

Derleme

Nanomateriyallerin endodontide kullanımı

Şadihan Kurt Koç ¹, Mügem Gürel Ekici ¹,Bağdagül Helvacıoğlu Kıvanç ¹¹Endodonti Anabilim Dalı, Diş Hekimliği Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

ÖZET

Nanoteknoloji, nano boyutlu yapıların üretimi ve kullanımını kapsayan bir alan olarak tanımlanmaktadır. Teknolojideki gelişmeler sonucunda nanomateriyaller diş hekimliği uygulamalarında daha fazla kullanılır hale gelmiştir. Malzemeler nano ölçekli boyutlarda farklı ve gelişmiş özelliklere sahip olabilirler. Bu özelliklerinden faydalanılarak tıpta ve diş hekimliğinde teşhis veya terapötik amaçlı olarak kullanılmış ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Diş hekimliğinin her alanında kullanımı bulunan nanopartiküller, endodonti alanında da birçok amaçla kullanılmaktadır. Nanopartiküller, antibakteriyel özellik göstermeleri nedeniyle kök kanal tedavisinde kullanılan birçok materyale eklenebilir. Patlarda, obtürasyon ve dolgu materyallerinde, kök onarım malzemelerinde, kanal içi ilaç veya dezenfeksiyon materyallerinde, dental enstrümanların kaplanması, pulpa rejenerasyonunda ve yapıların nano-test edilmesinde nanoteknolojiden faydalanılabilir. Yapılan çalışmalarda nanoteknolojinin, endodontiyi de içeren diş hekimliği alanına birçok yeni malzeme ve teknik getirdiği görülmektedir. Nano diş hekimliği sürekli gelişmekte olan bir alandır ve bu gelişmelerin endodontik tedaviyi de içeren dental tedavilerin başarısını artıracığı düşünülmektedir. Bu makale, nanoteknoloji ve nanomateriyallerin endodonti uygulamalarındaki kullanımını tartışmakta ve örnekleriyle birlikte sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Endodonti; dezenfeksiyon; kök kanal dolgu materyalleri; nanopartiküller; nanoteknoloji

EDITÖR: Hacer Deniz Arısu, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

YAYIN HAKKI: © 2025 Kurt Koç Ş., Gürel Ekici M., Helvacıoğlu Kıvanç B. Bu eserin yayın hakkı [Creative Commons Attribution License](#) ile ruhsatlandırılmıştır. Sınırsız kullanım, dağıtım ve her türlü ortamda çoğaltım, yazarlar ve kaynağın belirtilmesi kaydıyla serbesttir.

Makale gönderiliş tarihi: 18 Mayıs 2023; Yayına kabul tarihi: 17 Ekim 2023

*İletişim: Araştırma Görevlisi Dt. Şadihan Kurt Koç

Adres: Emek mah. Bışkek Cad. 1.Sok. No:8

Gazi Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye.

E- posta: sadihankurt@gmail.com

KAYNAK GÖSTERMEK İÇİN: Kurt Koç Ş., Gürel Ekici M., Helvacıoğlu Kıvanç B. Nanomateriyallerin Endodontide Kullanımı. Acta Odontol Turc 2025;42(2):101-108

FINANSAL DESTEK: Bulunmamaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI: Bulunmamaktadır.

[Abstract in English is at the end of the manuscript]

GİRİŞ

Nanoteknoloji sayesinde atomik ve moleküler düzeyde materyaller ve cihazların araştırılması ve geliştirilmesi sonucu nanomateriyaller diş hekimliğinde ve uygulamalarında giderek artan şekilde kullanılır hale gelmiştir.¹ “Nano” kelimesi, “cüce” anlamına gelen Yunanca “nannos” kelimesinden türetilmiştir.² Nanoteknoloji terimi, 1-100 nm aralığında nano ölçekli boyutlardaki bilim, teknoloji ve mühendislik çalışmalarını içerir, nano boyutlu fonksiyonel yapıların üretilmesi ve kullanımını kapsar.³ Parçacıkların boyut ve şekillerinin metrenin milyarda biri ölçeğinde düzenlenmesiyle nanopartiküller elde edilir.^{4,5} Avrupa Komisyonu’nun tavsiyesine göre nanomateriyal, bağlanmamış durumda veya bir agregaya ya da aglomera olarak parçacıklar içeren doğal, tesadüfi veya imal edilmiş bir malzeme olarak tanımlanmaktadır.⁶ Malzemeler nano ölçekli boyutlarda farklı özellikler gösterebilir; daha iyi ısı veya elektrik iletebilir, daha iyi stabilizeye veya farklı manyetik özelliklere sahip olabilir, ışığı daha iyi yansıtabilir ya da renk değiştirici özelliklere sahip olabilir.⁷

Nanoteknoloji kavramı ilk olarak nanoteknolojinin atası olarak kabul edilen ve 1959’da Amerikan Fizik Derneği’nin toplantısında “Alta Bolca Yer Var” başlıklı konuşmasıyla ünlenen Richard Feynman tarafından tanıtılmıştır.^{8,9} 1974’te, Japon bilim insanı Norio Taniguchi “nanoteknoloji” terimini ilk kullanan ve tanımlayan kişi olmuştur.¹⁰ Daha sonra 1991 yılında Drexler, Peterson ve Pergamit, tıp uygulamalarında nano süreçlerle ilgili bir kitap yayınlamışlar ve bundan sonra “nanotıp” terimi kullanılmaya başlanmıştır.¹¹ Karbon nanotüpler olarak adlandırılan ünlü karbon formu, ilk kez 1991 yılında Iijima tarafından tanıtılmıştır.¹² “Nano-diş hekimliği” terimi, nanorobotların ve nanomalzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunan Freitas tarafından icat edilmiştir.⁹

Son yıllarda, nano yapıları malzemeler, tıpta teşhis ve terapötikleri içeren çeşitli alanlarda kullanılmış ve umut verici sonuçlar görülmüştür. Nanopartiküllerin kuantum fenomenleri ve yüksek spesifik yüzey alanlarıyla ilişkili benzersiz kimyasal, biyolojik ve fiziksel özellikleri bu malzemelerin yüksek potansiyel taşıdığını göstermektedir. Ayrıca nanopartiküller, proteinler ve membran reseptörleri gibi biyomoleküllerin çoğuna benzer boyutları ve yüzey özellikleri ile bileşimlerinin ayarlanmasıyla biyomoleküllerle etkileşime girebilirler.¹³

Nanopartiküllerin Antibakteriyel Etki Mekanizması

Nanopartiküller, antibakteriyel özellikler gösterirler ve bu özelliklerinden dolayı birçok materyale eklenebilmektedirler. Antibakteriyel etki, çeşitli mekanizmalarla ortaya çıkmaktadır.

