

Yaşlandırma Yöntemlerinin Zirkonyumun Dayanıklılığına Etkisi

Effect of Aging Process on Strength of Zirconia

 Cem ŞAHİN^a

^aHacettepe Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Ağız ve Diş Sağlığı Programı Ankara, TÜRKİYE

ÖZET Amaç: Zirkonyum belirli bir süre boyunca yüksek ısı, nem ve stres gibi dış etkenlere maruz kaldığında, sahip olduğu tetragonal fazdaki kararlı yapısından çıkarak daha az kararlı olduğu monoklinik faza dönüşüm gösterir. Bu dönüşüm sırasında materyal, hacimce genişleyerek, çatlak oluşumunu tetikler. Bu süreç devam ettikçe dayanıklılığını önemli ölçüde kaybetmeye başlar. Zirkonyumun dayanıklılığındaki değişimler bilinen yaygın yöntemler uygulanarak incelenebilir. Ancak zirkonyuma uygulanan yaşlandırma yöntemleri çok fazla çeşitlilik göstermektedir. Bu çalışma; ısı, basınç ve süre gibi değişen parametrelere sahip hızlandırılmış yaşlandırma yöntemi sonrasında zirkonyum örneklerin kırılma dayanımlarındaki değişimleri incelemeyi amaçlamaktadır. Gereç ve Yöntemler: Kırk adet 3 mol Y2O3 ile stabilize edilmiş zirkonyum örnek, 1,2x5x24 mm boyutlarında önceden fırınlanmış bloklardan CAD/CAM sistemi kullanılarak hazırlandı. Örnekler daha sonra rastgele olarak onarlı 4 gruba ayrıldı ve kontrol grubu dışındaki gruplara hızlandırılmış yaşlandırma uygulandı. Yaşlandırma prosedürleri sonrası test örneklerine 3 nokta kırılma testi uygulandı. Bulgular: Hiçbir yaşlandırma işlemi uygulanmamış örneklerde ortalama dayanım değeri 389,62±2,02 N bulunmuştur ve bu değer istatistiksel olarak diğer tüm gruplardan farklıdır (p=0,01<0,05). Üç nokta kırılma testinde en düşük dayanım 180-5 grubunda elde edilmiştir (320,57±1,42 N) ve bu değer istatistiksel olarak tüm gruplardan farklıdır (p=0,01<0,05). Sonuç: Isı değişkeni hızlandırılmış yaşlandırma yönteminin en etkin parametresi olarak bulunmuştur.

ABSTRACT Objective: In the presence of high temperature, humidity and stress for a certain period of time, zirconium exhibits phase transformation from its stable tetragonal phase to less stable monoclinic phase. During this transformation, the material expands in volume which trigger crack formation. As this process continues, zirconium starts to lose its durability significantly. Changes in the durability of zirconium can be studied using commonly known methods. However, the aging methods applied to zirconium may vary. This study aims to investigate the changes in the fracture strength of zirconium samples after the accelerated aging method with varying parameters such as temperature, pressure and time. Material and Methods: Forty zirconium sample stabilized with 3 moles of Y2O3 with 1.2x5x24 mm dimensions were prepared by using a CAD/CAM system from pre-sintered blocks. The samples were then randomly divided into 4 groups each containing 10. Accelerated aging procedure was then applied to groups without the control group. After the aging procedures, three-point bending test was applied to the test samples. Results: The mean fracture resistance value was found to be 389.62±2.02 N in the samples at group without aging procedure and this value was statistically different from all other groups (p=0.01<0.05). The lowest strength in the three-point fracture test was obtained in the "180-5" group (320.57±1.42 N) and this value was statistically different from all groups (p=0.01<0.05). Conclusion: Heat variable was found to be the most effective parameter of accelerated aging method.

Anahtar Kelimeler: Yttria stabilize dörtgen zirkon;
dental restorasyon başarısızlığı;
yorulma kırıkları

Keywords: Yttria stabilized tetragonal zirconia;
dental restoration failure;
fatigue fractures

Zirkonyum, sahip olduğu estetik ve fizik özellikleri sayesinde hem diş üstü ve implant üstü sabit protezlerde hem de hareketli protezlerde sıklıkla tercih edilmektedir.

