

Kompozit Rezinlerde Güncel Gelişmeler

Recent Developments in Composite Resins

Hacer BALKAYA^a, Halime ÇETİNER^a, Sezer DEMİRBUĞA^a

^aErciyes Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, Kayseri, Türkiye

^aErciyes University, Faculty of Dentistry, Department of Restorative Dentistry, Kayseri, Türkiye

ÖZ

Amalgama alternatif olarak üretilen ve uzun yıllardan beri dolgu materyali olarak kullanılan kompozit rezinler, formülasyonlarındaki değişiklikler sayesinde geliştirilen fiziksel özellikleri, diş sert dokularına adezyonları, geniş renk skalasına sahip olmaları sayesinde yüksek estetik görünümleri, civa içermemeleri, ısı iletkenliklerinin düşük olması, konservatif kavite preperasyonuna izin vermeleri, çürük temizlendikten sonra geriye kalan diş dokularını desteklemeleri, restorasyonun tek seansta bitirilebilmesi, porselen ve altın restorasyonlara oranla daha ekonomik olmaları gibi pek çok avantaja sahiptirler. Tüm bu avantajlarının yanı sıra bu materyallerin uygulamalarının teknik hassasiyet gerektirmesi, ısıl genişleme katsayılarının yüksek olması, elastisite modüllerinin düşük olması, polimerizasyon büzülmesi göstermeleri, streslerin yoğun olduğu bölgelerde aşınmaya karşı dirençlerinin düşük olması ve artık monomer kalma ihtimali gibi bazı olumsuz özellikleri de mevcuttur. Son yıllarda üretici firmalar kompozit rezinlerin bu olumsuz özelliklerinin üstesinden gelebilmek amacıyla materyal içeriğinde çeşitli modifikasyonlar yapmıştır. Kompozit rezin materyallerdeki organik matriks içeriğinin değiştirilmesi, nanopartikül ve biyoaktif materyallerin eklenmesi, adezyon özelliklerinin geliştirilmesi, polimerizasyon sistemlerinin değiştirilmesi, biyomimetik diş hekimliği ve doku mühendisliğindeki gelişmeler neticesinde "akıllı materyaller" üretilmesi bu amaçla yapılan bazı modifikasyonlardır. Bu derlemenin amacı kompozit materyaller ile ilgili mevcut literatürü pekiştirmek ve son gelişmeleri özetlemektir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit rezin, Bulk-fill kompozit, Fiberle güçlendirilmiş kompozit, Nanoteknoloji, Universal kompozit

ABSTRACT

Composite resins, which are produced as an alternative to dental amalgam and have been used as filling materials for many years, have an indisputable superiority with their improved physical properties through changes in their formulations, adhesion to tooth hard tissues, high aesthetic appearances with a wide range of colors, mercury-free, having low thermal conductivity, allowing conservative cavity preparation, supporting the remaining tooth tissues after caries removal, completing the restoration in a single session, and being more economical compared to porcelain and gold restorations. In addition to all these advantages, these materials also have some negative properties such as requiring technical precision in their applications, high coefficient of thermal expansion, low modulus of elasticity, exhibiting polymerization shrinkage, low resistance to wear in areas with intense stresses, and the possibility of residual monomer remaining. In recent years, manufacturers have made various modifications to overcome these negative properties of composite resins. Some modifications made for this purpose include changing the organic matrix content in composite resin materials, adding nanoparticles and bioactive materials, improving adhesion properties, changing polymerization systems, and producing "smart materials" as a result of developments in biomimetic dentistry and tissue engineering. The purpose of this review is to strengthen the existing literature on composite materials and summarize the latest developments.

Keywords: Composite resin, Bulk-fill composite, Fiber-reinforced composite, Nanotechnology, Universal composite

KOMPOZİT REZİNLER

Genel anlamda hem organik hem de inorganik maddeleri içeren dolgu maddelerine birleşik anlamına gelen 'kompozit' adı verilmiştir.¹ Amalgama alternatif olarak üretilen ve uzun yıllardan beri dolgu materyali olarak kullanılan kompozit rezinler, formülasyonlarındaki değişiklikler sayesinde geliştirilen fiziksel özellikleri, diş sert dokularına adezyonları ve geniş renk skalasına sahip estetik görünümleri ile tartışılmaz üstünlüğe sahiptirler.²

Kompozit rezinler 3 temel yapıdan oluşmaktadır. Bunlar;

I-Organik Yapı: Kompozit rezinler organik matriksin yapısına göre metil metakrilat matriksli olanlar ve Bis-GMA matriksli olanlar olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.³

II-Inorganik Yapı: Kompozit rezinlerin yapısında bulunan inorganik yapı, matriks içine dağılmış olan çeşitli şekil ve büyüklükteki kuartz, borosilikat cam, lityum alüminyum silikat, stronsiyum, baryum, çinko ve yitrium cam, baryum alüminyum silikat gibi inorganik doldurucu partiküllerden oluşur.⁴

III-Ara bağlayıcılar: Kompozit rezinlerde inorganik ve organik komponentleri birbirine bağlayan yapı, organik silisyum bileşikler olup bunlara 'silan' adı verilmektedir.¹

Genel olarak ideal bir dolgu maddesi; mekanik etkilere karşı dirençli, kavite duvarlarına adaptasyonu iyi, ısı iletkenliği az, porozitesi azaltılmış, canlı dokularla biyolojik olarak uyumlu, hazırlanması ve uygulanması kolay, özellikle ön grup dişler için estetik olarak uyumlu

olmalı, radyopak doldurucu içermeli, ağız içinde hacim ve şekil değişikliğine uğramamalı, maliyeti az, raf ömrü uzun olmalı, mine-dentin bonding ajanlarıyla uyumlu olmalı, bitirme ve polisaj işlemleri iyi ve kalıcı olmalıdır.²

Diş renginde, estetik materyaller olan kompozit rezinler civa içermedikleri için toksik değildirler, ısı iletkenlikleri düşüktür, diş dokularına bağlanabilme yetenekleri vardır, kenar sızıntıları azalmıştır, konservatif kavite preperasyonu için uygundur, çürük temizlendikten sonra geriye kalan diş dokularını destekler, restorasyon tek seansta bitirilebilir, porselen ve altın restorasyonlara oranla daha ekonomiktirler.⁴ Kompozit rezinlerin bu olumlu özelliklerinin yanı sıra olumsuz özellikleri de mevcuttur. Bunlar; uygulanışları kolay değildir, özel bir yetenek ve deneyim gerektirirler, ısıl genişleme katsayıları yüksektir, elastisite modülleri düşüktür, biyolojik uyumluluğu tartışmalıdır, polimerizasyona bağlı büzülme gösterirler, streslerin yoğun olduğu bölgelerde aşınmaya karşı dirençleri düşüktür, restorasyon ömrü sınırlıdır.⁴ Kompozit rezinlerin mevcut dezavantajlarını gidermek, mekanik ve kimyasal özelliklerini geliştirmek amacıyla geçmişten günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte farklı materyaller geliştirilmiştir.

