

Derleme

Diş Hekimliğinde Biyoaktif Camların Kullanımı

Biyoaktif Camlar

Utilization of Bioactive Glasses in Dentistry

Ece Uçar Başol¹ , Işıl Çekiç Nagaş² 

ÖZET

Uzun yıllardır ortopedide kullanılan biyoaktif camlar son yıllarda diş hekimliğinde de geniş uygulama alanı bulmuştur. Biyo inert malzemelerin fibröz kapsüllenmesini engelleyebileceği düşünülerek geliştirilen biyoaktif camlar vücut sıvıları ile temasında hidroksiapatit çökelten malzemelerdir. Ayrıca gen ekspresyonu ve anjiyogenezi uyarması, antiseptik etkisi gibi özellikleri biyoaktif camlara olan ilgiyi arttırmıştır. Diş hekimliğinde; kemik rejenerasyonunda, mineralize edici ajan olarak ve hava aşındırmasında kullanılmaktadır. Aynı zamanda pulpa kaplama materyali, restoratif materyallere katkı maddesi ve implant kaplama materyali olarak da kullanım alanı bulmuştur. Bu derleme günümüzde diş hekimliğinde biyoaktif camların kullanım alanları ile ilgili güncel bir bakış açısı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyoaktif cam; Dental materyaller; Diş hekimliği

ABSTRACT

Bioactive glasses, which have been used in orthopedics for many years, have also found wide application in dentistry in recent years. Developed with the thought that bio inert materials can prevent fibrous encapsulation, bioactive glasses are materials that precipitate hydroxyapatite in contact with body fluids. In addition, properties such as gene expression and stimulation of angiogenesis and antiseptic effects have increased the interest in bioactive glasses. In dentistry; it is used in bone regeneration, as a mineralizing agent and in air abrasion. It has been also found used as a pulp coating material, additive to restorative materials and implant coating material. This review aims to provide an up-to-date perspective on the use of bioactive glasses in dentistry today.

Keywords: Bioactive glass; Dental materials; Dentistry

Makale gönderiliş tarihi: 30.09.2022; Yayına kabul tarihi: 28.10.2022

İletişim: Dt. Ece Uçar Başol

Gazi Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

E-posta: eceucar@yahoo.com

¹ Doktora öğrencisi, Gazi Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

² Prof., Gazi Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

GİRİŞ

Biyoaktif camlar ilk olarak 1969 yılında Florida Üniversitesi'nde Dr. Larry Hench tarafından geliştirilmiştir. İnsan vücudunda kullanılan biyoinert olarak tasarlanmış metal ya da polimerlerden üretilen implant materyalleri implantasyondan sonra fibröz kapsüllenmeyi tetiklemekteydi. Prof. Hench ve arkadaşları metal ve polimerleri insan vücudunun skar dokusu oluşturarak reddettiği, eğer hidroksiapatit çökeltten bir malzeme kullanılırsa bu malzemenin dokuya reddedilmeden bağlanabileceği hipotezine dayanarak çalışmaya başlamıştır. Sonuç olarak 45% SiO₂, 24.5% Na₂O, 24.5% CaO, 6% P₂O₅ içeriğinde bugün 45S5 ve Bioglass® olarak adlandırılan cam üretilmiştir.^{1,2} Biyoaktif camların keşfi, kemiğe bağlanan malzemelerin kullanılması, geliştirilmesi ve test edilmesini amaçlayan yeni bir araştırma alanının kapılarını açmıştır.³

Biyoaktif Camların İçeriği

Biyoaktif camların orijinal içeriği %45 SiO₂, % 24,5 Na₂O, %24,5 CaO ve %6 P₂O₅'ten oluşmaktadır.^{1,2} Biyoaktif camlar A ve B sınıfı olarak 2 şekilde sınıflandırılabilir. A Sınıfı biyoaktif camlar temel olarak %40–52 SiO₂, %10–50 CaO ve %10–35 Na₂O'dan oluşmaktadır. Ek olarak, cam bileşimi %2–8 P₂O₅, %0–25 CaF veya %0–10 B₂O₃ içerebilir. B sınıfı camlar ise %60 silika içeriğine sahip biyoinert camlardır.⁴

40'tan fazla araştırma grubu biyoaktif camların içeriği üzerine yıllardır çalışmaktadır. Bu çalışmalar sonucu Bioglass 45S5 gibi geleneksel silikatlar, fosfat bazlı camlar ve borat bazlı camlar üretilmiştir. Ancak henüz orijinal 45S5 içeriğinden daha iyi biyolojik özelliklere sahip bir biyoaktif cam bulunamamıştır.²

Fosfat içeren camlar sabit bir oranda bozunduğundan, tüm kullanım süreleri boyunca kontrollü konsantrasyonlarda istenen iyonları salacak şekilde kullanılabilir. Borat bazlı sistemler ise silikat bazlı sistemlere göre daha hızlı ve tamamen hidroksiapatite dönüştüğü için kullanılabilir olarak rapor edilmişlerdir. Ayrıca borat bazlı sistemler ile geleneksel tedavilere yanıt vermeyen diyabetik ülserlerin tedavisinde umut verici sonuçlar elde edilmiştir.^{2,5}