Zirkonyum oda sıcaklığında stabil sayılan tetragonal formda bulunur. Ancak belirli bir süre boyunca yüksek ısı, nem ve stres varlığında sahip olduğu ka-

rarlı yapısından çıkarak daha az kararlı olduğu monoklinik faza dönüşüm gösterir. Bu dönüşüm, literatürde düşük ısı bozunması [low temperature degradation (LTD)] adıyla tarif edilmektedir.^{1,2} Bu dönüşüm sırasında materyal, hacimce genişleyerek çatlak oluşumunu tetikler. Çatlak oluşumu materyalin iç yapısında dağılarak ilerleme eğilimindedir ve

Correspondence: Cem ŞAHİN

Hacettepe Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Ağız ve Diş Sağlığı Programı Ankara, TÜRKİYE/TURKEY

E-mail: cemsahin@hacettepe.edu.tr



Peer review under responsibility of Türkiye Klinikleri Journal of Dental Sciences.

Received: 7 Sep 2020

Received in revised form: 9 Oct 2020

Accepted: 23 Nov 2020

Available online: 3 Mar 2021

2146-8966 / Copyright © 2021 by Türkiye Klinikleri. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

bu süreç devam ettikçe zirkonyum dayanıklılığını önemli ölçüde kaybetmeye başlar.³ Fiziksel özelliklerini kaybetmeye başlayan zirkonyumun klinikte kullanımını bu noktadan sonra sorgulanır hâle dönüşmektedir.

Araştırmacılar bu noktadan yola çıkarak, zirkonyumun dayanıklılığındaki değişimleri çeşitli yöntemler uygulayarak değerlendirmişlerdir.^{4,5} Bunlardan en sık kullanılanı 3 nokta kırılma testidir. Bu test çoğu çalışmada birbirine çok yakın parametrelerle ve standardizasyonla hazırlanmaktadır. Ancak aynı çalışmalarda, zirkonyuma uygulanan yaşlandırma yöntemleri çok fazla çeşitlilik göstermektedir. Yaşlandırma yönteminin amacı, zirkonyumun LTD sürecini hızlandırmaktır. Çok çeşitli olabildiği gibi uzun süreli veya hızlandırılmış da olabilmektedir. Günümüz çalışmalarında, araştırmacılar çoğunlukla zamandan ve işlem sayısından avantaj sağlamak amacıyla hızlandırılmış yöntemlere yönelmektedir.

Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu [International Standardization Organization (ISO)] tarafından belirlenen 13356 kodlu yöntem uyarınca örnek 0,2 atmosfer basınç altında 5 saat süreyle 134°C'de bekletilmelidir. Ancak çalışmalarda araştırmacılar bu standartların dışına çıkabilmekte ve kendi koşullarını ortaya çıkarabilmektedir.⁶⁻⁹

Bu çalışma; ısı, basınç ve süre gibi değişen parametrelere sahip hızlandırılmış yaşlandırma yöntemi

sonrasında zirkonyum örneklerin kırılma dayanımlarındaki değişimleri incelemeyi ve hangi değişkenin daha etkin bir parametre olduğunu belirlemeyi amaçlamaktadır.

GEREÇ VE YÖNTEMLER

Kırk adet 3 mol Y₂O₃ ile stabilize edilmiş zirkonyum (IPS e.max ZirCAD, Ivoclar, Vivadent, Schaan, Lih-tenştayn) örnek, 1,2x5x24 mm boyutlarında (ISO 6872-2015) önceden fırınlanmış bloklardan üretici firma önerileri doğrultusunda CAD/CAM sistemi kullanılarak hazırlandı. Örnekler sırasıyla 300 ve 600 parçacıklı zımpara ile zımparalandı. Devamında tüm örnekler 15 dk boyunca içerisinde distile su bulunan ultrasonik temizleyicide (Ultrasonic Cleaner VGT-1740QTD, Guangzhou Sunlight Medical Equipment Co. Ltd., Guangdong, Çin) bekletildi ve rastgele olarak onarlı 4 gruba ayrıldı.

