Grand Challenges. Frontiers Media SA, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.3389/fceic.2023.1137377