Genel olarak, mikroorganizmalar ve sporları yüzeylerinde negatif bir yük taşır, bu nedenle zıt yüke sahip bir nanopartikül, mikroorganizmaların yüzeyi için yüksek afiniteye sahiptir ve mikrobiyal hücre yüzeyinde birikir. Bu pozitif yüklü nanopartiküller, hücre zarına güçlü bir şekilde bağlanır ve geçirgenliğin artmasına neden olur. Böylece mikroorganizmaya giderek daha fazla nanopartikül girer ve hücre içi içeriğin sızmasına neden olur. Bu nanopartiküller mezozomlara da bağlanarak solunum, bölünme ve DNA replikasyonunu etkiler.¹⁴⁻¹⁶

Metabolik fonksiyonların düzenlenmesi öncelikle mikroorganizmalardaki metal iyonu homeostazına bağlıdır. Metal bazlı nanopartiküllerin fazlalığı, hücrenin hayatta kalabilmesi için gerekli olan bu temel parametreyi bozarak geri dönüşü olmayan hasara neden olur ve büyümenin geciktirilmesini veya mikroorganizmanın öldürülmesini tetikler.¹⁴ Nanopartiküller, hücre içinde oksidatif strese neden olan reaktif oksijen türlerinin açığa çıkmasına neden olarak solunum aktivitesini inhibe eder, ATP üretimini azaltır ve hücre zarının bozulmasına neden olur. Metal oksit nanopartiküller hücre içine girdiğinde bu reaktif oksijen türlerinin salınımına neden olur.^{14,17}

Nanopartiküller, amino asit yan zincirinin oksidasyonunu katalize eder, bu da katalitik aktivite kaybına neden olan proteine bağlı karbonillerin oluşumuna yol açarak protein bozulmasına ve çeşitli esansiyel enzimlerin inaktivasyonuna neden olur.^{14,18,19} Nanopartiküllerin elektriksel özelliklerinden dolayı nükleik asitle etkileşime girme yetenekleri vardır, bu da kromozomal ve plazmid DNA'sının replikasyon süreci üzerinde olumsuz bir etkiye neden olup sinyal iletiminin inhibisyonu ile sonuçlanır.^{14,20-23} Işığın varlığında, ışığa duyarlı nanopartiküller hücre zarının fotokimyasal değişimine ve proteinlere, özellikle de DNA'ya zarar vererek mikroorganizmanın foto öldürülmesine neden olur.^{14,24}

Nanopartiküllerin Sınıflandırılması

Nanopartiküller orijinlerine göre doğal ya da sentetik olarak incelenebilir. Boyutlarına göre sıfır boyutlu, bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak

sınıflandırılır.^{14,25,26} Sıfır boyutlular yüksek spesifik yüzey alanına sahip ve küre şeklindedir, bunlara örnek olarak kuantum noktaları, metal nanopartiküller, atomik agregatlar verilebilir. Bir boyutlular ışık saçılımı şeklinde olup nanobarlar, karbon nanotüpler bunlara örnek olarak verilebilir. İki boyutlular düz yüzeye ve yüksek adezyona sahiptir, bunlara örnek olarak nanofilm, nanotabakalar ve grafen verilebilir. Üç boyutlular yüksek taşıyıcı mobilitesine sahiptir ve birbirine bağlı şekilde bir mimari gösterir. Grafit, elmas, polikristaller bu üç boyutlu nano yapılara örnek olarak verilebilir. Yapılarına göre sınıflandırılmasına bakıldığında karbon bazlılar, metaller, dendrimerler veya bunların bileşimlerinden oluşabilir. Dendrimerler, ağaç benzeri kollarından veya dallardan oluşan, iyi tanımlanmış, homojen ve monodispers yapıya sahip nano boyutlu, radyal simetrik moleküller olarak tanımlanmaktadır.^{14,27}

Tıpta ve Diş Hekimliğinde Nanopartiküller

Nanobilim alanındaki araştırmalar son yıllarda hızla artmaktadır. Nanoteknolojinin tıptaki uygulama alanlarına olan ilgi, nanotıp adı verilen yeni bir alan ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Tıp ve diş hekimliğinde kullanılmaya başlanan nanoteknolojinin, hastalığın teşhisi, tedavisi ve önlenmesinde önemli ilerlemeler sağlayacağı öngörülmektedir.²⁸ Nanotıp, hastalık teşhisi, tedavisi, önlenmesi ve nano boyuttaki materyaller ile biyoteknoloji, genetik mühendisliği ve nanorobotlar kullanılarak insan sağlığının korunması ya da iyileştirilmesini içeren bilim ve teknoloji alanıdır. Tıp alanlarının birçoğunda nanoteknolojiden faydalanılmaktadır.²⁹

Hastalıkların erken teşhisi ve hastalığa karşı önceden var olan yatkınlığın araştırılması "*nanodiagnoz*" ile mümkündür, nano cihazlar ile hücre içi ve moleküler düzeyde analizler yapılabilir. Nanoteknoloji yardımıyla hücre içi ve hücre dışı etkileşimlerde bulunulabilir. Bununla birlikte hücre çoğalması ve farklılaşması indüklenebilir ve rejenerasyon sağlanabilir.²⁸ Bakteri, virüs veya mantar gibi istenmeyen patojenler, mikrobivorlar adı verilen ve kan dolaşımında bulunabilen yapay fagositler ile sindirilip yok edilebilir.³⁰ Nanoteknoloji sayesinde nanopartiküller kullanılarak belirli hücrelere ilaç verilebilir. Nanopartiküller küçük ilaç moleküllerini tutabilir ve istenen yere taşıyabilirler. Bu amaçla biyobozunur nanopartiküller kullanılabilir. Biyobozunur nanopartiküller fizyolojik ortamda parçalanabilir, aynı zamanda biyolojik olarak yeniden emilebilirler. Aktif ajanın sadece istenen bölgede ve istenen dozda bırakılması biyoyararlanımı artırırken ilaç tüketim miktarını ve yan etkileri azaltır. Bu sayede hem maliyet azalır hem de hasta konforu artar.^{31,32} Cerrahi nanorobotlar, kan dolaşımı yoluyla vücutta çeşitli damarlara ve diğer boşluklara girebilir. Bir cerrah tarafından programlanan veya yönlendirilen cerrahi bir nanorobot ile patoloji belirlenebilir ve nano manipülasyon ile lezyonlar teşhis ve tedavi edilebilir.³¹

Nanoteknolojinin diş hekimliğindeki uygulamaları tıptaki uygulamalarına kıyasla daha yavaş ilerlemiştir

fakat günümüzde diş hekimliği alanında nanopartiküller giderek daha fazla rol oynamaktadır. Çok sayıda diş malzemesi nanopartikül içerir. Özellikle rezin esaslı kompozit malzemeler, simanlar ve implant malzemeleri bu grubun en önemlileridir.¹ Diş hekimliğinin neredeyse her alanında nanomateriyallerden faydalanılmaktadır:

- Ortodontide mükemmel deforme olabilirlik, korozyon direnci ve mukavemete sahip nanoflex ortodontik teller olarak³³ ve ortodontik nanorobotlar tarafından diş repozisyonlandırılmasında⁹,
- Konservatif diş hekimliğinde dentin aşırı duyarlılığını gidermek⁹ ve nanoadezivler, polimerler gibi adezyon ajanının etkilerini ve özelliklerini artırmak için²⁸, ayrıca nanokompozitler³⁴ ve nano light-cure cam iyonomer restoratif materyaller³⁴ olarak,
- Protetik diş tedavisinde implantlarda³⁵, ölçü malzemelerinde²⁸, nanokompozit protez dişlerinde³⁰,
- Oral diagnozda oral kanser tanısı³⁶ ve tedavisi³⁷ için,
- Oral cerrahide nanorobotlar tarafından nanoanesteziye⁹ ve nanoiğneler, nanopreseller^{34,38}, nanosterilize edici çözeltiler³⁹ olarak,
- Periodontolojide dentifrobotlar (nano boyutlu hidroksiapatit moleküllerinden oluşan dentifikler) olarak⁹, ayrıca ilaç dağıtım sistemleri ve diş repozisyonlanmasında³⁴,
- Endodontide temizleme ve şekillendirmeden sonra kanalları oral mikrofloradan kurtarmak için efektif irrigasyon solüsyonu olarak¹⁴ nanomateriyaller kullanılabilir.

Dental Nanorobotlar

Nanoteknolojide, bir maddenin atomlarını manipüle etmek, atomik ve moleküler yapı taşlarından bir şeyler üretmek için nanorobotlar kullanılmaktadır. Nanorobotlar, 1-100 nm aralığında teorik mikroskobik cihazlardır.⁴⁰ Bunlar diş hekiminin kontrolü altında makine olarak çalışan karbon bazlı moleküllerdir. Hücrelerden enerji elde ederler. Yapılarındaki ana element, elmas ya da fuller formunda karbondur. Bu materyaller yüksek mukavemet gösterdiği için tercih edilir.⁴¹ Nanorobotların navigasyon hassasiyeti yüksektir bu sayede konumsal doğruluğa sahip olma eğilimindedirler. Görevlerini tamamladıktan sonra, vücuttan boşaltım kanalları tarafından uzaklaştırılabilirler.⁴² Diş hekimliğinde çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır.

Nanorobotik analjezikler ile iğneler kullanılmadan anestezi sağlanabilir. Bu sayede hasta konforu artar, kaygı azaltılabilir. Anestezinin istenilen bölgeye istenilen miktarda uygulanabilmesi ve istendiğinde etkisinin geri çevrilebilmesi kontrol edilebilir, böylece yan etki ve komplikasyonların azalması sağlanabilir.^{30,43}

Dentin hassasiyeti gösteren dişlerde, hassas olmayan dişlere kıyasla dentin tübüllerinin yüzeyde sayıca fazla olması ve çapının iki kat büyük olmasının bu hassasiyete sebep olduğu bulunmuştur. Aşırı dentin duyarlılığı, tübüller aracılığıyla pulpa ile iletilen hidrodinamik basıncın değişiminden kaynaklanabilir.

Dental nanorobotlar, dentin tübüllerini tıkayarak hastalara hızlı ve kalıcı bir tedavi sağlayabilir.^{30,43}

Dentifrobotlar nanorobot içeren diş macunu ve gargaralarda bulunabilir. Ağız temizliği sırasında supragingival ve subgingival yüzeylerde biriken organik maddelerin debridmanını sağlar, bu sayede kötü koku da önlenmiş olur. Dentifrobotlar plaktaki patojen bakterileri yok eder ve sağlıklı bir ekosistem oluşmasına yardımcı olur.^{30,43}

2022 yılında Hindistan'da yapılan bir çalışmada nanorobotların kanal tedavisi sırasında dentin tübüllerinin temizlenmesinde kullanılması araştırılmıştır. Burada kullanılan nanorobotlar sarmal şeklindedir ve demirle kaplanmış silikon dioksitten yapılmıştır. Bu demir kaplama sayesinde nanorobotlar bir manyetik alan tarafından kontrol edilir. Mevcut irrigasyon ve aktivasyon sistemlerinin kullanılması ile dentin tübülleri içinde en fazla 800 mikrometre derinliğe ulaşabilmişken nanorobotlar 2.000 mikrometre derinliğe ulaşabilmiştir. Çalışmada nanorobotlar hızla değişen manyetik alana maruz bırakılmış, bu da lokalize olarak ısılarının artmasını sağlamıştır. Isı artışının *Enterococcus faecalis* ile enfekte edilen tübüllerde dezenfeksiyonu sağlaması hedeflenmiş ve nanorobotlar etrafındaki bakteri hücrelerinin öldüğü gözlemlenmiştir. Belirli bir bölgede manyetik alanın tersine çevrilmesi ile nanorobotların tübüllerden geri çıkarılabildiği de gösterilmiştir. Bu çalışma nanorobotların endodontik tedavide kullanımı için yeni bir yöntem olarak sunulmuştur.⁴⁴

Guo ve ark.⁴⁵ tarafından yapılan başka bir çalışmada bir kanal patı, antibakteriyel materyal ve manyetik nanopartiküller eklenerek modifiye edilmiştir. Modifiye patla kök kanal tedavisi tamamlanan dişlere manyetik alan uygulanmış ve içerdiği manyetik nanopartiküller sayesinde kanal patının dentin tübüllerine daha derin bir şekilde nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. Antibakteriyel kanal patının, bu uygulama sayesinde dentin tübüllerindeki biyofilm tabakasına etki edebileceği ve periapikal iyileşmeyi destekleyebileceği görülmüştür.