Hidrotermal yaşlandırma prosedürleri basınçlı otoklav kullanılarak Tablo 1'de gösterildiği gibi her bir gruba ayrı ayrı uygulandı. Birinci grupta bulunan örnekler (yaşlandırma yok) hazırlanmaları sonrası ultrasonik temizleme dışında hiçbir işlem yapılmadan kırılma testi uygulandı. Tabloda 2. satırda yer alan 134-5 grubuna 1 atmosfer (atm) basınç altında 5 saat boyunca 134°C ısı uygulandı. Tabloda 3. sırada yer alan 134-15 grubunda ise ısı 134-5 grubundakiyle

TABLO 1: Örnekler üzerine uygulanan hızlandırılmış yaşlandırma prosedürü.

n	İşlem kodu	Basınç (atm)	Süre (saat)	Sıcaklık°C
10	Yaşlandırma yok (kontrol)	0	0	0
10	134°C-5 (ISO 13356)	1	5	134°C
10	134°C-15	2	15	134°C
10	180°C-5	1	5	180°C

Çalışmadaki gruplar, örnek sayıları ve değişken parametreler. n: Örnek sayısı; atm: Atmosfer.

TABLO 2: Tüm gruplarda 3 nokta kırılma testi sonucu ortaya çıkan ortalama ve SS değerleriyle %95 güven aralığındaki üst ve alt sınırlar.

İşlem adı	n	Ortalama (N)	SS (N)	%95 Güven aralığı	
				Alt sınır (N)	Üst sınır (N)
Yaşlandırma yok	10	389,62a*	2,02	388,1792	391,0748
134-5	10	355,05b	1,41	354,0402	356,0638
134-15	10	343,24c	0,90	342,5977	343,8943
180-5	10	320,57d	1,42	319,5527	321,5953

Tabloda bulunan üst yazılar istatistiksel farklılıkları göstermektedir. n: Örnek sayısı; N: Newton; SS: Standart sapma.

aynı sıcaklıkta bırakılırken diğer 2 parametrede artış yönünde değişim yapıldı. Buna göre basınç 1 atm'den 2 atm'ye çıkarılırken uygulama süresi de 5 saatten 15 saate çıkarıldı. Son satırda belirtilen grupta ise basınç ve süre 134-5 grubundaki standartlara yani sırasıyla 1 atm basınç ve 5 saat süreye tekrar indirilirken sıcaklık 180°C'ye çıkarıldı.

Yaşlandırma sonrası hem kontrol grubu örneklerine hem de test örneklerine, 0,8 mm/dk hızla hareket eden ve maksimum 1,500 N kuvvet uygulamaya ayarlanan universal test cihazında (Lloyd LR 50K, Lloyd Ins. Ltd., West Sussex, Birleşik Krallık) 3 nokta kırılma testi uygulandı.

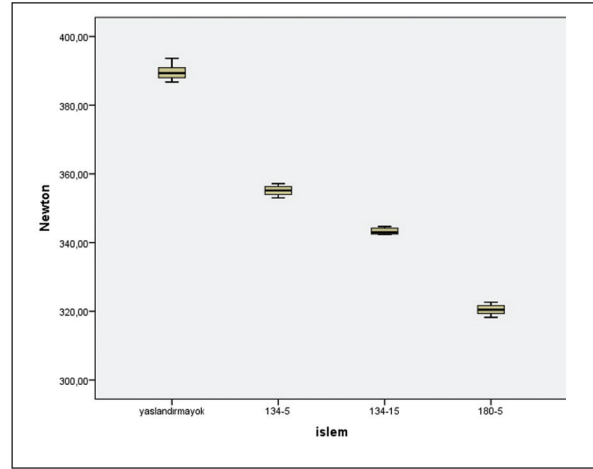
İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Elde edilen mekanik kuvvet verileri (Newton) bilgisayarda bir yazılımla (SPSS v23.0; IBM Corp) istatistiksel olarak incelendi. Grupların istatistiksel incelemesinde veriler normal dağılım gösterdiği ($p>0,05$) ve homojen ($p=0,22>0,05$) olduğu için ANOVA kullanıldı. Sonuçlar istatistiksel olarak anlamlı bulundu ($p=0,01<0,05$). Devamında gruplar arası karşılaştırmada Duncan "post hoc" testi uygulandı. Tüm istatistiksel incelemelerde $p<0,05$ anlamlı olarak kabul edildi.