Bis-GMA ve UDMA'nın İkamesi Olarak Yeni Diakrilat Monomerlerinin Geliştirilmesi

Metakrilik monomer bileşimleri sıklıkla çok fonksiyonlu radikal metakrilatlar içerir.⁵ Tipik olarak bu çok fonksiyonlu metakrilat bileşimleri, Bisfenol A diglisidil metakrilat (Bis-GMA) veya

dimetakriloksietil 2,2,4-trimetilheksametilen diüretan (UDMA) bazlıdır.⁶ Bis-GMA, metakrilik asit ve bisfenol A diglisidil eterden türetilen bir diesterdir.⁷ İki polimerize edilebilir grup taşıyan Bis-GMA çapraz bağlı bir polimer oluşturmaya eğilimlidir.⁵ Bununla birlikte Bis-GMA'nın kullanımı, temel ürünlerinden biri olan bisfenol A'nın endokrin fonksiyonu bozucu etkisi olması nedeniyle bir sorun teşkil etmektedir.^{8, 9} Ek olarak Bis-GMA'nın viskozitesinin yüksek olması nedeniyle trietilen glikol dimetakrilat (TEGDMA) gibi düşük viskoziteli bir monomer; kompozit rezinlerin içerisine her zaman dahil edilmelidir.⁵ Bununla birlikte rezin içeriğine TEGDMA'nın fazla eklenmesi, polimerizasyon büzülmesinin ve su emiliminin artmasına ve mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olur.¹⁰

Yoshinaga ve ark. iyi mekanik özelliklere sahip sertleşmiş ürünler elde etmek için dental akrilik monomerler geliştirmişlerdir.⁵ Bis-GMA ve UDMA'nın yerini alacak metakrilik monomer süstituentleri olarak bu çalışmada beş üretan akrilik monomeri sentezlenmiştir.⁵ Bu çalışmada sentezlenen üretan diakrilatlardan TMXDI-HEA, TMXDI HPA, XDI-HPA ve NBDI-HEA içeren kürlenmiş rezin, UDMA'ya kıyasla daha yüksek mekanik özellikler sergilemiştir. Akrilat monomerlerin metakrilat monomerlere kıyasla yüksek toksisitesi endişe verici olsa da, yüksek mekanik özelliklere sahip olmaları ve ağız dışında kürlenmesinin monomer toksisitesini azaltması nedeniyle bu üretan akrilatların özellikle hibrit rezin bloklarda kullanımı daha uygun olabilir.⁵

Dental Restoratif Materyallerde Matris Olarak Kullanım İçin Yeni Üretan-Dimetakrilat Monomerleri ve Bileşimleri

Barszczewska-Rybarek ve ark. yaptıkları bir çalışmada, bir ila üç oksietilen grubu içeren 1,3-bis(1-izosiyanoato-1-metiletil) benzen (MEBDI) ve oligoetilen glikoller monometakrilatlardan yeni üretan-dimetakrilat monomerleri sentezlemiştir.¹¹ MEBDI bazlı üretan-dimetakrilatların TEGDMA ile kombinasyonu, yüksek derece monomer dönüşüm derecesine, düşük polimerizasyon büzülmesine, düşük su emme ve suda çözünürlüğe ve iyi mekanik özelliklere sahip kopolimerlerin elde edilmesini sağlamıştır.

Östrojeniteyi Önlemek İçin Bis-GMA İçermeyen Biyopolimerin Geliştirilmesi

Jun ve ark. yeni bir izosorbit türevi biyomonomer ailesi sentezlemişve östrojenite riski olmadan geleneksel Bis-GMA bazlı bir malzemeyle karşılaştırılabilir fiziko-mekanik ve biyolojik özellikler sergileyen bir dental kompozit matrisi olarak kullanılabilmesini deneysel olarak göstermiştir.¹² ISDB bazlı dental kompozitler ticari kompozitlere benzer şekilde polimerizasyon derinliği, Vickers sertliği, basınç dayanımı/modülü, su emme/çözünürlük ve yüzey pürüzsüzlüğü sergilemiştir. Ayrıca, bu materyaller dental kompozitler ve polimer bazlı restoratif malzemeler için ISO standardını karşılamıştır. Bir ekstrakt kullanılarak yapılan sitotoksikite testlerinde, hücrelerde deneysel ISDB bazlı materyaller ve ticari bir Bis-GMA içeren kontrol grubu arasında hücrelerde karşılaştırılabilir bir canlılık oranı gösterilmiştir.

Sürekli Antibakteriyel Etkiye Sahip Quaterner Amonyum Bileşikleri İçeren Dental Restoratif Materyaller

Son yıllarda kompozit rezinlerin geliştirilmesi adına yapılan çalışmalar, antibakteriyel mikropartiküller içeren materyalleri kapsamaktadır.¹³ Bir antibakteriyel madde olan Quaterner Amonyum; inorganik silika ile birleştirilerek elde edilen bileşim (QASi); laboratuvar ortamında ve insanlar üzerinde incelenmiştir. QASi içeren dental restoratif materyaller, uzun süreli antibakteriyel özelliklere ve hâlihazırda pazarlanan materyallerle karşılaştırılabilir mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca bu materyaller ABD Gıda ve İlaç İdaresi tarafından onaylanmıştır. Klinik çalışmalar QASi içeren kompozitlerin, restorasyonların etrafındaki çürük oluşumunu belirgin şekilde azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

CQ Bazlı Sistemlerde Yüksek Performanslı Yardımcı Başlatıcılar Olarak Sülfonatlar ve Sülfonatların Kullanımı

Kirschner ve ark. yaptıkları çalışmada, dental metakrilat rezinlerin mavi ışık altında polimerizasyonu için amin içermeyen fotobazlatıcı sistemler (PIS'ler) geliştirmişlerdir.¹⁴ Artmış polimerizasyon derecesi ile mükemmel mekanik özelliklere ve olağanüstü renk stabilitesine sahip dental kompozitler elde edilebileceği öne sürülmüştür. Önerilen yeni aminsiz sistemlerle, CQ/amin referans sistemi ile benzer veya daha iyi performanslar ve ağartma özellikleri elde edilmiştir.