Nanopartiküllerin Endodontide Kullanımı

Endodontide nanoteknoloji, patlarda, obtürasyonda, kompozitlerde, kök onarım malzemelerinde, kanal içi ilaç veya dezenfeksiyon uygulamalarında, dental enstrümanların kaplanması, nano boyutlu ilaçlarla ilgili tedavilerde ve pulpa rejenerasyonunda kullanılabilir.^{1,8,46} Yapıların nano-test edilmesinde de nanoteknolojiden faydalanılabilir.³

Endodontide kullanılan nanopartiküller organik ve inorganik olarak ayrılabilir. Organik nanopartiküller olarak grafen, kitosan, poly(lactic)co-glycolic asit sayılabilir. İnorganik nanopartiküller ise biyoaktif cam ürünleri, kalsiyum silikat, hidroksiapatit, gümüş bileşikler, metaller ve metal oksitler olarak sıralanabilir.^{3,8} Birçok nanopartikül kompozitlere ilave edilebilir. Gümüş nanopartiküller, kuaterner amonyum polietilenimin, çinko oksit nanopartiküller, titanyum dioksit nanopartikülleri, bakır oksit nanopartikülleri diş hekimliğinde antimikrobiyal özellikleri için kullanılabilir.¹

Endodontide sık kullanılan nanopartiküllerden biri olan grafen, *S. mutans*'a karşı iyi antimikrobiyal özellik gösterir ve gelişmiş doku çözücü etkisi vardır; düşük toksisite, yüksek stabilite gösterir.⁸ Grafenin bir türevi olan grafen nanoplatelet, Rago ve ark.⁴⁷ tarafından yapılan bir çalışmada, çeşitli mikroorganizmalara ve özellikle *S. mutans*'a karşı antimikrobiyal özellikler göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde, grafen nanoplatelet ile hücreler arasında güçlü bir mekanik bağın var olduğu görülmüştür. Bu bağ sayesinde hücrelerin küçülmesi ve yakalanması ile mikroorganizmaların yok edilmesinin sağlandığı düşünülmüştür.

Karbon nanotüpleri bakteri membranına penetre olabilir, bu nedenle gelişmiş antimikrobiyal özellikler gösterir.⁸

Gümüş nanopartikülleri yüzey alanlarının geniş ve boyutlarının küçük olması nedeniyle bakteri hücre zarına kolayca nüfuz edebilir ve hızlı bakterisidal etkiye neden olur, antibakteriyel etkileri uzun süre devam eder. Özellikle *E. faecalis*'e karşı efektif antimikrobiyal ajan olarak kullanılabilir. Biyouyumludur ve düşük toksisite gösterir. Dezavantaj olarak renk değişikliği yapmasından dolayı anterior dişlerin tedavisinde kullanılamaması sayılabilir.^{8,48,49} Afkhami ve ark.⁵⁰ tarafından yapılan bir çalışmada, 100 ppm gümüş nanopartikülleri içeren irrigasyon süspansiyonu özellikleri, konvansiyonel olarak kullanılan %2.5 sodyum hipoklorit (NaOCl) ile karşılaştırılmış ve benzer antimikrobiyal etkinlikte oldukları gözlenmiştir. Chan ve ark.'nın⁵¹ yaptığı bir çalışmada, gümüş nanopartikülleri içeren bir irrigasyon solüsyonu hazırlanmış ve irrigan olarak kullanımının sitotoksik etkisi araştırılmıştır. Nano-gümüş partiküllü endodontik irrigasyon solüsyonunun hem insan periodontal ligament kök hücresine hem de fare fibroblastlarına sitotoksik olmadığı gözlemlenmiştir. Bu hücrelerin NaOCl'ye ve gümüş nanopartiküllü çözeltiye maruz kalmaya karşı sağ kalımları benzer bulunmuştur. Nanogümüş partikülleri içeren irrigasyon solüsyonunun etkinliğinin değerlendirildiği başka bir çalışmada, gümüş nanopartikülleri, etanol ve sodyum hidroksit bileşenleri kullanılarak yeni bir irrigasyon solüsyonu elde edilmiştir. Bu solüsyon konsantrasyonu %5.25 olan NaOCl ile karşılaştırıldığında, gümüş nanopartikül içerikli irrigasyon solüsyonunun hem *E. faecalis* hem de *S. aureus* eliminasyonunda NaOCl kadar etkili olduğu sonucuna varılmıştır.⁵²

Kitosan, kitinin deasetillenmiş bir türevidir ve kimyasal olarak modifiye edilebilir. Bol bulunan doğal bir biyopolimerdir. Kitosan nanopartikülleri yüksek pH'a sahiptir, alkali suda ve organik çözücülerde inaktiftir ve çözünmezler. Mükemmel antibakteriyel, antifungal ve antiviral özellikler gösterir. Kitosan, kök kanalı ve dentin tübüllerine nüfuz ederek uzun süreli antimikrobiyal etki sağlar.⁸ Barreras ve ark.⁵³ *in vitro* çalışmalarında, *E. faecalis*'i kanallardan uzaklaştırmak için klorheksidin (CHX) ile birlikte kitosan nanopartikülleri kullanmışlardır ve enfekte olmuş kollajen membranlarda önemli ölçüde daha yüksek bakteriyel inhibisyon görülmüştür.

Savitha ve ark.'nın⁵⁴ yaptığı bir çalışmada kitosan, CHX glukonat ve bu ikisinin karışımının, yenilenen kanal tedavisi vakalarında kanal içi ilaç olarak kullanımı değerlendirilmiştir. CHX ile kitosan kombinasyonu, *E. faecalis*'e karşı en yüksek sinerjik antibakteriyel etkiye sahip olduğu ve başarısız endodontik prosedürlerde kanal içi ilaç olarak kullanılabileceği bulunmuştur.

Değiştirilmiş konsantrasyonlarda SiO₂, Na₂O ve P₂O₅, biyoaktif cam bazlı nanopartiküllerin ana bileşenlerini oluşturur. Boyutları 20 ila 60 nm arasında değişmektedir. Alkali pH değerleri ve ozmotik etkilerinden dolayı antibakteriyel özellikleri vardır. Kalsiyum-fosfat çökeltisi oluşturma etkileriyle demineralize mine yüzeyinin remineralizasyonunu sağlarlar.⁸

Mezoporöz kalsiyum silikatlar, 80 ila 100 nm arasında değişen boyutlarda, yüksek spesifik yüzey alanına ve gözenek hacmi oranına sahip nanopartiküllerdir. Endodontideki avantajları antibakteriyel verimlilik, enjekte edilebilirlik, apatit mineralizasyonu, osteo-stimülasyon ve ilaç dağıtım sistemlerinde kullanılabilmeleri olarak sıralanabilir. Bu nanopartiküllerin, doğada oldukça viskoz olmaları nedeniyle kök kanallarının apikal üçte birinin doldurulmasında kullanımı bulunmaktadır.^{8,55} Hidroksiapatit nanopartiküller endodontide çok kullanılsa da tıp ve diş hekimliği alanında yaygın olarak kullanılır. Hidroksiapatit nanopartiküllerinin ana işlevi, dentin tübüllerine entegre olmak ve bu tübüllerin açıklıklarını kapatarak sinirlerin dış uyaranlara maruz kalmasını önlemeye yardımcı olmaktır. Bu nedenle hidroksiapatit nanopartiküllerinin dentin aşırı duyarlılığını azaltmada uygulaması bulunur.⁸ Bu nanokristaller, demineralize mine yüzeyinin remineralize edilmesine yardımcı olan çeşitli diş macunlarında ve ağız gargaralarında bulunur.⁵⁶ Hidroksiapatit, kemiğe bağlanabilen ve böylece herhangi bir lokal veya sistemik enflamatuar reaksiyonu azaltabilen biyouyumlu bir materyaldir. Böylece periapikal iyileştirici ajan olarak kullanılabilir.^{56,57} Hosseinzade ve ark.'nın⁵⁸ çeşitli simanların fizyokimyasal özellikleri üzerine yürüttüğü bir çalışmada, Mineral Trioksit Agregat (MTA), zengin kalsiyum içeriğine sahip bir siman olan Calcium Enriched Mixture (CEM), kalsiyum fosfat hidroksiapatit ve nano hidroksiapatit-kitosan simanlar incelenmiştir. Simanların örnek diskleri simüle edilmiş vücut sıvısı çözeltisine daldırılmış ve pH ölçümü yapılmıştır. Hidroksiapatit ve nano hidroksiapatit-kitosan simanları çözeltiyi nötralize etmiş (pH=7), CEM ve MTA çözeltiyi bazik hale getirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, pH değerlerine göre CEM ve nano hidroksiapatit kitosanın daha uygun biyoaktif özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.