Biyoaktif Camların Özellikleri

Biyoaktif camlar, fizyolojik sıvılara daldırıldığında, çeşitli biyolojik tepkimeleri uyaran ve granüllerin yüzeyinde kemiğin mineral fazına benzer şekilde kemik benzeri bir apatit tabakasının gelişmesini sağlayan materyallerdir.⁶ Oluşan bu hidroksiapatit tabakası biyoaktif cam ile kemik dokusu arasında güçlü bir bağın oluşmasını sağlamaktadır.⁷ Biyoaktif camların insan osteoblastlarının proliferasyonunu ve osteojenik farklılaşmasını indükleyerek *in vitro* osteogenezi uyardığı gösterilmiştir. Bunun yanında, bu mekanizmayı anlamak için yapılan çalışmalar sonucunda biyoaktif camın iyonik çözünme ürünlerinin, osteoblastik hücrelerin birkaç geninin ekspresyonunu uyardığı da gözlemlenmiştir.^{8,9} Ayrıca, biyoaktif camların *in vitro* ve *in vivo* olarak anjiyogenezi uyardığı gösterilmiştir.⁷ Son yıllarda biyoaktif camların sahip olabileceği potansiyel antibakteriyel özelliklere büyük ilgi duyulmaktadır. Biyoaktif camlar ile yapılan çalışmalarda; oral patojenler ve cilt yüzeyinde bulunan patojenlerin tedavisinde sahip olduğu antibakteriyel etki ile umut verici sonuçlar elde edilmiştir.¹⁰ Biyoaktif camların antibakteriyel özelliklerinin mekanizması tam olarak anlaşılmamış olsa da, vücut sıvılarında sodyum iyonlarının protonlarla değişiminitakiben lokal pH'daki artış ve artan ozmotik basınç, prokaryotik hücre duvarlarına potansiyel olarak zarar verebilecek ve böylece bakterileri etkisiz hale getirebilecek "iğne benzeri" keskin cam artıkları gibi sebeplerden kaynaklandığı varsayılmaktadır.^{6,10}

Klinik Uygulamalarda Biyoaktif Camların Kullanımı

Kemik Rejenerasyonunda Biyoaktif Camlar

Dünyada her geçen gün daha fazla insan kemik dokusunu etkileyen hastalıklardan ve travmalardan etkilenmektedir. Özellikle yaşanan nüfusun artması, iyileşmesi zor kemik defektlerine sebep olmakta ve bu tür vakalar cerrahi müdahale gerektirmektedir. Ancak otojen greft dokusunun görece kısıtlı olması ve allogreftlerle karşı oluşan konak immün reaksiyonu gibi dezavantajları vardır. Altın standart olarak kabul edilen otojen greftlerin; enfeksiyon, greft dokusunun sınırlı olması, donör sahasının ağrılı olması gibi dezavantajları araştırmacıları alternatif materyal arayışına itmiştir.^{4,9,11}

Kemiğe hızla bağlanan ve zamanla bozunan, osteoprogenitör hücreleri uyardığı düşünülen çözünür

silika ve kalsiyum iyonlarını serbest bırakan biyoaktif cam kemik rejenerasyonu için iyi bir iskelet görevi görmektedir.¹² Orijinal 45S5 çeşitli çözünme ürünlerinin salınımı yoluyla kemik rejenerasyonunu teşvik edebilmektedir.¹¹ Bunun yanında S53P4, bu bileşimin bir varyasyonudur ve tümörün çıkarılmasından sonra kemik defektlerinin rejenerasyonunda ve osteomyelit tedavisinde başarılı olmuştur.^{11,13} Borden ve ark.¹⁴ biyoaktif cam partiküllerinin şekil ve boyutlarının kemik rejenerasyonuna etkisini inceledikleri bir çalışmada artan yüzey alanı nedeniyle daha küçük parçacıklardan daha hızlı iyon salınımı gösterdiğini bildirmişlerdir.¹⁴

Periodontolojide Biyoaktif Camlar

Periodonsiyumu etkileyen önemli kronik inflamatuvar bir hastalık olan periodontitis, yumuşak doku cepleri, alveolar kemiğin rezorpsiyonu, klinik ataşman seviyesinin kaybı ile karakterizedir.⁴ Daha önce bahsedildiği gibi mükemmel bir kemik greft materyali olan biyoaktif cam periodontal kemik greftlerinin rejenerasyonunda da kullanılmaktadır. Parçacık boyutu 90-710 µm arasında olan PerioGlas® trabeküler kemik üzerindeki hemostatik etkisinden dolayı özellikle interproksimal kemik defektlerinde kemik rejenerasyonunu uyarmak için periodontal cerrahi prosedürlerde yaygın olarak kullanılmıştır ve Bioglass® 45S5 ile aynı formülasyona sahiptir.^{4,15}