Dinorbornyl Ether Bisphenol A / Triallyl Triazine Trione (TMES-DNBPA/TATATO), Tetramercaptoethyl Silane-Trinorbornyl Triazine Trione / Triallyl Triazine Trione (TMES-TNTATO/TATATO) Katkılı Yeni Prototip Dental Kompozitler

Çağdaş kompozit dental restoratif materyallerin polimerik bileşeninin parçalanması; restorasyon ömrünü tehlikeye atarken, bu materyallerden sızabilen bileşiklerin hücresel sonuçları da bulunmaktadır. Bu nedenle yeni nesil kompozit rezinlerin daha uzun bir ömüre sahip olacak şekilde tasarlanması ve bu materyallerden salınan herhangi bir bileşiğin hücreler üzerinde toksik etkisinin olmaması gerekmektedir.¹⁵ Van der Laan ve ark. düşük büzülme gerilimi sergileyen çapraz bağlı polimerik rezinler elde etmek için eş zamanlı tiyolene bazlı polimerizasyon ve allil sülfid bazlı zincir transfer reaksiyonu geliştirmişler ve yeni prototip kompozitler elde etmişlerdir.¹⁵ Geçmişte kompozit rezinlerde doldurucu olarak çoğunlukla biyolojik olarak inert olan cam kullanılırken; prototip kompozitlerin birçoğuna mine kristallerine benzeyen ve biyoaktif olan florapatit (FA) kristalleri eklenmiştir. Tüm prototip kompozit rezinlerde, BisGMA/TEGDMA bazlı kompozitle karşılaştırıldığında, BisGMA/TEGDMA+camla doldurulmuş prototip kompozitlersertlik derecesinde artış görülmüştür. Yalnızca cam doldurucu prototip kompozitlerin diğer mekanik özellikleri BisGMA/TEGDMA bazlı kompozitle karşılaştırılabilir düzeyde bulunmuştur. Kompozit rezin içeriğine FA ilavesi, prototipin ve bisGMA/TEGDMA kompozitinin mekanik özelliklerini zayıflatmıştır.

Metal İyonu Salan Biyoaktif Cam (BAG) İçeren Kompozitler

Biyoaktif cam (BAG); son zamanlarda tıp ve diş hekimliğinde kemik oluşumunu uyarma, diş hassasiyeti, beyaz nokta lezyonlarının remineralizasyon tedavisi ve dişlerin restorasyonu dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için önerilen benzersiz bir malzemedir.¹⁶⁻¹⁹ Aponso ve ark. yaptıkları çalışmada optimize edilmiş BAG-rezin kompozitin yalnızca rezin içeren kompozitlere kıyasla biyofilm büyümesini önemli ölçüde engellediğini göstermişlerdir.²⁰

BAG'ın, metal iyonlarını salabilmesi ve oral biyofilmlerin oluşumunu engellemesi nedeniyle dental kompozit rezinlere eklenmesi önerilmiştir.²⁰

Activa BioActive Restorative

Yeni bir tür biyoaktif rezin bazlı kompozit (ACTIVA-Restorative, Pulpdent, Watertown, MA, ABD) 2013 yılında dünya çapında piyasaya sürülmüştür.²¹ Bu yeni ürün, rezin ile modifiye edilmiş cam iyonomerlere eşdeğer kabul edilmektedir.²² Bu biyoaktif rezin bazlı kompozit, cam partikülleri ve poliasit bileşenlerini içeren cam iyonomerin gösterdiği asit-baz sertleşme reaksiyonunun yanı sıra hem ışıqla hem de kimyasal polimerizasyon kabiliyetine sahip olan biyoaktif iyonik bir rezin matrisi içermektedir.²² Dolayısıyla ACTIVA üç tip sertleştirme mekanizmasına sahiptir.²³ Üreticiye göre bu restoratif materyal, doğal dişlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini taklit eden bir iyonik rezin matrisi ve biyoaktif dolgu maddeleri içeren ilk biyoaktif dental materyaldir.²² Ayrıca ACTIVA'nın cam iyonomerlerden daha fazla florür iyonu salımına sahip olduğu iddia edilmiştir.²²

Biounion Dolgu Materyalinden Asidite Kaynaklı Çinko İyonu Salınımı ve Streptococcus Mutans'a Karşı İnhibe Edici Etkileri

Liu ve ark. yaptığı çalışmaya göre, restoratif malzemelere dahil edilen BioUnion dolgu materyali yeni bir biyo-fonksiyonel cam tozudur.²⁴ BioUnion dolgu materyalinin en benzersiz işlevi asidik ortamlarda Zn²⁺ salma yeteneğidir. BioUnion dolgu materyallerinden asetik asitli ortamda salınan Zn²⁺ konsantrasyonları, sulu ortamda salınanlara göre daha fazla bulunmuştur. BioUnion dolgu materyalinin S. mutans inhibisyonu kapasitesi, sakkaroz ilavesine yanıt olarak süspansiyon pH'ındaki düşüğe paralel olacak şekilde sakkarozsuz ortama göre daha fazla bulunmuştur. Asit maruziyeti BioUnion dolgu materyallerinden

Zn²⁺ salınımını arttırmıştır. Bununla birlikte bu materyalin asitlere tekrar tekrar maruziyeti sonrasında S. mutans'a karşı inhibe edici etkilere sahip olduğu gösterilmiştir.

Monovinil Akrilat Rezin Monomeri, 2-(fenil amino formaldehit bazlı oksijen etil metakrilat) BOCNA

Zhang ve ark. geleneksel ışıqla sertleşen kompozit rezinleri sentezlemek için kullanılan TEGDMA seyrelticiyi yeni bir BOCNA seyreltici ile değiştirmiştir.²⁵ Önerilen ışıqla sertleşen kompozit rezinin özellikleri geleneksel rezinin yanı sıra üç ticari rezin kompozitin (Tetric N-Ceram, Neofil ve Gradia Direct) özellikleriyle karşılaştırılmıştır. BOCNA ile sentezlenen rezin, geleneksel rezine kıyasla daha az büzülme, daha düşük çekme gerilimi ve eşit derecede güçlü mekanik özellikler sergilemiştir. Bunun nedeni BOCNA monomerinin C=C çift bağına sahip tek bir fonksiyonel grubu varken TEGDMA monomerinin ek bir fonksiyonel grubu olmasıdır.

Self Adeziv Bulk-Fill Kompozitler

Son zamanlarda iddia edilen florür salma ve "bulk-fill" özelliklerine sahip bazı yeni self adeziv rezinli malzemeler "biyoaktif malzemeler" veya "akıllı malzemeler" olarak tanımlanmıştır. Bu malzemeler kimyasal bileşim açısından cam iyonomer ailesinden farklı olmakla birlikte bu materyallere alternatif olabilirler.²⁶ Activa BioActive Restorative (Pulpdent Corp., Watertown, MA, ABD, 2013'te piyasaya sürüldü), Cention N (Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein, 2016'da piyasaya sürüldü) ve Surefill (Dentsply Sirona, Konstanz, Almanya, 2019'da piyasaya sürüldü) yüksek viskoziteli cam iyonomerlere (HV-GIC) rakiplerdir ve genişletilmiş endikasyonlara sahiptirler.²⁷ HV-GIC'lerin aksine bu materyaller, dişlerde "cuspal-coverage" gerektirmediklerinden her türlü kaviteyi restore edebilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır.²⁷

François ve ark. yaptığı çalışmada, HV-GIC ile karşılaştırıldığında tüm bu materyallerin ışıqla polimerizasyon modunda, ayrıca Cention N ve Activa BioActive Restorative'in self-polimerizasyon modunda daha iyi bükülme direncine sahip olduğunu ve bu nedenle basitleştirilmiş protokollere sahip posterior restorasyonlar için daha güçlü alternatifler olabileceğini bildirmişlerdir.²⁷ Ancak hiçbir materyal adeziv sistemle elde edilen adezyon değerlerine ulaşamamıştır ve universal adezivle kullanıldığında daha yüksek bağlanma dayanımı değerlerine sahip olmamıştır.