Silika nanopartiküllerinin, endodontiden çok konservatif diş hekimliği alanında kullanımı mevcuttur. Bu nanopartiküller, düşük toksisite ve yoğunluk seviyelerine, mükemmel biyouyumluluğa ve geniş yüzey alanına sahiptir. Çeşitli restoratif malzemelerde doldurucu olarak ve ayrıca polisajlanacak yüzeyde

daha düşük pürüzlülüğe neden olma kabiliyeti nedeniyle polisaj ajanı olarak kullanılabilirler.^{8,59}

Demir bileşiği nanopartikülü antimikrobiyal özellikleri nedeniyle kullanılabilir. Endodontik biyofilmlerin eliminasyonunda antibiyotik kullanımı, antibiyotiklere ve bazı immünolojik hücrelere geçirgen olmayan ekzopolimerlerin üretimi nedeniyle zordur. Böylece demir bazlı nanopartiküller bu mikroorganizmaların tamamen ortadan kaldırılmasında rol oynar. Demir oksit nanopartikülleri, dental implantlarda bulunan biyofilmin yok edilmesi amacı ile de kullanılabilir.^{8,60}

Kimyasal bir oksit olan zirkonya (ZrO_2), dişe benzer optik ve metalik özellikleri nedeniyle diş hekimliğinde oldukça fazla kullanılmıştır. ZrO_2 'nin yüksek sertliği, mukavemeti, korozyon direnci ve mükemmel kimyasal özellikleri nedeniyle yüksek performanslı bir seramik malzeme olduğu kanıtlanmıştır. Suda çözünmediği için sitotoksik etkisi düşüktür. Bakteriyel kolonizasyona karşı etkilidir.^{8,61,62} ZrO_2 bazlı nanopartiküller, *E. faecalis* gibi spesifik mikroorganizmalara karşı oldukça güçlüdür ve bu nedenle endodontide anti-mikrobiyal bir ajan olarak kullanılmaktadır.⁶³ Tanamaru ve ark.⁶⁴ çalışmalarında, ZrO_2 nanopartiküllerinin MTA'nın ana bileşeni olan Portland çimentosuna biyoyumluluğunu olumsuz yönde etkilemeden takviye edilerek etkili bir radyopaklaştırıcı olarak kullanılabileceğini bulmuşlardır. İki grup olarak mikro ve nano boyutlu ZrO_2 partikülü test edilmiş ve her iki grup da ISO/ADA standartları tarafından önerildiği gibi 3 mm Al'ye eşdeğer gelişmiş radyopatisite özelliği göstermiştir.

Titanyum dioksit nanopartikülleri, kendi kendini temizleyebilen, stabil parçacıklardır. Fotokatalitik özelliklere sahiptirler ve ultraviyole ışına maruz kaldıklarında reaktif oksijen türlerinin oluşumunu tetikleyerek hücrede oksidatif strese neden olurlar. Lipid peroksidasyonu özelliğinden dolayı membran akışkanlığını ve buna bağlı olarak membran geçirgenliğini artırarak bakteriyel hücre zarına zarar verirler. Ayrıca flukonazole dirençli suşlar için etkili bir antifungal olarak kullanılırlar.^{8,65}

Magnezyum oksit (MgO) ve kalsiyum oksit (CaO) nanopartiküllerinin hem gram-pozitif hem de gram-negatif mikroorganizmalara karşı etkili olduğu bulunmuştur. Hücre zarının bozulması, hücre içi içeriğin sızması ve sonunda hücre ölümüne yol açarak antibakteriyel etkinlik gösterirler.⁸ Kishen ve ark.⁶⁶ tarafından yapılan bir çalışmada, *E. faecalis*'in eradikasyonunda uzun süreli etkinliklerini araştırmak için %5.25 NaOCl, 5 mg/L konsantrasyonunda MgO nanopartikülleri ve kitosan nanopartikülleri karşılaştırılmaktadır. Hem MgO hem de kitosan nanopartiküllerinin, altın standart %5.25 NaOCl ile karşılaştırılabilir veya üstün sonuçlar gösterdiği sonucuna varılmıştır. Monzavi ve ark.⁶⁷'nin nano MgO içerikli irrigasyon solüsyonunun endodontik patojenleri ortadan kaldırmadaki etkisini değerlendirmek için yaptığı bir çalışmada, solüsyonun antimikrobiyal etkinliği, NaOCl ve CHX glukonatin antimikrobiyal etkinliği ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 5 mg/L konsantrasyona

sahip nano MgO içerikli solüsyonun, %5.25 NaOCl'e kıyasla *E. faecalis*'in uzaklaştırılmasında uzun vadede daha etkili olduğunu göstermiştir.

Bakır oksit nanopartikülleri, bakterilerin hücre zarını geçebilirler. Bakteriyel enzimlere zarar vererek hem gram-pozitif hem de gram-negatif bakterilere karşı antibakteriyel etki sağlarlar. Ayrıca bazı antifungal özelliklere sahiptirler.⁸ Bakır, kolay temin edilebilir ve düşük maliyetli bir materyaldir. Bakır nanopartikülleri kimyasal olarak sentezlenebilir ya da bakırın açık havada ve suda oksitlenebilme özelliği ile doğal yollardan bakır oksit nanopartikülleri elde edilebilir.⁶⁸ Bakır elementinin mezenkimal hücrelerin osteojenik farklılaşmasını indükleyebildiği düşünülmektedir.⁶⁹ Bakırın bu özelliğine dayanarak Karkehabadi ve ark.⁷⁰, bakır oksit nanopartiküllerinin ve light-emitting diode (LED) kullanımının apikal papilla kök hücrelerinin osteojenik/odontojenik farklılaşması üzerine etkisini araştırmışlardır. LED ve bakır oksit nanopartiküllerinin birlikte kullanımı, sadece LED kullanımı ve kontrol gruplarıyla karşılaştırıldığında gen ekspresyonunu önemli ölçüde artırmıştır.