Periodontal uygulamalarda epitel hücrelerinin göçünü fiziksel olarak engelleyerek periodontal rejenerasyonu desteklemek amacıyla membranlar kullanılmaktadır. Mota ve ark.¹⁶ biyoaktif cam nanopartiküllerini kullanarak geliştirdikleri bir membran materyalinde; biyoaktif cam ilavesinin membranların mekanik potansiyelini azaltırken biyoaktiviteyi iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Sohrabi ve ark.¹⁷ ise 15 çalışmayı dahil ederek yaptıkları bir meta analizde, kemik içi defektlerin biyoaktif cam ve açık flep operasyonu ile tedavi edilmesinin sonuçlarını karşılaştırmış ve biyoaktif camların periodontal defektlerin tedavisinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

İmplant Diş Hekimliğinde Biyoaktif Camlar

Tek diş restorasyonları, kısmen dişsiz bölgelerin restorasyonları ve tam dişsiz arkların restorasyonları için sıklıkla tercih edilen endosseöz implantlar yay-

gın olarak titanyum veya titanyum alaşımlarından yapılan alloplastik malzemelerdir.¹⁸ Bu malzemeler biyo inert doğasından dolayı genellikle fibröz doku içinde kapsüllendiğinden, implantların ömrünün uzamasını sağlamak için yeni biyomalzemeler geliştirmek önemlidir. Biyoaktif camlar implantların kemiğe aktif olarak bağlanmasına yardımcı olabileceğinden ve antimikrobiyal etkilerinden dolayı yeni biyomalzemelerin geliştirilmesiyle ilgili iyi bir alternatif olabilmektedir.^{4,19}

İmplantlara biyoaktif cam kaplanmasındaki en büyük zorluklardan biri; materyallerin arasındaki termal genleşme katsayılarının farklı olması sebebiyle, soğutma sırasında gerçekleşen büzümeye sonucu biyoaktif cam kaplamasının çatlama olasılığıdır. Diğer bir sebep ise kaplama prosedürleri sırasında biyoaktif camların yapılarının bozulmasıdır.^{4,20} Bu problemleri elimine etmek için üretim sırasında biyoaktif cam kaplamasının çatlamasına veya katmanlara ayrılmasına neden olabilecek büyük termal streslerin oluşmasını önlemek için camın ve metalin termal genleşmesi benzer olması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda termal genleşme katsayıları titanyum alaşımlarınınkinden çok daha büyük olan biyoaktif camların biyoaktif camların SiO₂ içeriğini arttırarak termal genleşme katsayıları düşürülmektedir.²⁰ İmplantların biyoaktif cam ile kaplanmasında birçok yöntem denenmiştir. Bunlardan bazıları; termal püskürtme, emaye kaplama, sol gel yöntemi, elektroforetik biriktirme ve lazer kaplamadır.^{21,22}

Ballo ve ark.²³ yaptıkları bir çalışmada yüzeyi biyoaktif cam ile kaplanmış fiberle güçlendirilmiş kompozit rezinden imal edilen implantların benzer yüzey özelliklerine sahip titanyum implantlara benzer osseointegrasyon sağladığını bildirmişlerdir.

İmplantlar üzerine biyoaktif cam kaplamaları hakkında daha önce birçok klinik çalışma yapılmış olmasına rağmen, klinik deneylerdeki bir sorun, farklı hasta ve uygulamalar nedeniyle sonuçların doğrudan karşılaştırılamamasıdır. *In vitro* testler ise yapımı daha kolay ve maliyeti daha düşük testler olmasına rağmen biyoaktif materyalin çözünme hızı ve apatit oluşumu deney koşullarından etkilenebilmektedir. Bu sebeple bu çalışmalarda bir ISO standardına uyulması şiddetle tavsiye edilmektedir.²¹

Pulpa Kaplaması ve Kök Kanal Tedavisinde Biyoaktif Camlar

Rejeneratif diş hekimliğinde oldukça önemli bir yere sahip olan direkt pulpa kaplama tedavileri, pulpanın canlılığını koruması için önemli bir prosedürdür. Bu amaçla kullanılan pulpa kaplama materyali biyouyumlu olmalıdır ve pulpa hücrelerinin rejeneratif kapasitesini kullanarak dentin köprüsü oluşumunu indüklemelidir. Bu sert doku rejenerasyonunu sağlamak için farklı avantaj ve dezavantajlara sahip çok çeşitli materyaller kullanılmıştır.^{24,25}

Biyoaktif camların bileşenleri ve kristal olmayan bir yapıya sahip olduğu göz önüne alındığında; diğer kristal yapıları biyoseramiklere kıyasla daha iyi biyoaktivite sergileyeceği düşünülmüştür. Wang ve ark.²⁶, nano boyuttaki biyoaktif cam partiküllerinin farelerin sırtına pulpa dokusu ile transplante edildiğinde biyoaktif cam tabakası üzerinde homojen kalınlıkta sürekli dentin benzeri doku tabakası, iyi organize edilmiş bir dentin tübül yapısı ve bunun boyunca hizalanmış polarize odontoblast benzeri hücrelerin oluştuğunu gözlemlemiştir. Long ve ark.²⁴ ise sıçanların 1. maksiller molar dişlerine mekanik olarak kavite açarak yaptıkları bir çalışmada, biyoaktif camdan üretilen 2 farklı kaplama malzemesini test etmişler ve elde edilen sonuçların MTA ile yapılan direkt pulpa kaplaması ile benzer olduğunu bildirmişlerdir. Hanada ve ark.²⁷ ise yeni geliştirilen biyoaktif cam bazlı pulpa kaplama ajanı ile yaptıkları *in vivo* ve *in vitro* çalışmada yeni geliştirilen bu materyalin MTA'ya benzer şekilde biyouyumluluk ve dentin köprüsü oluşumunu indüklemeye kabiliyeti gösterdiğini ve MTA'nın dezavantajlarının üstesinden gelebileceğini göstermiştir.