BULGULAR

Tablo 2 tüm gruplarda elde edilen verilerin ortalama ve standart sapmalarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre hiçbir yaşlandırma işlemi uygulanmamış örneklerde ortalama dayanım değeri $389,62\pm 2,02$ N bulunmuştur ve bu değer istatistiksel olarak diğer tüm gruplardan farklıdır ($p=0,01<0,05$). Üç nokta kırılma testinde en düşük dayanım 180-5 grubunda elde edilmiştir ($320,57\pm 1,42$ N) ve bu değer istatistiksel olarak tüm gruplardan farklıdır ($p=0,01<0,05$).

Tüm kırılma dayanım verileri göz önünde bulundurulduğunda uygulanan yaşlandırma yöntemlerinin tamamının istatistiksel olarak birbirinden farklı değerlerinin ortaya çıkmasına sebep olduğu görülmektedir (Şekil 1). Süre ve ısının artışıyla orantılı olarak kırılma dayanımlarının azaldığı da gözlemlenmektedir. Hızlandırılmış yaşlandırma işleminde 2. (134-5) ve 3. (134-15) gruplarda uygulanan ısı aynı olmasına rağmen aralarındaki süre ve basınç farkı,



ŞEKİL 1: Üç nokta kırılma testi box-plot grafiği.

dayanıklılığın istatistiksel olarak belirgin değişmesine sebep olmuştur.

TARTIŞMA

Bu çalışma, farklı süreçlere sahip yaşlandırma yöntemlerinin kırılma dayanımına etkisini incelemiştir. Çalışmada hiç hızlandırılmış yaşlandırma yapılmamış olan grup, kontrol grubu olarak belirlenmiştir. 134-5 grubunda ise ISO tarafından belirlenen parametreleri ve değerleri içeren yaşlandırma yöntemi kullanılmıştır (ISO 13356). Bu standart değer ve parametreler benzer çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir.^{10,11} Organizasyon tarafından belirlenen bu standartlara göre zirkonyumun hızlandırılmış yaşlanmaya maruz kalması için örneklerle 1 atm basınç altında 5 saat süreyle 134°C'de ısı uygulanması yeterlidir. Bu veriler oldukça değerlidir çünkü verilerin bazıları sabit tutulurken bazıları değiştirilerek alt gruplar elde edilmiş ve bu sayede hangi değişkenin zirkonyumun yaşlanmasında daha etkin rol oynadığının belirlenebilmesinin yolu açılmıştır.

Çalışmada en çok göze çarpan sonuç hem ısı hem süre hem de basınç değişikliğinin kırılma dayanımını istatistiksel belirgin olarak kademe kademe düşürmesidir. Herhangi bir yaşlandırma yöntemi uygulanmadığı için beklendiği gibi en yüksek kırılma dayanımını kontrol grubu göstermiştir ($389,62\pm 2,02$ N). 134-5 grubu kırılma değerleri ise kontrol grubunun ancak %90'ı kadardır. Bu hızlı kayıp oldukça dikkat çekicidir. Çalışmada yaşlandırma yöntemle-