Çinko oksit nanopartikülleri, bakteriler ve mantarlar üzerinde geniş antimikrobiyal etkilere sahip biyoyumlu materyallerdir. Çinko oksit nanopartiküllerinin antibakteriyel özellikleri, partiküllerin boyutlarına, şekillerine, çözünürlüklerine, yüzey yüklerine ve konsantrasyonlarına göre değişir. Yüzey alanı arttıkça antibakteriyel özellikleri artar.⁷¹ Javidi ve ark.⁷² bir çalışmalarında nano çinko oksit tozu içeren pat kullanmış ve sızıntısını AH26 ve mikro boyutlu çinko oksit tozu içeren öjenol pat ile karşılaştırmıştır. Çalışmada nano çinko oksit tozu içeren pat grubu kalsinasyon sıcaklığına göre 500 °C, 600 °C ve 700 °C olarak 3 grupta incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça nano partikül boyutlarında artış meydana gelmiş, bu da mikrosızıntıyı artırmıştır. Minimum mikrosızıntı, 500 °C'de kalsine edilmiş nano-tozlarda meydana gelmiştir. Yine de sonuçlar nano çinko oksit tozlarının, araştırılan diğer dolgu patları arasında en düşük mikro sızıntıya sahip olduğunu göstermiştir; sonuç olarak bu tip patlar kanal tedavisi için uygun bulunmuştur. Parçacık boyutundaki artış, efektif yüzeyin azalmasına neden olduğundan, sızıntıyı önlemek için daha küçük boyuttaki nano parçacıklar daha uygundur.

Lee ve ark.⁷³ endodontide yaygın kullanılan bir dolum materyali olan gütaperkayı (GP) modifiye etmek için nano elmas kullanmışlardır. Nano elmaslar, çapı yaklaşık 4-6 nm olan karbon nanopartikülleridir. Malzemelerin karakterizasyonu, nano elmasların kullanılmasının GP'nin mekanik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. En yüksek stres noktasından elde edilen sonuçlara göre çekme dayanımları modifiye edilmemiş GP'de 7 MPa, ağırlıkça %5 nano elmaslı GP'de 12 MPa ve ağırlıkça %10 nano elmaslı GP'de 19 MPa olmuştur.

Nano girinti testi, materyallerin sertliğini ölçmek için bir yöntemdir. Vickers veya Martens testleri gibi sadece tek bir karakteristik değeri belirleyebilen klasik sertlik

ölçüm yöntemlerinin aksine, nano-girinti tekniği birkaç malzemeye özgü parametrenin çok kesin, derinliğe bağlı bir ölçümünü gösterebilir. Jamleh ve ark.⁷⁴ endodontide kullanılan nikel-titanyum (NiTi) eğeler üzerinde döngüsel yorgunluğun etkisini araştırmak için nano-girinti testi uygulamışlardır. Çalışma, bahsedilen tekniğin NiTi aletlerinin hata mekanizmasını değerlendirmek için uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

SONUÇ

Nano diş hekimliği, nanoteknolojinin yeni bir uygulama alanıdır. Nanopartiküllerin diş hekimliği alanında kullanılabilmesi için fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Nanopartiküllerin *in vivo* davranışı, *in vitro* ortamdan oldukça farklıdır. Bu yüzden bu materyallerin *in vivo* sitotoksitesinin ve biyoyumluluklarının araştırılması gerekmektedir.^{3,32}

Endodontik tedavi bakteri eliminasyonunun ön planda olduğu ve çok çeşitli materyallerin kullanıldığı kompleks bir tedavidir. Bu nedenle endodontide kullanılan materyellerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Yeni geliştirilen nanopartiküllerin diş hastalıklarının tanı ve tedavisinde kullanımı güçlü potansiyel barındırmaktadır. Nano diş hekimliği sürekli gelişmekte olan bir alandır ve bu gelişmelerin endodontik tedaviyi de içeren dental tedavilerin başarısını artıracığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Dağlıoğlu Y, Yavuz MC. Dişhekimliğinde nanoteknoloji ve uygulamaları. EÜ Dişhek Fak Derg 2020;41:149-60.
- Kaehler T. Nanotechnology: basic concepts and definitions. Clin Chem 1994;40:1797-9.
- Özdemir O, Kopac T. Recent Progress on the Applications of Nanomaterials and Nano-Characterization Techniques in Endodontics: A Review. Materials 2022;15:5109.
- Allhoff F. On the autonomy and justification of nanoethics. Nanoethics 2007;1:185-210.
- Bayda S, Adeel M, Tuccinardi T, Cordani M, Rizzolio F. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. Molecules 2019;25:112.
- European Commission. Commission recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial. J Eur Union 2011;275:38-40.
- National Nanotechnology Initiative. Nanotechnology: Big Things from a Tiny World [Internet]. Alexandria (VA): National Nanotechnology Coordination Office; c2018 [cited 2023 Mar 30]. Available from: <https://www.nano.gov/big-things-from-a-tiny-world>.
- Raura N, Garg A, Arora A, Roma M. Nanoparticle technology and its implications in endodontics: a review. Biomater Res 2020;24:21.
- Freitas RA Jr. Nanodentistry. J Am Dent Assoc 2000;131:1559-65.
- Taniguchi N. On the basic concept of 'nano-technology'. Proceedings of the International Conference of Production Engineering; 1974; Tokyo, Japan.
- Drexler EK, Peterson C, Pergamit G. Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution. 1st ed. New York: William Morrow and Company; 1991.
- Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 1991;354:56-8.
- Neoh KG, Li M, Kang ET. Characterization of Nanomaterials/ Nanoparticles. In: Kishen A, editor. Nanotechnology in endodontics: current and potential clinical applications. 1st ed. Switzerland: Springer Cham; 2015. p. 23-44.
- Bhushan J, Maini C. Nanoparticles: a promising novel adjunct for

dentistry. Indian J Dent 2019;11:167-73.