Mine Remineralizasyonunda Biyoaktif Camlar

Dünya çapında yaygın bir hastalık olan diş çürükleri klinikte mine dokusu kaybının en sık nedeni olarak bilinmektedir, ayrıca erken aşamada kolayca tespit edilebilen ve geri döndürülebilen lezyonlardır.^{28,29} Bu nedenle ilerleyen diş çürükleri için tedavi stratejileri geliştirmek yerine erken dönemde diş çürüklerinin ilerlemesini önlemek için stratejiler gerekmektedir.²⁸

Mine dokusunu remineralize etmek için bir dizi topikal remineralize edici ajan kullanılmıştır. Florür, on yıllardır mine remineralizasyonunda kullanılan en temel ajanlardan biridir.³⁰ Başka bir alternatif olarak ka-

zein fosfopeptid-amorf kalsiyum fosfat (CPP-ACP), çürük lezyonlar üzerinde üstün remineralizasyon potansiyeline sahip stabilize bir Ca-P sistemi olarak bilinmektedir.²⁹ Yapılan çalışmalar CPP-ACP'nin antikaryojenik bir ajan olduğunu göstermiştir.³¹

Biyoaktif camlar, tükürük veya herhangi bir fizyolojik sıvı ile temas ettiğinde apatit oluşumunu indüklemeye konusunda umut vaat etmektedir.³⁰ Ancak biyoaktif materyallerin remineralizasyonu teşvik etme potansiyeline sahip olduğu başarılı bir şekilde kanıtlanmış olsa da, remineralizasyon süreci nicel olarak sınırlı sayıda çalışmada izlenmiştir.³² Gjorgievska ve ark.³³ yaptıkları bir çalışmada demineralize edilmiş mine yüzeyinde biyoaktif cam tortularının bulunduğu sonucuna varmıştır, bu da bunların olası demineralizasyon bölgelerinde remineralizasyon için mevcut bir iyon rezervuarı olarak hareket edebileceğini düşündürmüştür. Mehta ve ark.³⁴ ise CPP-ACP ve biyoaktif camın erken mine çürüklerinin remineralizasyonuna etkisini inceledikleri bir çalışmada, her iki materyalin de remineralizasyonda etkili olduğunu, ancak biyoaktif camın CPP-ACP'ye göre daha etkili olduğunu bildirmişlerdir. Rajendran ve ark.²⁸ ise bir çeşit biyoaktif cam içeren Novamin ile CPP-ACP içeren topikal bir ajanı karşılaştırdıkları çalışmalarında, iki ajanın da remineralize edici potansiyeli olduğunu ancak CPP-ACP'nin, erken mine çürük lezyonlarının remineralizasyonunda daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Dentin Mineralizasyonunda ve Hipersensitivite Tedavisinde Biyoaktif Camlar

Çürük ve erozyon gibi sebeplerle mine ve dentinde mineral kaybı, diş hekimliğinde önemli bir problem olarak bilinmektedir. Minenin %96'sı inorganik içerikten oluşurken, inorganik yapı dentinin %70'ini oluşturur ve kalan %30'u organik içerikten oluşmaktadır. Dentin ve minenin bileşimindeki bu farklılık sebebiyle dentin remineralizasyonu, mine remineralizasyonundan daha zordur.³⁵

Biyoaktif camlar pH'ı yükseltmek ve remineralizasyon için ideal bir ortam yaratmak için sodyum, kalsiyum ve fosfat iyonları yaymaktadır. Dentin tübüllerinin yaklaşık %90'ını kapatarak aşırı duyarlılığı tedavi etmede etkili olan biyoaktif camların, dentin tübüllerini uzun süreli tıkama etkisi düşüktür.³⁶

Mitchell ve ark.³⁷ yaptıkları bir çalışmada, su ve biyoaktif camı karıştırarak dentin yüzeyine doğrudan uygulamış ve dentin yüzeyinde iyi bir örtücülük sağladığı ve mineralizasyon tabakasında yeterli retansiyon olmadığını göstermiştir. Bunun üzerine farklı taşıyıcı alternatiflerinde biyoaktif cam partiküllerinin ilave edilmesinin, dentin tübüllerinden geçen hidrolik iletkenliği azaltmada oldukça etkili olduğunu ve dentin hassasiyetinde azalma sağladığını göstermişlerdir.