rindeki yıprandırıcı süreçler ve parametreler arttıkça dayanıklılık istatistiksel belirgin olarak azalmaya devam etmektedir. Bu gözlem şartlar zorlandıkça bu azalmanın devam edeceği izlenimini ortaya çıkarılmaktadır. 134-5 grubu ile 134-15 grubunun 3 notta kırılma testi sonuçları karşılaştırıldığında 2. grubun kırılma dayanımındaki azalmanın %4 civarında olduğu, 134-15 ile 180-5 grubu karşılaştırıldığında ise dayanımdaki azalmanın tekrar %7 seviyesine geldiği gözlemlenebilmektedir. Bu farkların her 2'si de aslında istatistiksel olarak belirgindir ($p=0,01<0,05$). Ancak değişim ve test parametreleri incelendiğinde ısı sabitken basınç ve süre artışının kırılma dayanımında sadece %4'lük bir azalma meydana getirdiği, basınç ve süre tekrar ISO standardına düşürülürken ısı 180°C'ye yükseltildiğinde ise (180-5) kırılma dayanımındaki azalmanın tekrar belirginleştiği (%7) açıkça görülmektedir. Bu da yaşlandırma sürecinde ısıdaki artışın basınç ve süre artışından daha etkin bir parametre olduğu izlenimini uyandırmaktadır. De Souza ve ark. yaptıkları bir çalışmada, hızlandırılmış yaşlandırmanın zirkonyum altyapı materyali üzerindeki etkilerini incelemiş ve zirkonyumun kristalin yapısında ve dayanıklılığında değişikliğe sebep olmadığını ancak yapıda monoklinik faz artışı gözlemlediklerini belirtmişlerdir.¹² Bu çalışma, belirtilen çalışmanın sonuçlarıyla çelişmektedir. Flinn ve ark., Yttria stabilize zirkonya polikristalin örneklerde yaptıkları bir çalışmada, farklı hızlandırılmış yaşlandırma prosedürlerinin dayanıklılığa etkisini incelemiş ve hidrotermal yaşlandırmanın tetragonalden monokliniğe dönüşümü tetiklediğini ve dayanıklılıkta belirgin azalmaya sebebiyet verdiğini ortaya çıkarmışlardır.¹³ Bu çalışmada, Flinn ve ark.'nın yaptıkları çalışma ile uyumlu olarak yaşlandırmanın dayanıklılığı azalttığı sonucuna ulaşmıştır.

Bu çalışma, laboratuvar şartlarında yapılmış olsa da farklı yaşlandırma yöntemleri kullanılarak sonuçlar klinik açıdan da yorumlanabilir hâle getirilmeye çalışılmıştır. Bu yorumun önünü açan en etkin parametre ısıdır. Bilindiği gibi zirkonyum ağız ortamında laboratuvar şartlarındaki gibi çok yüksek ısılara maruz kalmamasına rağmen sürekli basınç, nem ve ısı varlığında düşük ısı bozulmasına uğramakta ve özelliğini kaybetmektedir. Zirkonyumun sıkışma tipi kuvvetlere çok yüksek dayanım gösterdiği nemden

de belirgin olarak etkilenmediği göz önünde bulundurulduğunda ağızdaki restorasyonlarda ortaya çıkan başarısızlıkların başlıca etkenin de basınçtan ve nemden ziyade, düşük de olsa, değişken ısı olabileceği belirtilebilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilirken dikkat edilmesi gereken noktalardan birisi de 134-5 grubu ile 134-15 grubu arasındaki yöntemsel farklardır. İkinci grubun (134-15) değişen parametreleri hem ısı hem de basınç bileşeninden oluşmaktadır. Bu nedenle kırılma dayanımındaki %4'lük azalmanın gerçekte hangi değişiklikten kaynaklandığını tam olarak söylemek mümkün değildir. Bir başka deyişle bu 2 grup arasında kırılma dayanımına hangisinin daha yıkıcı etki oluşturduğu konusunda yorum yapılamamaktadır. Bu çalışmanın belirtilen limitasyonu ile birlikte bir sonraki çalışmada her bir parametrenin tek tek değiştirilerek daha fazla sayıda alt grubun oluşturulduğu bir planlama tasarlamak daha anlamlı sonuçlar elde etmeyi sağlayabilir. Ancak yine de tüm alt gruplar değerlendirilerek bakıldığında çalışma hem ısı hem basınç hem de süre değişkenlerini içerdiği için değerlidir.