Kısa Fiber Takviyeli Akışkan Dental Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitlerin mikro/nano/hibrit doldurucu kompozitlere kıyasla üstün mekanik özelliklere sahip olduğu kanıtlanmıştır.²⁸ Restorasyon derinliğinin fazla olduğu durumlarda restorasyonun yeterli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması; uzun ömürlülüğü ve oral yapının karmaşık asidik ortamında higro-termal darbeye yüklerine dayanıklı olması gereklidir.²⁸ Cam fiber takviyesinin kompozit rezinlerin mekanik özelliklerini geliştirmesi nedeniyle son on yılda ışıqla sertleşen paketlenilebilir fiber takviyeli kompozitlerin üretilmesine olan ilgi artmıştır.²⁸ Doldurucu oranı artırılmış akışkan kompozitlerde kısa cam fiberlerin kullanılması; gelişmiş mekanik özellikleri korurken tabaka sayısının azalmasını ve uygulamanın kolaylaşmasını sağlamıştır.

Raju ve ark. yaptığı bir çalışmada, kısa fiber içerikli kompozit rezinlerin geleneksel muadillerine kıyasla mekanik özelliklerindeki iyileşmenin yanı sıra artmış ışık penetrasyonu sayesinde daha yüksek polimerizasyon derecesi gösterdiğini bildirmişlerdir.²⁸ Bu durum materyalden salınan artık monomer miktarını azaltırken materyalin termal genleşme katsayısını düşürmüştür.²⁸ Ayrıca fiber ilavesi materyalin su emilimi ve çözünürlüğü üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi sağlarken, fiber uzunluğunun materyalin fiziksel özellikleri üzerinde anlamlı bir etki göstermemiştir.²⁸

Thiol-Michael Fotopolimerizasyonuna Dayalı Restoratif Dental Materyaller

Thiol-Michael polimerizasyonları, temel diş hekimliği sistemlerinden farklıdır. Burada polimerizasyon, radikal aracılı olmaktan ziyade tiol ve elektron eksikliği olan vinil monomerler arasındaki anyon aracılı kademeli büyüme reaksiyonu yolunu izlemektedir. Son zamanlarda geliştirilen tiyolen polimerizasyon sistemi, özel radikal aracılı kademeli büyüme mekanizmasıyla, daha az büzülme gösteren ve artmış kırılma dayanıklılığına sahip polimerik ağ oluşumu

sağlayabilecek önemli bir yöntem olarak kabul edilmektedir.²⁹

Peptid Gömülü Biyoaktif Cam Kompozit Rezin

Lu ve ark. yaptığı çalışmada mezoporoz biyoaktif camın (MBG) gözenekli yapısını ve amelogenin derive peptidin (QP5) benzersiz amfoterik özelliklerini kullanarak yeni bir kompoziti başarıyla sentezlemişlerdir.³⁰ Elde edilen bu kompozitin, pH duyarlı akıllı ilaç salım modu sayesinde, asidik ortamda terapötik iyonları ve peptidleri salarak asidik ortamı nötralize edebildiği ve çürük önlemede etkili olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bu bileşik, hücrelere birçok yolla aktif olarak taşınarak dental pulpa kök hücrelerinin migrasyonunu, farklılaşmasını ve mineralizasyonunu teşvik edebilmektedir.³⁰

Ultralong Hidroksiapatit Nanotellerin Mine Benzeri Materyallere İlavesi

Günümüzde biyomimetik diş hekimliği kapsamında araştırmacıların kayıp diş dokusunun yerine geçebilecek diş benzeri yapıya sahip dental materyal arayışı devam etmektedir. Minenin en temel bileşeni olan hidroksiapatit (HA) kristalleri, c eksenine göre paralel olarak organize olmuş birkaç mikron uzunluğunda HA nanoliflerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla dental restoratif materyal içeriğine nano yapıda, farklı şekillerde hidroksiapatit partiküllerin ilavesi fikri diş dokusu benzeri biyomimetik restorasyonlar yapılabilmesi amacıyla ilk aklı gelen uygulamalardan biridir. Wang ve ark. HA nanotellerden oluşan deneysel kompoziti test ettikleri çalışmalarında geliştirdikleri bu mine benzeri kompozitin sertlik, aşınma ve asitle pürüzlendirilme özelliklerinin mineye benzer olduğunu, gerilme ve basma dayanımı özelliklerinin ise geleneksel kompozit rezinlerden daha iyi olduğunu göstermişlerdir.³¹

Nano-Katkılı Antibakteriyel Kompozit Rezinler

Kendiliğinden birleşen peptitler ve işlevselleştirilmiş amino asitler, pek çok biyomedikal uygulamada kullanılmak üzere yeni nanomalzemelerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Bunlar nanomalzemeler ilaç salımı yapan sistemlerde kullanılmakla birlikte rejeneratif uygulamalarda doku iskelesi olarak veya kendi kendine birleşen antibakteriyel amfifilik, sıklık ve fibril oluşturuca peptitleri içeren antibakteriyel parçalar olarak da kullanılmaktadır. Schnaider ve ark. yaptıkları bir çalışmada, (Florenilmetiloksikarbonil) Fmoc-pentafluoro-L-fenilalanine-OH tarafından oluşturulan nanoyapıların antibakteriyel yeteneklerini, bakteri morfolojisi üzerindeki önemli etkilerini ve bu nanoyapıların rezin bazlı kompozitlere işlevsel olarak ilave edilmesi için geliştirilen yeni yöntemleri sunmuştur.³² Araştırmacılar bu birleştirilmiş malzemelerin, bakteriyel büyümeyi ve canlılığı inhibe ettiğini ve memeli hücre hatlarına karşı sitotoksik olmadığını bulmuştur.³²