Hava Aşındırmasında Biyoaktif Camların Kullanımı

Hava aşındırması (air abrasion), restorasyondan önce dişlerin hazırlanması ve kavitenin şekillendirilmesi için operatif olarak kullanılabilir bir yöntemdir. Bu tekniğin hastalar için ses ve titreşim oluşturması gibi avantajlarının yanında, günümüzde kullanılan adeziv malzemelere uygun olan yuvarlak iç ve kavo yüzey açıları oluşturması gibi avantajları bulunmaktadır.³⁸

Yapılan çalışmalar dentin yüzeyinde tutunan biyoaktif camın remineralizasyona katkı sağladığını ayrıca supragingival ve subgingival bakterilere karşı antibakteriyel aktivitesi olduğunu göstermiştir.³⁸

Spagnuolo ve ark.³⁹ yaptıkları bir çalışmada hava aşındırması için kullanılan biyoaktif cam, çinko polikarboksilat katkılı biyoaktif cam ve alümina partiküllerinin adezyon sitotoksitesite ve odontojenik gen ekspresyonu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Biyoaktif cam ve çinko polikarboksilat katkılı biyoaktif cam partikülleri ile hava aşındırması yapılan grup rezin dentin arayüzünde bağlanma açısından önemli bir fark göstermemişken alümina kullanılan grup ve kontrol grubu arasında önemli bir fark bulunmuştur. Ayrıca pulpa kök hücrelerinin metabolik aktivitesi, test edilen partiküllerden etkilenmemiştir bunun yanında alümina partikülleri, odontojenik belirteçlerin ekspresyonuna müdahale etmiştir.

Dental Adezivlerde Biyoaktif Camların Kullanımı

Dental adezivler, kompozit rezinleri mine ve dentine yapıştırmak için tasarlanmış, şişe sayısından bağımsız olarak, rezin monomerleri, polimerizasyon başlatıcılar, stabilizörler, çözücüler ve bazen inorganik dolgu maddelerinden oluşmaktadırlar.⁴⁰ İyi bir adeziv; mekanik kuvvetlere, kompozitten kaynaklanan büzülme streslerine karşı koymalı ve restorasyon

kenarlarından kaynaklanan sızıntıyı önleyebilmelidir.⁴⁰ Adeziv sistemlerin bağlanma mekanizmasında diş sert dokularından uzaklaştırılan minerallerin, rezin monomerleri ile polimerizasyon sonunda yaptıkları mikro-mekanik kilitlemesi sonucu oluşan tabaka hibrit tabaka olarak adlandırılır.⁴¹ Hibrit tabakanın bozulması, yapıştırıcının demineralize kollajen ağına zayıf penetrasyonundan ve ardından matris metaloproteazlar (MMP'ler) tarafından enzimatik bozulmadan kaynaklanabilmektedir ve son on yılda bunu engellemek için birçok çalışma yapılmıştır.^{42,43} Yapılan çalışmalardan bazıları, dental adezivlere amorf kalsiyum fosfat, biyoaktif cam ve hidroksiapatit eklenmesidir.⁴³

Oltramare ve ark.⁴² yaptıkları bir çalışmada, biyoaktif cam ile modifiye ettikleri adezivlerin uzun ve kısa vadede bağlanma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Aşındırma ve durulama yapılan adezivlerin, dentin bağlanma güçleri üzerinde olumsuz bir etki olmadan, %5 ve %10 oranında nano boyutlu biyoaktif cam ile işlevselleştirilebileceği gösterilmiştir. Ancak Self-etch adezivlere biyoaktif camın eklenmesi, tüm biyoaktif cam konsantrasyonları için performansını önemli ölçüde azaltmış olsa da, 6 aylık yaşlandırma periyodu boyunca stabil dentin bağlanma kuvvetinin korunması açısından faydalı bir etki tespit edilmiştir.

Restoratif Materyallerde Biyoaktif Camların Kullanımı

Dental işlemlerde kullanılan cam iyonomer siman, rezin modifiye cam iyonomer siman, fissür örtücü, dental kompozit gibi restoratif materyaller fonksiyon ve estetiği karşılayabilir ancak biyoaktif özelliklerden yoksundur.⁴

Cam iyonomer simanların ek bir bonding ajan olmadan diş boşluklarına yerleştirilebilmeleri, florür salma özellikleri ve nispeten biyouyumlu olmaları gibi avantajları vardır. Ancak cam iyonomer simanların mekanik özelliklerini geliştirmek ve biyoaktif özellik kazandırmak için çalışmalar yapılmaktadır.⁴⁴ Yli-Urpo ve ark.⁴⁵ yaptıkları bir çalışmada cam iyonomer siman tozuna ilave edilen biyoaktif cam miktarı arttıkça malzemenin basınç dayanımının azaldığını belirtmiştir. Ancak biyoaktif cam içeren cam iyonomer simanda daha fazla kalsiyum elementi tespit etmişler ve biyoaktivitenin yararlı olabileceği, yüksek basınç dayanımının gerekli olmadığı bölgelerin restorasyonunda kullanılabileceğini bildirmişlerdir.⁴⁵ Prabhakar

ve ark.⁴⁴ da biyoaktif cam içeren cam iyonomer simanların remineralizasyon özelliğinin arttığını, Yli-Urpo ve ark.⁴⁵ belirttiği sonuçlara paralel olarak biyoaktif camın materyalin mekanik özelliklerini tehlikeye attığını bildirmişlerdir.