Dental materyallerin dayanıklılığını ölçmek için esneme dayanımı, çekme dayanımı, kırılma dayanımı ve sertlik gibi pek çok test yöntemi kullanılmaktadır.¹⁴⁻¹⁶ Üç nokta kırılma testi destekler üzerinde köprü şeklinde duran bir örneğin belirlenen noktasına kuvvet uygulanması esasına dayanır. Bu nokta çoğu çalışmada orta nokta olarak seçilmektedir. Uygulanan kuvvetin ve uygulama süresinin belirlenerek kullanılması, tüm kırılma anlarının bilgisayar aracılığıyla yakalanabilmesine olanak sağlar. Araştırmacılar, ilk kırılmanın başlangıcındaki kuvveti elde edebildikleri gibi kopma noktasındaki kuvveti de elde edebilirler. Bu çalışmada, kopma noktasındaki kuvvetin değeri incelenmiştir. Bunun nedeni klinikte gözlemlenebilen sürece en yakın durumu değerlendirmektir. Klinikte kullanıcılar restorasyonların seramik bölümlerdeki iç streslerin oluştuğu veya iç çatlakların oluştuğu durumu algılayamazlar ancak restorasyonun kırılması gibi örnekte meydana gelen total kırılma belirgin bir veridir.

Limitasyonlarıyla birlikte bu çalışmada, ISO standartlarında (ISO 6872-2015) zirkonyum altyapı hazırlanmıştır. Bu örnekler üzerlerine veneer seramik

veya press seramik uygulanmamış oldukları için aslında klinikteki restorasyonun final hâlini yansıtmamaktadır. Bu nedenle çalışmada elde edilen kırılma dayanım değerleri literatürdeki benzerlerinden daha düşük olabilir. Araştırmalar zirkonyumun üzerine eklenen veya preslenen seramik materyallerinin yapılar arasında iç içe geçme, kavrama, sarma ve kimyasal bağlanma gibi etkilerle daha güçlü bir bağlantı oluşturabildiğini göstermektedir.¹⁷⁻²⁰ Bununla birlikte zirkonyum materyali çeşitli stabilizatör bileşiklerle daha kararlı hâle getirilmiş olsalar da dış ortamında ısı ve basınç varlığında tetragonal fazdaki yapısını kaybederek daha kararsız ve dayanıksız olduğu monoklinik faza dönüşüm gösterebilir.²¹ Araştırmacılar zirkonyum üzerine uygulanan veneer seramik veya pres seramiklerin ve hatta zirliker veya glaze tabakasının, altyapı materyalini dış etkilere de koruduğunu belirtmektedir.^{22,23} Ancak bu aşamaların her birinin tekrarlayan fırınlama anlamına geldiği ve bunun da LTD'yi tetikleyebileceği unutulmamalıdır.²⁴⁻²⁶ Bu çalışmada, standardizasyonu sağlamak ve tüm yüzeylerin hızlandırılmış yaşlandırmadan maksimum etkilenebilmesini sağlamak amacıyla sadece zirkonyum altyapı kullanılmış, örneklerin üzerine hiçbir koruyucu uygulama yapılmamıştır.

Üretici firmalar magnezyum, alüminyum, seryum ve yitrium gibi metallerin oksitlerini zirkonyuma ekleyerek yapının oda sıcaklığında stabil kalmasını sağlarlar.^{6,7} Ancak bu oksitlerin ilave oranları belirli aralıklarda olmalıdır. Oranlardaki değişimler zirkonyumun tetragonal fazdan monoklinik faza dönüşümünü (LTD) tetikleyebilmektedir. Araştırmacılar, zirkonyum stabilizasyonunda Y₂O₃ ilavesinin oranının artırılması-

nın dış etkene bağlı faz değişimini tetiklenebileceğini buna bağlı olarak da kırılma dayanımının azalabileceğini belirtmektedirler.^{27,28} Bu çalışmada kullanılan zirkonyum, altyapının stabilitesini sağlamak için 3 mol hacimde Y₂O₃ ilave edilmiştir. Bu oran araştırmacılar tarafından ideale çok yakın olarak tarif edilmektedir ve çalışmada yaşlandırma sonunda kırılma dayanımında ortaya çıkan azalmada rolünün en az olduğu varsayılabilir.^{20,29}

SONUÇ

Zirkonyumun kırılma dayanımının ölçülmesinden önce uygulanacak hızlandırılmış yaşlandırma yönteminin seçimi çalışmada hedeflenen amaçlara ulaşabilmek açısından çok önemlidir. Bu çalışma; ısı değişkeninin, basınç ve süre değişkeninden daha etkin bir parametre olduğunu göstermektedir.