Pirinç Kabuğu Doğal Biyoatığından Elde Edilen Kompozit Rezin

Pirinç kabuğu yaklaşık %35-45 selüloz, %20 lignin, %19-25 hemiselüloz ve %14-17 balmumundan oluşmaktadır. Pirinç kabuğu, sert bir yüzeye, yüksek silika içeriğine, düşük yoğunluğa, yüksek dayanıklılığa ve bakteriyel ayrışmaya karşı dirence sahip bir biyoatıktır. Pirinç kabuğunun bu olumlu özelliklerinin yanı sıra ucuz olması ve geri dönüşüme katkı sağlayan çevreci bir yaklaşım olması amacıyla farklı alanlarda kullanılması ve ticarileştirilmesi birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Literatürde pirinç kabuğu silikasıdan üretilen dental kompozit rezinin, geleneksel kompozit rezinlerin yerini potansiyel olarak alabilecek mükemmel bir performans gösterdiği bildirilmiştir.³³ Pirinç kabuğu içerikli dental kompozit rezin, ticari olarak temin edilebilen mikrohürit kompozit rezinlere göre biraz daha düşük fiziksel ve mekanik dayanım gösterirken, yüzey pürüzlülüğü ve renk stabilitesi açısından geleneksel kompozit rezinlere göre daha iyi performans sergilemiştir. Ayrıca zirkonya nano tozunun pirinç kabuğu içerikli dental kompozite ilavesi materyalin basınç dayanımı ve sertlik değerlerini arttırmıştır.³³

Fonksiyonel Madde Olarak Çinko/Stronsiyum Katkılı Hidroksiapatit Dâhil Ederek Geliştirilmiş Antibakteriyel ve Mineralizasyon Özelliklerine Sahip Rezin Kompozitler

Gelişmiş antibakteriyel aktiviteye ve mineralizasyon kapasitesine sahip dental rezin kompozitler (DRC), fonksiyonel dolgu maddeleri kullanılarak kolayca hazırlanabilirler.³⁴ Nanotüp morfolojisi ve kontrol edilebilir doping iyonları içeriği ile basit bir kimyasal co-precipitation yöntemiyle sentezlenen Sr/HAP ve Zn/HAP, DRC'lere istenilen performansı sağlamak için fonksiyonel dolgu maddeleri olarak kullanılabilir. Zn/HAP, DRC'lere ağırlıkça %4 veya daha yüksek miktarda

güçlü antibakteriyel aktivite sağlayabilirken, Sr/Hap ağırlıkça %4 veya daha yüksek miktarında yeterli mineral birikimini indükleyebilir. Bu kompozit rezinler, diş restorasyonu için yeterli mekanik özelliklere ve mükemmel biyoyumluluğa sahiptir ve mikro sızıntı ve sekonder çürük problemleriyle başa çıkmada yardımcı olabilir.

Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüpler (CNT'ler), birkaç nanometreden birkaç mikrona kadar ölçülen, karbon atomlarının altıgen bir ağından oluşan içi boş, silindirik bir yapıyı içerir. Karbon nanotüplerin fizikokimyasal ve mekanik özelliklerinin ayarlanabilir olması nedeniyle, bunların diş hekimliği malzemelerine dahil edilmesinin kullanımını artırması ve daha yeni ve daha etkili fonksiyonel uygulamalara yol açması beklenmektedir. Bu potansiyel gelişmeler, fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüplerin ilaç taşıma sistemleri olarak kullanımıyla çürük önleme için yeni malzemelerin geliştirilmesine ve doku mühendisliği için hücre dışı matrisi taklit eden biyomimetik iskeletlerin oluşturulmasına yol açabilir. Ayrıca, karbon nanotüpler, antimikrobiyal ve doku yenileyici özelliklere sahip ajanlar için taşıma sistemi olarak, biyoaktif özellikler de dahil olmak üzere ilginç özelliklere sahip diş hekimliği malzemelerinin geliştirilmesi için büyük bir potansiyele sahiptir.³⁵

Siprofloksasin Yüklü Gümüş Nanopartiküller İçeren Dental Kompozit

Metalik nanopartiküller arasında gümüş nanopartiküller (AgNP'ler), bakteri hücre zarını hedef alırlar ve bakteri hücrelerindeki metabolik süreçleri bozarak hücre ölümüne yol açarlar. Bu NP'ler, antibiyotiklerle kombinasyon halinde materyale güçlü antibakteriyel aktivite kazandırdıkları için ilaç dağıtım sistemleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Siprofloksasin (CIP), çoklu bakteriyel enfeksiyonların tedavisinde yaygın olarak kullanılan geniş spektrumlu bir florokinolondur. CIP, CIP yüklü nanokompozitler, CIP yüklü polimerik nano elyaflar, CIP yüklü nanotüpler ve CIP yüklü AgNP'ler dahil olmak üzere birden fazla nanoplatforma yüklenmiştir. AgNP'lere yüklendiğinde CIP'nin Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilere karşı gelişmiş antibakteriyel aktivite göstermektedir. Arif ve ark. siprofloksasin yüklü gümüş nanopartiküller (CIP-AgNP'ler) içeren yeni bir tür antibakteriyel rezin kompozit sentezlemişlerdir.³⁶ Araştırmacılar, CIP-AgNP'ler içeren rezin kompozitlerin antibakteriyel aktivitesinin ve basınç dayanımının, basit rezin kompozitlerinden daha üstün olduğunu ve AgNP'leri içeren rezin kompozitlerden daha biyoyumlu olduğunu göstermiştir. Ayrıca CIP-AgNP ilavesinin materyalin estetik özelliğini olumsuz etkilemediğini bildirmişlerdir.

İmmobilize Edilebilir Öjenol Türevi Monomer İçeren Resin Esaslı Dental Kompozitler

İmmobilize edilebilir öjenol (Eg) türevlerinin rezin bazlı kompozitlerin içeriğine eklenmesi özellikle kanal içi post simantasyonu ve kor build-up restorasyonları için kullanılan materyallerin geliştirilmesinde ümit verici olmuştur. Bu uygulamada hedef, güçlü bir antimikrobiyal olarak Eg kısmının avantajından yararlanmak, dental restoratif materyale sürekli antibakteriyel aktivite kazandırmak ve re-enfeksiyon riskini azaltarak uzun vadeli performansı artırmaktır. Alrahlah ve ark. yaptığı çalışmada, öjenolün yeni bir polimerize edilebilir türevini (EgGMA) içeren yeni dental formülasyonların özelliklerini değerlendirmişlerdir.³⁷ EgGMA miktarı ve sıcaklığı arttıkça viskozitede bir azalma olduğunu ortaya çıkarmıştır. EgGMA'nın düşük bir miktarda rezinlerin matrisine ilave edilmesi su emilimi üzerinde herhangi bir belirgin etki olmaksızın kullanım ve çözünürlük özellikleri dahil olmak üzere kompozit rezinlerin performansını artırmıştır.