Rezin modifiye cam iyonomer simanlar ise, cam iyonomer simanların mine ve dentine zayıf bağlanması, sertleşmenin ilk aşamasında tükürük ile temasının mekanik özelliklerini olumsuz etkilemesi gibi dezavantajları sebebiyle cam iyonomer simanın suda çözünen resin ile modifiye edilmesi sonucu geliştirilmişlerdir.⁴⁴ Vicente ve ark.⁴⁶ ortodontik tedavide braketlerin yapıştırılması için biyoaktif cam ilave edilmiş resin modifiye cam iyonomer siman kullanmış ve materyalin hem asit hem de nötr ortamda önemli miktarlarda florür iyonu saldırdığını ve biyouyumluluğunun geleneksel resin kompozit yapıştırıcılardan daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Valanezhad ve ark.⁴⁷ resin modifiye cam iyonomer simana %3-5 oranında biyoaktif cam ilavesinin eğilme mukavemetini iyileştirdiğini gözlemlemiştir. 28 gün tamponlanmış fosfat çözeltisinde bekletilen örneklerin ise eğilme mukavemeti azalmıştır. Biyoaktif cam konsantrasyonunun hücre büyümesini arttırdığı gözlemlenmiş ve biyoaktif cam içeren resin modifiye cam iyonomer simanların klinik olarak kullanım potansiyelleri olduğu belirtilmiştir.

Rezin bazlı kompozitler, civa emisyonlarının olmaması, kabul edilebilir fiziksel, mekanik ve estetik özellikleri nedeniyle posterior dişlerde amalgam restorasyonlara kıyasla yaygın olarak tercih edilen materyallerdir.⁴⁸ Odermatt ve ark.⁴⁹ akışkan kompozit resin içine farklı miktarlarda mikro ve nano boyutlu biyoaktif cam ilave etmiş ve fiziko-kimyasal özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda biyoaktif cam parçacıklarının nano boyuta küçültülmesinin, deneysel kompozitlerin hidroksiapatit oluşturma potansiyeli, dönüşüm dereceleri ve mikrosertlik üzerinde herhangi bir olumsuz etki olmaksızın bu özellikleri iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Khvostenko ve ark.⁵⁰ ise biyoaktif cam içeren kompozitlerin ticari olarak temin edilebilen kompozitler ile mekanik özelliklerini karşılaştırmış biyoaktif cam içeren kompozitlerin yeterli ve kararlı mekanik özelliklere sahip olduğunu belirtmiştir. Yaptığımız bir pilot çalışmada farklı oranlarda biyoaktif cam içeren resin simanların mekanik özellikleri değerlendirilmiş ve yeterli mekanik özelliklere sahip malzemeler elde edilmiştir.

SONUÇ

Yüzey reaktif cam seramik bir malzeme olan biyoaktif camlar fizyolojik sıvılarla temas ettiğinde kemiğin mineral fazına benzer şekilde kemik benzeri bir apatit tabakasının oluşmasını sağlayan materyallerdir. Ayrıca biyoaktif camların *in vitro* osteogenezi uyardığı ve antibakteriyel özelliklerinin olduğu da gösterilmiştir. Biyoaktif camların diş hekimliğinde; dental cerrahi, implant diş hekimliğinde yüzey kaplama materyali, dentin hassasiyeti, mine remineralizasyonu, restoratif materyallerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gibi birçok alanda kullanımı gittikçe artmaktadır. Gelecek vaat eden bu materyallerin *in vitro* testlerinin yanında klinik testlerinin de yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Hench LL. The story of Bioglass®. J Mater Sci Mater Med 2006;17:967-78.
2. Jones JR. Review of bioactive glass: From Hench to hybrids. Acta Biomater 2013;9:4457-86.
3. Montazerian M, Zanotto ED. A guided walk through Larry Hench's monumental discoveries. J Mater Sci 2017;52:8695-732.
4. Skallevoid HE, Rokaya D, Khurshid Z, Zafar MS. Bioactive glass applications in dentistry. Int J Mol Sci 2019;20:1-24.
5. Ylänen H. Bioactive Glasses Materials, Properties and Applications. 2nd ed. Woodhead Publishing; Sawston, UK; 2018. p.1-25.
6. Drago L, Toscano M, Bottagisio M. Recent Evidence on Bioactive Glass Antimicrobial and Antibiofilm Activity: A Mini-Review. Mater 2018;11:326.
7. Hoppe A, Güldal NS, Boccaccini AR. A review of the biological response to ionic dissolution products from bioactive glasses and glass-ceramics. Biomaterials 2011;32:2757-74.
8. Xynos, Ioannis D, Edgar, A. J., Buttery, L. D, Hench, L. L, & Polak, J. M. Gene-expression profiling of human osteoblasts following treatment with the ionic products of Bioglass® 45S5 dissolution. J Biomed Mater Res 2001;55:151-7.
9. Xynos ID, Hukkanen MVJ, Batten JJ, Buttery LD, Hench LL, Polak JM. Bioglass®45S5 Stimulates Osteoblast Turnover and Enhances Bone Formation In Vitro: Implications and Applications for Bone Tissue Engineering Calcif Tissue Int 2000;67:321-9.
10. Begum S, Johnson WE, Worthington T, Martin RA. The influence of pH and fluid dynamics on the antibacterial efficacy of 45S5 Bioglass. Biomed Mater 2016 2;11:015006.
11. Shi X, Nommeots-Nomm A, Todd NM, Devlin-Mullin A, Geng H, Lee PD, et al. Bioactive glass scaffold architectures regulate patterning of bone regeneration *in vivo*. Appl Mater Today 2020;20:100770.