- Kim YH, Lee DK, Cha HG, Kim CW, Kang YC, Kang YS. Preparation and characterization of the antibacterial Cu nanoparticle formed on the surface of SiO₂ nanoparticles. J Phys Chem B 2006;110:24923-8.
- Wang D, Lin Z, Wang T, Yao Z, Qin M, Zheng S, *et al*. Where does the toxicity of metal oxide nanoparticles come from: the nanoparticles, the ions, or a combination of both? J Hazard Mater 2016;308:328-34.
- Nel A, Xia T, Madler L, Li N. Toxic potential of materials at the nanolevel. Science 2006;311:622-7.
- Lynch I, Dawson KA. Protein-nanoparticle interactions. Nano Today 2008;3:40-7.
- Aggarwal P, Hall JB, McLeland CB, Dobrovolskaia MA, McNeil SE. Nanoparticle interaction with plasma proteins as it relates to particle biodistribution, biocompatibility and therapeutic efficacy. Adv Drug Deliv Rev 2009;61:428-37.
- Giannousi K, Lafazanis K, Arvanitidis J, Pantazaki A, Dendrinos-Samara C. Hydrothermal synthesis of copper based nanoparticles: Antimicrobial screening and interaction with DNA. J Inorg Biochem 2014;133:24-32.
- Arakha M, Pal S, Samantarai D, Panigrahi TK, Mallick BC, Pramanik K, *et al*. Antimicrobial activity of iron oxide nanoparticle upon modulation of nanoparticle-bacteria interface. Sci Rep 2015;5:14813.
- Kirstein J, Turgay K. A new tyrosine phosphorylation mechanism involved in signal transduction in *Bacillus subtilis*. J Mol Microbiol Biotechnol 2005;9:182-8.
- Shrivastava S, Bera T, Roy A, Singh G, Ramachandrarao P, Dash D. Characterization of enhanced antibacterial effects of novel silver nanoparticles. Nanotechnology 2007;18:225103.
- Chen WJ, Chen YC. Fe₃O₄/TiO₂ core/shell magnetic nanoparticle-based photokilling of pathogenic bacteria. Nanomedicine (Lond) 2010;5:1585-93.
- Hall JB, Dobrovolskaia MA, Patri AK, McNeil SE. Characterization of nanoparticles for therapeutics. Nanomedicine (Lond) 2007;2:789-803.
- Zhang L, Gu FX, Chan JM, Wang AZ, Langer RS, Farokhzad OC. Nanoparticles in medicine: therapeutic applications and developments. Clin Pharmacol Ther 2008;83:761-9.
- Sampathkumar SG, Yarema KJ. Dendrimers in cancer treatment and diagnosis. Nanotechnol Life Sci. In: Kumar CSSR, editor. Nanomaterials for Cancer Diagnosis. Weinheim: Wiley-VCH; 2007. Vol 7. p. 1-43.
- Patil M, Mehta DS, Guvva S. Future impact of nanotechnology on medicine and dentistry. J Indian Soc Periodontol 2008;12:34-40.
- European Science Foundation Policy Briefing. ESF Scientific Forward Look on Nanomedicine. France: European Science Foundation; 2005 Feb.
- Freitas RA Jr. Nanotechnology, nanomedicine and nanosurgery. Int J Surg 2005;3:243-6.
- Gupta J. Nanotechnology applications in medicine and dentistry. J Invest Clin Dent 2011;2:81-8.
- Roig-Soriano X, Souto EB, Elmsari F, Garcia ML, Espina M, Duran-Sindreu F, *et al*. Nanoparticles in Endodontics Disinfection: State of the Art. Pharmaceutics 2022;14:1519.
- Zakrzewski W, Dobrzynski M, Dobrzynski W, Zawadzka-Knefel A, Janecki M, Kurek K, *et al*. Nanomaterials Application in Orthodontics. Nanomaterials (Basel). 2021;28:337.
- Chandki R, Kala M, Kumar KN, Brigit B, Banthia P, Banthia R. 'Nanodentistry': exploring the beauty of miniature. J Clin Exp Dent 2012;4:e119-24.
- Le Guéhennec L, Soueidan A, Layrolle P, Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. Dent Mater 2007;23:844-54.
- Jain KK. Nanodiagnostics: application of nanotechnology in molecular diagnostics. Expert Rev Mol Diagn 2003;3:153-61.
- Pauwels EK, Kairemo K, Erba P, Bergstrom K. Nanoparticles in cancer. Curr Radiopharm 2008;1:30-6.
- Kanaparthi R, Kanaparthi A. The changing face of dentistry: nanotechnology. Int J Nanomedicine 2011;6:2799-804.