Post Uygulaması İçin Yüksek Dolduruculu Cam Fiber Takviyeli Polibenzoksazin Esaslı Yüksek Performanslı Kompozitler

Fiberle güçlendirilmiş polimer kompozitler, yüksek dayanımları nedeniyle mükemmel mekanik özellikler gerektiren çok sayıda uygulamada kullanım için muazzam bir potansiyele sahiptir. Mora ve ark. polibenzoksazin esaslı cam fiber post hazırlamış ve cam fiber içeriğinin mekanik ve termal özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir.³⁸ Cam fiber ile güçlendirilmiş polibenzoksazin kompozitin bükülme özellikleri, yani bükülme modülü ve bükülme mukavemeti, dentininkine benzer bulunmuştur. Ayrıca cam fiber takviyeli polibenzoksazin kompozit post ile restore edilen dişin dentininde doğal dişin dentininden daha düşük bir maksimum stres değeri sağlanmıştır.

Montmorillonit Nanokil İçeren Düşük Büzülmeli Kompozitler

Montmorillonit (MMT), merkezi bir oktahedral alüminyum hidroksit tabakasına kaynaşmış iki tetrahedral silikon oksit tabakasından oluşan kristalimsi ve katmanlı bir nanokil mineralidir. Ritto ve ark. yaptığı bir çalışmada, nanokil doldurucu (montmoril lonite Cloisite®—MMT) içeren düşük büzülmeli dental kompozit üretmiş ve bunların sitotoksikite ve fiziko-mekanik özelliklerini değerlendirmiştir.³⁹ Kompozit rezin içeriğine ağırlıkça %5 ve %7,5 MMT nanokillerin dahil edilmesi, materyalin fiziko-mekanik özelliklerini (fleksural güç, elastik modül, su emme, suda çözünürlük ve higroskopik genleşme) tehlikeye atmadan düşük sitotoksikite ve düşük polimerizasyon büzülmesine sahip kompozitlerin üretilmesine izin vermiştir.

Selüloz/Hidroksiapatit Bazlı Restoratif Kompozitler

Selüloz yüksek mekanik özellikleri nedeniyle filtrasyon membranı, biyoteknoloji ve rejeneratif tıp alanında birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Dental restoratif materyallere selüloz ilavesi materyalin mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ayrıca selüloz/nano-hidroksiapatit (nHA) kemik rejenerasyonu için umut verici olduğu bildirilmiştir. Sabir ve ark. yaptıkları bir çalışmada dental restorasyonlarda güçlendirici bir ajan olarak kullanılmak üzere selüloz lifleri üzerinde hidroksiapatitin (HA) in-situ sentezini amaçlamışlardır.⁴⁰ Araştırmacılar çalışmalarında SEM analizi bulgularına göre hidroksiapatitin selüloz parçacıkları üzerinde biriktiğini ve büyüdüğünü göstermişlerdir. Ayrıca selüloz/HA partikülleri, hücre canlılığı testinde biyoyumlu olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak yüksek oranda (%50 wt.) selüloz/HA parçacıkları içeren deneysel kompozitlerin mikro sertlik, basma dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu gösterilmiştir. Bu sonuçlar selüloz/HA partiküllerinin potansiyel olarak dental restoratif materyallerde bir güçlendirici ajan olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Yeni Nesil Bulk-Fill Resin Kompozitler

Bulk-fill rezin kompozitler, geleneksel kompozit rezinlere göre artan polimerizasyon derinlikleri nedeniyle ~4,0-5,0 mm'lik çok daha kalın tabakalar kullanılarak uygulanabilirler.^{41,42} Bulk-fill kompozit rezinler viskozitelerine göre yüksek ve düşük viskoziteli (akışkan) bulkfill kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır.⁴³ Yüksek ve düşük viskoziteli bulk-fill kompozit rezinler arasındaki temel fark, yüksek viskoziteli olanlar geleneksel kompozitler kadar güçlüyken, düşük viskoziteli olanların çiğneme yüklerini desteklemek için yeterince güçlü olmadığından ince bir geleneksel kompozit rezin tabakası ile yüzeysel bir korumaya ihtiyaç duymasındır.⁴³

Yüksek viskoziteli bulk-fill kompozit rezinler, genellikle ağırlıkça %79 ve düşük viskoziteli bulk-fill kompozit rezinler ağırlıkça %68 doldurucu içerir.⁴³ Bulk-fill kompozitler, daha kalın tabakalar halinde uygulanabildikleri ve klinisyenin restorasyon için harcadığı toplam süreyi azalttıkları için, rezin bazlı restorasyonların uygulama tekniğini basitleştirmektedir.⁴³ Bulk-fill kompozit rezinlerin kimyasal bileşimi, daha uyumlu rezin monomer doldurucu tipinin ve farklılaştırılmış başlatma sisteminin varlığına dayanmaktadır.⁴⁴ Bulk-fill kompozit rezinler marjinal adaptasyon,⁴² fiziko-mekanik özellikler, yorulma direnci ve kasal defleksiyon açısından geleneksel kompozit rezinlerle karşılaştırıldığında benzer şekilde performans gösterebilirler.^{45,46}

Universal Kompozit Rezinler

Kompozit rezin teknolojisindeki en son gelişmelerden birisi de "Universal Kompozit Rezinler" olarak bilinen yeni materyallerdir.⁴⁷ Universal kompozit rezinler, renk taklit etme potansiyeli (CAP) olarak da bilinen diş yapısıyla "harmanlama" etkisi nedeniyle önceki kompozit rezinlere göre daha az renk tonu taşır.^{48, 49} Bu kompozit rezinler çevreye mine ve dentin ile etkileşime girerek renk farklılıklarının azalmasını sağlar.⁴⁹ Omnicrom (Tokuyama Dental America, Inc.) bu amaçla üretilmiş ilk gerçek universal kompozit rezindir.⁴⁷ Bu kompozit rezin, üretici firma tarafından Onaltı Vita Classical tonunun tamamına (VITA North America, Yorba Linda, CA) uyacağı belirtilen tek tonlu bir malzeme olarak piyasaya sürülmüştür.⁴⁷

İlk kompozit rezinin tanıtılmasından bu yana, kompozit rezinlerin organik matrisinin bileşimi önemli ölçüde değişmemiştir.⁴⁷ Bu konuda ilk istisna silorana bazlı kompozit rezinlerdir.⁴⁷ Bununla birlikte BPA (bisfenol-A) toksitesi konusunda kamuoyunda oluşan son gelişmeler,

alternatif rezin monomerlerin bulunmasını ve bu monomerlerin dental adezivlerin ve kompozit rezinlerin bileşimine eklenmesi konusunu da gündeme getirmiştir.⁴⁷ İlgili üreticilerin SDS belgelerine göre, Filtek Universal ve Omnicroma'nın rezin matris formülasyonlarının Bis-GMA veya bisfenol A etoksilat dimetakrilat (Bis-EMA) içermemesi bu kompozit rezinlerin diğer avantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.⁴⁷

Klinik olarak kullandığımız universal kompozitlerin tesviyesi çok kolaydır, cila özellikleri mükemmeldir.⁵⁰ Bununla birlikte, mevcut universal kompozit rezinlerin birkaçının renk stabilitesinin ideal olmadığı da bildirilmiştir.⁵¹

SONUÇ

Kompozit rezin materyallerdeki son gelişmeler; organik matris içeriğinin değiştirilmesi, nanopartikül ve biyoaktif materyallerin eklenmesi, polimerizasyon sistemlerinin değiştirilmesi olarak sınıflandırılabilir. Bununla birlikte biyomimetik diş hekimliği ve doku mühendisliğindeki gelişmeler neticesinde üretilen 'akıllı materyaller' ışığında kompozit rezinlerin mevcut dezavantajlarını gidermek için yapılan çalışmalar gelecek için umut vericidir.