12. Jones JR, Lin S, Yue S, Lee PD, Hanna J V., Smith ME, et al. Bioactive glass scaffolds for bone regeneration and their hierarchical characterisation. *Proc Inst Mech Eng Part H J Eng Med* 2010;224:1373–87.
13. Lindfors NC, Hyvönen P, Nyyssönen M, Kirjavainen M, Kankare J, Gullichsen E, et al. Bioactive glass S53P4 as bone graft substitute in treatment of osteomyelitis. *Bone* 2010;47:212–8.
14. Borden M, Westerlund LE, Lovric V, Walsh W. Controlling the bone regeneration properties of bioactive glass: Effect of particle shape and size. *J Biomed Mater Res Part B Appl Biomater* 2022;110:910–22.
15. Lovelace, T. B., Mellonig, J. T., Meffert, R. M., Jones, A. A., Nummikoski, P. V., & Cochran, D. L. Clinical Evaluation of Bioactive Glass in the Treatment of Periodontal Osseous Defects in Humans. *J Periodontol* 1998;69:1027–35.
16. Mota J, Yu N, Caridade SG, Luz GM, Gomes ME, Reis RL, et al. Chitosan/bioactive glass nanoparticle composite membranes for periodontal regeneration. *Acta Biomater* 2012;8:4173–80.
17. Sohrabi K, Saraiya V, Laage TA, Harris M, Blieden M, Karimbux N. An Evaluation of Bioactive Glass in the Treatment of Periodontal Defects: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Clinical Trials. *J Periodontol* 2012;83:453–64.
18. Kate MA, Palaskar S, Kapoor P. Implant failure: A dentist's nightmare. *J. Dent. Implant* 2017;6:51.
19. Mistry S, Kundu D, Datta S, Basu D. Comparison of bioactive glass coated and hydroxyapatite coated titanium dental implants in the human jaw bone. *Aust Dent J* 2011;56:68–75.
20. Lopez-Esteban S, Saiz E, Fujino S, Oku T, Suganuma K, Tomsia AP. Bioactive glass coatings for orthopedic metallic implants. *J Eur Ceram Soc* 2003;23:2921–30.
21. Oliver J anne N, Su Y, Lu X, Kuo PH, Du J, Zhu D. Bioactive glass coatings on metallic implants for biomedical applications. *Bioact Mater* 2019;4:261–70.
22. Sergi R, Bellucci D, Cannillo V. A Comprehensive Review of Bioactive Glass Coatings: State of the Art, Challenges and Future Perspectives. *Coatings* 2020;10:757.
23. Ballo A. M, Cekic-Nagas I, Ergun G, Lassila, L, Palmquist, A, Borchardt P, Närhi, T. O. Osseointegration of fiber-reinforced composite implants: histological and ultrastructural observations. *Dent Mater* 2014;30:384-95.
24. Long Y, Liu S, Zhu L, Liang Q, Chen X, Dong Y. Evaluation of Pulp Response to Novel Bioactive Glass Pulp Capping Materials. *J Endod* 2017;43:1647–50.
25. Davaie S, Hooshmand T, Ansarifard S. Different types of bioceramics as dental pulp capping materials: A systematic review. *Ceram Int* 2021;47:20781–92.
26. Wang S, Gao X, Gong W, Zhang Z, Chen X, Dong Y. Odontogenic differentiation and dentin formation of dental pulp cells under nanobioactive glass induction. *Acta Biomater* 2014;10:2792–803.
27. Hanada K, Morotomi T, Washio A, Yada N, Matsuo K, Teshima H, et al. In vitro and *in vivo* effects of a novel bioactive glass-based cement used as a direct pulp capping agent. *J Biomed Mater Res Part B Appl Biomater* 2019;107:161–8.
28. Rajendran R, Kunjusankaran RN, Sandhya R, Anilkumar A, Santhosh R, Patil SR. Comparative Evaluation of Remineralizing Potential of a Paste Containing Bioactive Glass and a Topical Cream Containing Casein Phosphopeptide-Amorphous Calcium Phosphate: An *in Vitro* Study. *Pesqui Bras Odontopediatria Clin Integr* 2019;19:4668.
29. Dai LL, Mei ML, Chu CH, Lo ECM. Mechanisms of Bioactive Glass on Caries Management: A Review. *Mater* 2019;12:4183.
30. Taha AA, Patel MP, Hill RG, Fleming PS. The effect of bioactive glasses on enamel remineralization: A systematic review. *J Dent* 2017;67:9–17.
31. Reynolds EC, Cai F, Shen P, Walker GD. Retention in plaque and remineralization of enamel lesions by various forms of calcium in a mouthrinse or sugar-free chewing gum. *J Dent Res* 2003;82:206–11.
32. Soares R, Ataide IDN De, Fernandes M, Lambor R. Assessment of Enamel Remineralisation After Treatment with Four Different Remineralising Agents: A Scanning Electron Microscopy (SEM) Study. *J Clin Diagn Res* 2017;11:ZC136.
33. Gjorgjevska E, Nicholson JW. Prevention of enamel demineralization after tooth bleaching by bioactive glass incorporated into toothpaste. *Aust Dent J* 2011;56:193–200.
34. Mehta AB, Kumari V, Jose R, Izadikhah V. Remineralization potential of bioactive glass and casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate on initial carious lesion: An in-vitro pH-cycling study. *J Conserv Dent* 2014;17:3.
35. Fernando D, Attik N, Pradelle-Plasse N, Jackson P, Grosogogeat B, Colon P. Bioactive glass for dentin remineralization: A systematic review. *Mater Sci Eng C* 2017;76:1369–77.
36. Jung JH, Park SB, Yoo KH, Yoon SY, Bae MK, Lee DJ, et al. Effect of different sizes of bioactive glass-coated mesoporous silica nanoparticles on dentinal tubule occlusion and mineralization. *Clin Oral Investig* 2019;23:2129–41.
37. Mitchell JC, Musanje L, Ferracane JL. Biomimetic dentin desensitizer based on nano-structured bioactive glass. *Dent Mater* 2011;27:386–93.
38. Paolinelis G, Banerjee A, Watson TF. An *in vitro* investigation of the effect and retention of bioactive glass air-abrasive on sound and carious dentine. *J Dent* 2008;36:214–8.
39. Spagnuolo G, Pires PM, Calarco A, Peluso G, Banerjee A, Rengo S, et al. An in-vitro study investigating the effect of air-abrasion bioactive glasses on dental adhesion, cytotoxicity and odontogenic gene expression. *Dent Mater* 2021;37:1734–50.
40. Van Landuyt KL, Snauwaert J, De Munck J, Peumans M, Yoshida Y, Poitevin A, et al. Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. *Biomaterials* 2007;28:3757–85.