39. Jhaveri HM, Balaji PR. Nanotechnology: The future of dentistry. *J Indian Prosthodont Soc* 2005;5:15-7.
40. Schleyer TL. Nanodentistry: Fact or fiction? *J Am Dent Assoc* 2000;131:1567-8.
41. Sujatha V, Suresh M, Mahalaxmi S. Nanorobotics-A futuristic approach. *SRM Univ J Dent Sci* 2010;1:86-90.
42. Aeran H, Kumar V, Uniyal S, Tanwer P. Nanodentistry: Is just a fiction or future. *J Oral Biol Craniofacial Res* 2015;5:207-11.
43. Arora R, Kapoor H. Nanotechnology in Dentistry - Hope or hype. *OHDM* 2014;13:928-33.
44. Dasgupta D, Peddi S, Saini DK, Ghosh A. Mobile Nanobots for Prevention of Root Canal Treatment Failure. *Adv Healthc Mater* 2022;11:e2200232.
45. Guo X, Sun Y, Wang Z, Ren B, Xu HHK, Peng X, *et al.* The Preventive Effect of A Magnetic Nanoparticle-Modified Root Canal Sealer on Persistent Apical Periodontitis. *Int J Mol Sci* 2022;23:13137.
46. Zakrzewski W, Dobrzyński M, Zawadzka-Knefel A, Lubojański A, Dobrzyński W, Janecki M, *et al.* Nanomaterials Application in Endodontics. *Materials* 2021;14:5296.
47. Rago I, Bregnocchi A, Zanni E, D'Aloia AG, De Angelis F, Bossu M, *et al.* Antimicrobial activity of graphene nanoplatelets against *Streptococcus mutans*. 2015 IEEE 15th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO); 2015 July 27-30; Rome, Italy. *IEEE*; 2015. p. 9-12.
48. Slenters TV, Hauser-Gerspach I, Daniels AU, Fromm KM. Silver coordination compounds as light-stable, nano-structured and anti-bacterial coatings for dental implant and restorative materials. *J Mater Chem* 2008;18:5359-62.
49. Percival SL, Bowler PG, Russell D. Bacterial resistance to silver in wound care. *J Hosp Infect* 2005;60:1-7.
50. Afkhami F, Akbari S, Chiniforush N. *Enterococcus faecalis* elimination in root canals using silver nanoparticles, photodynamic therapy, diode laser, or laser-activated nanoparticles: an *in vitro* study. *J Endod* 2017;43:279-82.
51. Chan EL, Zhang C, Cheung GS. Cytotoxicity of a novel nano-silver particle endodontic irrigant. *Clin Cosmet Investig Dent* 2015;7:65-74.
52. Moghadas L, Narimani T, Shahmoradi M. Antimicrobial activity of a new nanobased endodontic irrigation solution: *in vitro* study. *Dent Hypotheses* 2012;3:142-6.
53. Barreras US, Méndez FT, Martínez REM, Valencia CS, Rodríguez PRM, Rodríguez JPL. Chitosan nanoparticles enhance the antibacterial activity of chlorhexidine in collagen membranes used for periapical guided tissue regeneration. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 2016;58:1182-7.
54. Savitha A, SriRekha A, Vijay R, Ashwija, Champa C, Jaykumar T. An *in vivo* comparative evaluation of antimicrobial efficacy of chitosan, chlorhexidine gluconate gel and their combination as an intracanal medicament against *Enterococcus faecalis* in failed endodontic cases using real time polymerase chain reaction (qPCR). *Saudi Dent J* 2019;31:360-6.
55. Wu C, Chang J, Fan W. Bioactive mesoporous calcium-silicate nanoparticles with excellent mineralization ability, osteostimulation, drug-delivery and antibacterial properties for filling apex roots of teeth. *J Mater Chem* 2012;22:16801-9.
56. Hannig M, Hannig C. Nanomaterials in preventive dentistry. *Nat Nanotechnol* 2010;5:565-9.
57. Khetawat S, Lodha S. Nanotechnology (Nanohydroxyapatite Crystals): Recent Advancement in Treatment of Dental Hypersensitivity. *J Interdiscipl Med Dent Sci* 2015;3:181.
58. Hosseinzade M, Soflou RK, Valian A, Nojehdehian H. Physicochemical properties of MTA, CEM, hydroxyapatite and nano hydroxyapatite-chitosan dental cements. *Biomed Res* 2016;27:442-8.
59. Priyadarsini S, Mukherjee S, Mishra M. Nanoparticles used in dentistry: A review. *J Oral Biol Craniofac Res* 2018;8:58-67.
60. Sathyanarayanan MB, Balachandranath R, Srinivasulu YG, Kannaiyan SK, Subbiahdoss G. The effect of gold and iron-oxide nanoparticles on biofilm-forming pathogens. *ISRN Microbiol* 2013;2013:272086.
61. Lugh V, Sergio V. Low temperature degradation -aging- of zirconia: A critical review of the relevant aspects in dentistry. *Dent Mater* 2010;26:807-20.
62. Ramesh TR, Gangaiah M, Harish PV, Krishnakumar U, Nandakishore B. Zirconia Ceramics as a Dental Biomaterial - An Overview. *Trends Biomater Artif Organs* 2012;26:154-60.
63. Hu C, Sun J, Long C, Wu L, Zhou C, Zhang X. Synthesis of nano zirconium oxide and its application in dentistry. *Nanotechnol Rev* 2019;8:396-404.
64. Guerreiro-Tanomaru JM, Trindade-Junior A, Costa BC, da Silva GF, Drullis Cifali L, Basso Bernardi MI, *et al.* Effect of zirconium oxide and zinc oxide nanoparticles on physicochemical properties and antibiofilm activity of a calcium silicate-based material. *ScientificWorldJournal* 2014;2014:975213.
65. Lubojanski A, Dobrzynski M, Nowak N, Rewak-Soroczynska J, Sztylek K, Zakrzewski W, *et al.* Application of Selected Nanomaterials and Ozone in Modern Clinical Dentistry. *Nanomaterials (Basel)* 2021;11:259.
66. Kishen A, Shi Z, Shrestha A, Neoh KG. An Investigation on the Antibacterial and Antibiofilm Efficacy of Cationic Nanoparticulates for Root Canal Disinfection. *J Endod* 2008;34:1515-20.
67. Monzavi A, Eshraghi S, Hashemian R, Momen-Heravi F. *In vitro* and *ex vivo* antimicrobial efficacy of nano-MgO in the elimination of endodontic pathogens. *Clin Oral Investig* 2015;19:349-56.
68. Keskin NB, Aydın ZU, Uslu G, Özyürek T, Erdönmez D, Gündoğar M. Antibacterial efficacy of copper-added chitosan nanoparticles: a confocal laser scanning microscopy analysis. *Odontology* 2021;109:868-73.
69. Eivazzadeh-Keihan R, Bahojb Noruzi E, Khanmohammadi Chenab K, Jafari A, Radinekiyan F, Hashemi SM, *et al.* Metal-based nanoparticles for bone tissue engineering. *J Tissue Eng Regen Med* 2020;14:1687-714.
70. Karkehabadi H, Rahmati A, Abbasi R, Farmany A, Najafi R, Behroozi R, *et al.* Effect of copper oxide nanoparticles and light-emitting diode irradiation on the cell viability and osteogenic/odontogenic differentiation of human stem cells from the apical papilla. *BMC Oral Health* 2023;23:249.
71. Moradpoor H, Safaei M, Mozaffari HR, Sharifi R, Imani MM, Golshah A, *et al.* An overview of recent progress in dental applications of zinc oxide nanoparticles. *RSC Adv* 2021;11:21189-206.
72. Javidi M, Zarei M, Naghavi N, Mortazavi M, Nejat AH. Zinc oxide nano-particles as sealer in endodontics and its sealing ability. *Contemp Clin Dent* 2014;5:20-4.
73. Lee DK, Kim SV, Limansubroto AN, Yen A, Soundia A, Wang CY, *et al.* Nanodiamond-Gutta Percha Composite Biomaterials for Root Canal Therapy. *ACS Nano* 2015;9:11490-501.
74. Jamleh A, Sadr A, Nomura N, Yahata Y, Ebihara A, Hanawa T, *et al.* Nano-indentation testing of new and fractured nickel-titanium endodontic instruments. *Int Endod J* 2012;45:462-8.

The use of nanomaterials in endodontics

ABSTRACT

Nanotechnology is defined as a field that encompasses the production and use of nano-sized structures. With advances in technology, nanomaterials have become increasingly used in dentistry applications. Materials at the nano-scale can exhibit different and advanced properties, which have been utilized for diagnostic or therapeutic purposes in medicine and dentistry, with promising results. Nanoparticles, which are used in every field of dentistry, are also used for many purposes in the field of endodontics. Nanoparticles can be added to many materials used in root canal treatment due to their antibacterial properties. Nanotechnology can also be utilized in sealers, obturation and filling materials, root repair materials, intra-canal medication

or disinfection applications, coating dental instruments, pulp regeneration, and nano-testing of structures. Studies have shown that nanotechnology has brought many new materials and techniques to the field of dentistry, including endodontics. Nano-dentistry is a continuously developing field, and it is believed that

these developments will increase the success of dental treatments, including endodontic therapy. This article discusses the use of nanotechnology and nanomaterials in endodontic applications and provides examples.

KEYWORDS: Disinfection; endodontics; nanoparticles; nanotechnology; root canal filling materials