Değerlendirme / Peer-Review

İki Dış Hakem / Çift Taraflı Körleme

Etik Beyan / Ethical statement

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

It is declared that during the preparation process of this study, scientific and ethical principles were followed and all the studies benefited are stated in the bibliography.

Benzerlik Taraması / Similarity scan

Yapıldı - ithenticate

Etik Bildirim / Ethical statement

dishekimligidergisi@selcuk.edu.tr

Telif Hakkı & Lisans / Copyright & License

Yazarlar dergide yayınlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmalarını CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

Finansman / Grant Support

Yazarlar bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir. | The authors declared that this study has received no financial support.

Çıkar Çatışması / Conflict of Interest

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemiştir. | The authors have no conflict of interest to declare.

Yazar Katkıları / Author Contributions

Çalışmanın Tasarlanması | Design of Study: HB (%50) SD (%40) HÇ (%10)
Veri Toplanması | Data Acquisition: HB (%50) HÇ (%50)
Makalenin Yazımı | Writing up: HB (%40) HÇ (%40) SD (%20)
Makale Gönderimi ve Revizyonu | Submission and Revision: HB (%60)
HÇ (%20) SD (%20)

KAYNAKLAR

- Willems G, Lambrechts P, Braem M, Vanherle G. Composite resins in the 21st century. *Quintessence Int.* 1993; 24(9):641.
- Altun C. Kompozit dolgu materyallerinde son gelişmeler. *Gülhane Tıp Derg.* 2005; 47(1): 77-82.
- Craig RG, Powers J, Wataha J. Direct esthetic restorative materials. *Res Dent Mater.* 2000; 244-267.
- Dayanç B. Kompozit Rezin Restorasyonlar. Güneş Kitabevi LTD. Şti. 2000; 1(20): 74-84.
- Yoshinaga K, Yoshihara K, Yoshida Y. Development of new diacrylate monomers as substitutes for Bis-GMA and UDMA. *Dent Mater.* 2021; 37(6): 391-398.
- Asmussen, E, Peutzfeldt A. Influence of UEDMA, BisGMA and TEGDMA on selected mechanical properties of experimental resin composites. *Dent Mater.* 1998; 14(1): 51-56.
- Peutzfeldt, A. Resin composites in dentistry: the monomer systems. *Eur J Oral Sci.* 1997; 105(2): 97-116.
- Tarumi H, Imazato S, Narimatsu M, Matsuo M, Ebisu S. Estrogenicity of fissure sealants and adhesive resins determined by reporter gene assay. *J Dent Res.* 2000; 79(11): 1838-1843.
- Landuyt KLV, Nawrot T, Geebelen B, Munck JD, Snauwaert J, Yoshihara K, et al. How much do resin-based dental materials release? A meta-analytical approach. *Dent Mater.* 2011; 27(8): 723-747.
- Flávia Gonçalves F, Caio LN, Azevedo CLN, Ferracane JL, Braga RR. BisGMA/TEGDMA ratio and filler content effects on shrinkage stress. *Dent Mater.* 2011; 27(6): 520-526.
- Barszczewska-Rybark IM, MartaWC, Grzegorz C. Novel urethane-dimethacrylate monomers and compositions for use as matrices in dental restorative materials. *Int J Mol Sci.* 2020; 21(7): 2644.
- Jun SK, Cha JR, Knowles JC, Kim HW, Lee JH, Lee HH. Development of Bis-GMA-free biopolymer to avoid estrogenicity. *Dent Mater.* 2020; 36(1): 157-166.
- Featherstone JD. Dental restorative materials containing quaternary ammonium compounds have sustained antibacterial action. *J Am Dent Assoc.* 2022.
- Kirschner J, Szillat F, Bouzrati-Zerelli M, Becht JM, Klee JE, Lalevée J. Sulfonates and sulfonates as high-performance co-initiators in CQ based systems: Towards aromatic amine-free systems for dental restorative materials. *Dent Mater.* 2020; 36(2): 187-196.
- Van der Laan HL, Zajdowicz SL, Kuroda K, Bielajew BJ, Davidson TA, Gardinier J, Kohn DH, et al. Biological and mechanical evaluation of novel prototype dental composites. *J Dent Res.* 2019; 98(1): 91-97.
- Jia W, Lau GY, Huang W, Zhang C, Tomsia AP, Fu Q. Cellular response to 3-D printed bioactive silicate and borosilicate glass scaffolds. *J Biomed Mater Res B: Appl Biomater.* 2019; 107(3): 818-824.
- Wang Z, Sa Y, Sauro S, Chen H, Xing W, Ma X, et al. Effect of desensitising toothpastes on dentinal tubule occlusion: a dentine permeability measurement and SEM in vitro study. *J Dent.* 2010; 38(5): 400-410.
- Bakry AS, Abbassy MA, Alharkan HF, Basuhail S, Al-Ghamdi K, Hill R. A novel fluoride containing bioactive glass paste is capable of remineralizing early caries lesions. *Materials.* 2018; 11(9): 1636.
- Par M, Tarle Z, Hickel R, Ilie N. Polymerization kinetics of experimental bioactive composites containing bioactive glass. *J Dent.* 2018; 76: 83-88.
- Xu YT, Wu Q, Chen YM, Smales RJ, Shi SY, Wang MT. Antimicrobial effects of a bioactive glass combined with fluoride or triclosan on *Streptococcus mutans* biofilm. *Arch Oral Biol.* 2015; 60(7): 1059-1065.
- Bansal R, Burgess J, Lawson NC. Wear of an enhanced resin-modified glass-ionomer restorative material. *Am J Dent.* 2016; 29(3): 171-174.
- Garoushi S, Vallittu PK, Lassila L. Characterization of fluoride releasing restorative dental materials. *Dent Mater J.* 2018; 37(2): 293-300.
- Croll TP, Berg JH, Donly KJ. Dental repair material: a resin-modified glass-ionomer bioactive ionic resin-based composite. *Compendium.* 2015; 36(1): 1-8.
- Liu Y, Kohno T, Tsuboi R, Kitagawa H, Imazato S. Acidity-induced release of zinc ion from BioUnion™ filler and its inhibitory effects against *Streptococcus mutans*. *Dent Mater J.* 2020; 39(4): 547-553.