41. Yoshida Y, Inoue S. Chemical analyses in dental adhesive technology. *Jpn Dent Sci Rev* 2012;48:141–52.
42. Oltramare R, Par M, Mohn D, Wiedemeier DB, Attin T, Tauböck TT. Short- and Long-Term Dentin Bond Strength of Bioactive Glass-Modified Dental Adhesives. *Nanomater* 2021;11:1894.
43. Rizk M, Hohlfeld L, Thanh LT, Biehl R, Lühmann N, Mohn D, et al. Bioactivity and properties of a dental adhesive functionalized with polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) and bioactive glass. *Dent Mater* 2017;33:1056–65.
44. Prabhakar A, M JP, Basappa N. Comparative Evaluation of the Remineralizing Effects and Surface Micro hardness of Glass Ionomer Cements Containing Bioactive Glass (S53P4):An *in vitro* Study. *Int J Clin Pediatr Dent* 2010;3:69.
45. Yli-Urpo H, Lassila LVJ, Närhi T, Vallittu PK. Compressive strength and surface characterization of glass ionomer cements modified by particles of bioactive glass. *Dent Mater* 2005;21:201–9.
46. Vicente A, Rodríguez-Lozano FJ, Martínez-Beneyto Y, Jaimez M, Guerrero-Gironés J, Ortiz-Ruiz AJ, et al. Biophysical and Fluoride Release Properties of a Resin Modified Glass Ionomer Cement Enriched with Bioactive Glasses. *Symmetry* 2021;13:494.
47. Valanezhad A, Odatsu T, Udoh K, Shiraishi T, Sawase T, Watanabe I. Modification of resin modified glass ionomer cement by addition of bioactive glass nanoparticles. *J Mater Sci Mater Med* 2016;27:1–9.
48. Tiskaya M, Shahid S, Gillam D, Hill R. The use of bioactive glass (BAG) in dental composites: A critical review. *Dent Mater* 2021;37:296–310.
49. Odermatt R, Par M, Mohn D, Wiedemeier DB, Attin T, Tauböck TT. Bioactivity and Physico-Chemical Properties of Dental Composites Functionalized with Nano- vs. Micro-Sized Bioactive Glass. *J Clin Med* 2020;9:772.
50. Khvostenko D, Mitchell JC, Hilton TJ, Ferracane JL, Kruzic JJ. Mechanical performance of novel bioactive glass containing dental restorative composites. *Dent Mater* 2013;29:1139–48.