Finansal Kaynak

Bu çalışma sırasında, yapılan araştırma konusu ile ilgili doğrudan bağlantısı bulunan herhangi bir ilaç firmasından, tıbbi alet, gereç ve malzeme sağlayan ve/veya üreten bir firma veya herhangi bir ticari firmadan, çalışmanın değerlendirme sürecinde, çalışma ile ilgili verilecek kararı olumsuz etkileyebilecek maddi ve/veya manevi herhangi bir destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Bu çalışma ile ilgili olarak yazarların ve/veya aile bireylerinin çıkar çatışması potansiyeli olabilecek bilimsel ve tıbbi komite üyeliği veya üyeleri ile ilişkisi, danışmanlık, bilirkişilik, herhangi bir firmada çalışma durumu, hissedarlık ve benzer durumları yoktur.

Yazar Katkıları

Bu çalışma tamamen yazarın kendi eseri olup başka hiçbir yazar katkısı alınmamıştır.

KAYNAKLAR

- Lughi V, Sergo V. Low temperature degradation -aging- of zirconia: A critical review of the relevant aspects in dentistry. *Dent Mater.* 2010;26(8):807-20. [Crossref] [PubMed]
- Li L, Lv PJ, Wang Y. [Study on low temperature degradation of dental zirconia ceramic]. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban.* 2011;43(1):93-7. [PubMed]
- Kim JW, Covel NS, Guess PC, Rekow ED, Zhang Y. Concerns of hydrothermal degradation in CAD/CAM zirconia. *J Dent Res.* 2010;89(1):91-5. [Crossref] [PubMed] [PMC]
- S Sarıkaya I, Hayran Y. Effects of dynamic aging on the wear and fracture strength of monolithic zirconia restorations. *BMC Oral Health.* 2018;18(1):146. [Crossref] [PubMed] [PMC]
- Flinn BD, Raigrodski AJ, Mancl LA, Toivola R, Kuykendall T. Influence of aging on flexural strength of translucent zirconia for monolithic restorations. *J Prosthet Dent.* 2017;117(2):303-9. [Crossref] [PubMed]
- Harada K, Shinya A, Gomi H, Hatano Y, Shinya A, Raigrodski AJ. Effect of accelerated aging on the fracture toughness of zirconias. *J Prosthet Dent.* 2016;115(2):215-23. [Crossref] [PubMed]