- Zhang, N, Xie C. Polymerization shrinkage, shrinkage stress, and mechanical evaluation of novel prototype dental composite resin. *Dent Mater J.* 2020; 39(6): 1064-1071.
- Klee, JE, Renn C, Elsner O. Development of novel polymer technology for a new class of restorative dental materials. *J Adhes Dent.* 2020; 22(1): 35-45.
- François P, Remadi A, Le Goff S, Abdel-Gawad S, Attal JP, Dursun E. Flexural properties and dentin adhesion in recently developed self-adhesive bulk-fill materials. *J Oral Sci.* 2021; 63(2): 139-144.
- Raju R, Rajan G, Farrar P, Prusty BG. Dimensional stability of short fibre reinforced flowable dental composites. *Sci Rep.* 2021; 11(1): 4697.
- Burujeny SB, Yeganeh H, Atai M, Gholami H, Sorayya M. Bactericidal dental nanocomposites containing 1, 2, 3-triazolium-functionalized POSS additive prepared through thiol-ene click polymerization. *Dent Mater.* 2017; 33(1): 119-131.
- Lu J, Liu Z, Wang K, Gu M, Peng X, Zhang Y, et al. Odontogenesis by Endocytosis of Peptide Embedding Bioactive Glass Composite. *J Dent Res.* 2022; 101(9): 1055-1063.
- Wang QQ, Wu LP, Zhang S, Tao Y, Li YZ, Zhou QL, et al. Assembly of Ultralong Hydroxyapatite Nanowires into Enamel-like Materials. *J Dent Res.* 2022; 101(10): 1181-1189.
- Schnaider L, Ghosh M, Bychenko D, Grigorians I, Ya'ari S, Antsel TS, et al. Enhanced nanoassembly incorporated antibacterial composite materials. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2019; 11(24): 21334-21342.
- Lin GSS, Cher CY, Cheah KK, Noorani TY, Ismail NH, Ghani NRNA. Novel dental composite resin derived from rice husk natural biowaste: A systematic review and recommendation for future advancement. *J Est Restor Dent.* 2022; 34(3): 503-511.
- Li Y, Zhang D, Wan Z, Yang X, Cai Q. Dental resin composites with improved antibacterial and mineralization properties via incorporating zinc/strontium-doped hydroxyapatite as functional fillers. *Biomed Mater.* 2022; 17(4): 045002.
- Castro-Rojas MA, Vega-Cantu YI, Cordell GA, Rodriguez-Garcia A. Dental applications of carbon nanotubes. *Molecules.* 2021; 26(15): 4423.
- Arif W, Rana NF, Saleem I, Tanweer T, Khan MJ, Alshareef SA, et al. Antibacterial Activity of Dental Composite with Ciprofloxacin Loaded Silver Nanoparticles. *Molecules.* 2022; 27(21): 7182.
- Alrahlah A, Al-Odayni AB, Saeed WS, Al-Kahtani A, Alkhtani FM, Al-Mafleh NS. Water Sorption, Water Solubility, and Rheological Properties of Resin-Based Dental Composites Incorporating Immobilizable Eugenol-Derivative Monomer. *Polymers.* 2022; 14(3): 366.
- Mora P, Nunwong C, Sriromreun P, Kaewsriprom P, Srisorrachatr U, Rimdusit S, et al. High Performance Composites Based on Highly Filled Glass Fiber-Reinforced Polybenzoxazine for Post Application. *Polymers.* 2022; 14(20): 4321.
- Ritto FP, da Silva EM, Borges ALS, Borges MAP, Sampaio-Filho HR. Fabrication and characterization of low-shrinkage dental composites containing montmorillonite nanoclay. *Odontology.* 2022; 110(1): 35-43.
- Sabir M, Ali A, Siddiqui U, Muhammad, N Khan AS, Sharif F, et al. Synthesis and characterization of cellulose/hydroxyapatite based dental restorative composites. *J Biomater Sci Polym Ed.* 2020; 31(14): 1806-1819.
- Kim RJY, Kim YJ, Choi NS, Lee IB. Polymerization shrinkage, modulus, and shrinkage stress related to tooth-restoration interfacial debonding in bulk-fill composites. *J Dent.* 2015; 43(4): 430-439.
- Fronza BM, Makishi P, Sadr A, Shimada Y, Sumi Y, Tagami J, et al. Evaluation of bulk-fill systems: microtensile bond strength and non-destructive imaging of marginal adaptation. *Braz Oral Res.* 2018; 32.
- De Lacerda LR, Bossardi M, Mitterhofer WJS, de Carvalho FG, Carlo HL, Piva E, et al. New generation bulk-fill resin composites: Effects on mechanical strength and fracture reliability. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2019; 96: 214-218.
- AR Aleixo, RD Guiraldo, APP Fugolin, SB Berger, RLX Consani, AB Correr, et al. Evaluation of contraction stress, conversion degree, and cross-link density in low-shrinkage composites. *Photomed Laser Surg.* 2014; 32(5): 267-273.

45. Sousa-Lima RX, Silva LJA, Chaves LVF, Geraldeli S, Alonso RCB, Borges BCD. Extensive assessment of the physical, mechanical, and adhesion behavior of a low-viscosity bulk fill composite and a traditional resin composite in tooth cavities. *Oper Dent*. 2017; 42(5): 159-166.
46. Tsujimoto A, Nagura Y, Barkmeier WW. Simulated cuspal deflection and flexural properties of high viscosity bulk-fill and conventional resin composites. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2018; 87: 111-118.
47. Perdigão J, Araujo E, Ramos RQ, Gomes G, Pizzolotto L. Adhesive dentistry: Current concepts and clinical considerations. *J Esthet Restor Dent*. 2021; 33(1): 51-68.
48. Suh YR, Ahn JS, Ju SW, Kim KM. Influences of filler content and size on the color adjustment potential of nonlayered resin composites. *Dent Mater J*. 2017; 36(1): 35-40.
49. Iyer RS, Babani VR, Yaman P, Dennison J. Color match using instrumental and visual methods for single, group, and multi-shade composite resins. *J Esthet Restor Dent*. 2021; 33(2): 394-400.
50. Christensen G. New, innovative restorative resins appear promising. *Clin Rep*. 2019; 12(4): 1-3.
51. Sulaiman TA, Rodgers B, Suliman AA, Johnston WM. Color and translucency stability of contemporary resin-based restorative materials. *J Esthet Restor Dent*. 2021; 33(6): 899-905.