7. Tanaka K, Tamura J, Kawanabe K, Nawa M, Uchida M, Kokubo T, et al. Phase stability after aging and its influence on pin-on-disk wear properties of Ce-TZP/Al₂O₃ nanocomposite and conventional Y-TZP. *J Biomed Mater Res A*. 2003;67(1):200-7. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
8. Tang X, Tan Z, Nakamura T, Yatani H. Effects of ageing on surface textures of veneering ceramics for zirconia frameworks. *J Dent*. 2012;40(11):913-20. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
9. Fathy SM, El-Fallal AA, El-Negoly SA, El-Bedawy AB. Translucency of monolithic and core zirconia after hydrothermal aging. *Acta Biomater Odontol Scand*. 2015;1(2-4):86-92. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
10. Walczak K, Meißner H, Range U, Sakkas A, Boening K, Wieckiewicz M, Konstantinidis I. Translucency of Zirconia Ceramics before and after Artificial Aging. *J Prosthodont*. 2019;28(1):e319-e24. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
11. Ghevalier J, Drouin JM, Cales B. Low temperature ageing behavior of zirconia hip joint heads. *Bioceramics*. 1997;10:135-8.
12. De Souza GM, Zykus A, Ghahnavyeh RR, Lawrence SK, Bahr DF. Effect of accelerated aging on dental zirconia-based materials. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2017;65:256-63. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
13. Flinn BD, deGroot DA, Mancl LA, Raigrodski AJ. Accelerated aging characteristics of three yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline dental materials. *J Prosthet Dent*. 2012;108(4):223-30. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
14. Harada K, Shinya A, Gomi H, Hatano Y, Shinya A, Raigrodski AJ. Effect of accelerated aging on the fracture toughness of zirconias. *J Prosthet Dent*. 2016;115(2):215-23. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
15. White SN, Miklus VG, McLaren EA, Lang LA, Caputo AA. Flexural strength of a layered zirconia and porcelain dental all-ceramic system. *J Prosthet Dent*. 2005;94(2):125-31. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
16. Sundh A, Molin M, Sjögren G. Fracture resistance of yttrium oxide partially-stabilized zirconia all-ceramic bridges after veneering and mechanical fatigue testing. *Dent Mater*. 2005;21(5):476-82. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
17. Santos RLP, Silva FS, Nascimento RM, Souza JCM, Motta FV, Carvalho O, et al. Shear bond strength of veneering porcelain to zirconia: Effect of surface treatment by CNC-milling and composite layer deposition on zirconia. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2016;60:547-56. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
18. Aboushelib MN, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations. Part 3: double veneer technique. *J Prosthodont*. 2008;17(1):9-13. [[PubMed](#)]
19. Alghazzawi TF, Janowski GM. Effect of liner and porcelain application on zirconia surface structure and composition. *Int J Oral Sci*. 2016;8(3):164-71. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
20. Sundh A, Molin M, Sjögren G. Fracture resistance of yttrium oxide partially-stabilized zirconia all-ceramic bridges after veneering and mechanical fatigue testing. *Dent Mater*. 2005;21(5):476-82. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
21. Lucas TJ, Lawson NC, Janowski GM, Burgess JO. Phase transformation of dental zirconia following artificial aging. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2015;103(7):1519-23. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
22. Wille S, Zumstrull P, Kaidas V, Jessen LK, Kern M. Low temperature degradation of single layers of multilayered zirconia in comparison to conventional unshaded zirconia: Phase transformation and flexural strength. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2018;77:171-5. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
23. Benetti P, Pelogia F, Valandro LF, Bottino MA, Bona AD. The effect of porcelain thickness and surface liner application on the fracture behavior of a ceramic system. *Dent Mater*. 2011;27(9):948-53. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
24. Xie H, Gu Y, Li Q, Qian M, Zhang F, Tay FR, et al. Effects of multiple firings on the low-temperature degradation of dental yttria-stabilized tetragonal zirconia. *J Prosthet Dent*. 2016;115(4):495-500. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
25. Cakir-Omur T, Gozneli R, Ozkan Y. Effects of silica coating by physical vapor deposition and repeated firing on the low-temperature degradation and flexural strength of a zirconia ceramic. *J Prosthodont*. 2019;28(1):e186-e94. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
26. Tang X, Luo H, Bai Y, Tang H, Nakamura T, Yatani H. Influences of multiple firings and aging on surface roughness, strength and hardness of veneering ceramics for zirconia frameworks. *J Dent*. 2015;43(9):1148-53. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
27. Elsayed A, Meyer G, Wille S, Kern M. Influence of the yttrium content on the fracture strength of monolithic zirconia crowns after artificial aging. *Quintessence Int*. 2019;50(5):344-8. [[PubMed](#)]
28. Pandoleon P, Kontonasaki E, Kantiranis N, Pliatsikas N, Patsalas P, Papadopoulou L, et al. Aging of 3Y-TZP dental zirconia and yttrium depletion. *Dent Mater*. 2017;33(11):e385-e392. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
29. Hübsch C, Dellinger P, Maier HJ, Stemme F, Bruns M, Stiesch M, et al. Protection of yttria-stabilized zirconia for dental applications by oxidic PVD coating. *Acta Biomater*. 2015;11:488-93. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]