



Review Article / Derleme Makalesi

## Properties and Biomedical Applications of Carbon Nanotubes

## Karbon Nanotüplerin Özellikleri ve Biyomedikal Kullanımları

**Muhammed Sait ÖZONAY<sup>a</sup>, Özgür TOPGİDER<sup>b\*</sup>**<sup>a</sup>Mardin Artuklu Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Mardin, Türkiye, [musaaid47@hotmail.com](mailto:musaaid47@hotmail.com)ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0824-833X><sup>b</sup>Mardin Artuklu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı, Mardin, Türkiye, [daraozgur@gmail.com](mailto:daraozgur@gmail.com)ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4277-4170>\*Corresponding Author / İletişimden sorumlu yazar, E-mail: [daraozgur@gmail.com](mailto:daraozgur@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 06.08.2025

Accepted: 28.08.2025

Published: 01.03.2026

#### Keywords:

Biomedical applications

Biosensors; cancer therapy

Carbon nanotubes

Drug delivery

### ABSTRACT

Carbon nanotubes possess unique chemical, physical, and biological properties that make them highly suitable for a variety of applications, particularly in industrial and biomedical fields. They exhibit excellent electrical and thermal conductivity, high biocompatibility, flexibility, corrosion resistance, nanometer-scale dimensions, and a large surface area that can be functionalized and modified as needed. This study examines the primary areas and applications of carbon nanotubes in biomedical contexts, drawing on scholarly research published within the last ten years. It discusses the structural characteristics and types of carbon nanotubes, along with their synthesis in tissue engineering and bioengineering, drug delivery systems, biocompatibility, cancer therapy, biosensing, and diagnostic applications. The remarkable properties of carbon nanotubes position them as a transformative force in the biomedical field. Their exceptional thermal conductivity, coupled with high biocompatibility and flexibility, makes them invaluable for various applications, from tissue engineering to advanced drug delivery systems. The nanometer-scale dimensions and extensive surface area enable targeted functionalization, enhancing their effectiveness in cancer therapy and biosensing. As researchers continue to explore innovative synthesis methods, the potential for carbon nanotubes to revolutionize diagnostics and therapeutic strategies becomes increasingly evident. Embracing these unique materials could lead to significant advancements in healthcare, ultimately improving patient outcomes and paving the way for a new era of medical innovation.

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş Tarihi: 06.08.2025

Kabul Tarihi: 28.08.2025

Yayın Tarihi: 01.03.2026

#### Anahtar Kelimeler:

Biyomedikal uygulamalar

Biyosensörler

Kanser tedavisi

Karbon nanotüpler

İlaç dağıtımı

### ÖZET

Karbon nanotüpler, özellikle endüstriyel ve biyomedikal alanlarda olmak üzere çeşitli uygulamalar için son derece uygun olmalarını sağlayan benzersiz kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklere sahiptir. Mükemmel elektriksel ve termal iletkenlik, yüksek biyouyumluluk, esneklik, korozyon direnci, nanometre ölçeğinde boyutlar ve gerektiğinde fonksiyonelleştirilebilen ve değiştirilebilen geniş bir yüzey alanı sergilerler. Bu çalışma, son on yılda yayınlanmış akademik araştırmalara dayanarak, karbon nanotüplerin biyomedikal bağlamlardaki temel alanlarını ve uygulamalarını incelemektedir. Karbon nanotüplerin yapısal özellikleri ve türlerinin yanı sıra, doku mühendisliği ve biyomühendislik, ilaç taşıyıcı sistemler, biyouyumluluk, kanser tedavisi, biyosensör ve teşhis uygulamalarındaki sentezlerini ele almaktadır. Karbon nanotüplerin dikkat çekici özellikleri, onları biyomedikal alanda dönüştürücü bir güç haline getirmektedir. Olağanüstü termal iletkenlikleri, yüksek biyouyumluluk ve esneklikleriyle bir araya gelerek, doku mühendisliğinden gelişmiş ilaç taşıyıcı sistemlere kadar çeşitli uygulamalar için paha biçilmez hal almaktadır. Nanometre ölçeğindeki boyutları ve geniş yüzey alanı, hedefli fonksiyonelleştirmeye olanak tanıyarak kanser tedavisi ve biyosensör uygulamalarındaki etkinliklerini artırmaktadır. Araştırmacılar yenilikçi sentez yöntemlerini keşfetmeye devam ettikçe, karbon nanotüplerin teşhis ve tedavi stratejilerinde devrim yaratma potansiyeli giderek daha belirgin hal almaktadır. Bu benzersiz malzemelerin benimsenmesi, sağlık hizmetlerinde önemli ilerlemelere yol açabilir, nihayetinde hasta sonuçlarını iyileştirebilir ve yeni bir tıbbi inovasyon çağının önünü açabilir.

## 1. Giriş

En uyumlu elementlerden biri olan karbon, sp, sp<sup>2</sup> veya sp<sup>3</sup> hibridizasyonu sayesinde farklı özelliklere sahip birden fazla allotrop yapıya sahiptir. Bu özellikler, birkaç nanometreden yüzlerce milimetreye kadar çok çeşitli yapıların oluşturulmasını sağlar. Nanoteknoloji alanı, nanometre ölçeğinde üretilebilen ve tanımlanabilen karbon bileşikleriyle ilgilenmektedir. Karbon nanomalzemeler, yüksek özgül yüzey alanı, yüksek taşıyıcı hareketliliği, yüksek elektriksel iletkenlik, esneklik ve optik şeffaflık gibi benzersiz özelliklere sahiptir (Speranza ve ark. 2021; Murjani vd., 2022). Fullerenler, grafen, karbon nanotüpler ve bunların türevleri, nanoelmaslar, grafen oksit ve karbon bazlı kuantum noktaları, karbon bazlı nanomalzemelere örnektir (Patel vd., 2019; Tiwari et al., 2022). Araştırmacılar tarafından tasarlanan özel kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklere sahip yeni bir nanomalzeme sınıfı, karbon nanotüpler (CNT'ler) ile temsil edilir. Tüm karbon nanotüpler (CNT'ler) silindirik bir forma sahiptir ve karbon allotropu olarak kabul edilebilir. CNT'ler, kendine özgü form ve morfolojilerinin yanı sıra olağanüstü elektriksel ve termal enerji iletkenliğine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle CNT'ler, biyoloji, kimya, elektronik ve optik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda çok çeşitli uygulamalar için mükemmel adaylardır (Saliev, 2019). Mükemmel iletkenliği, çeşitli biyosensör tiplerinde (enzim biyosensörleri, gen biyosensörleri, kanser biyosensörleri ve hava kirliliği biyosensörleri) kullanılmasını sağlar.

CNT'lerin hem organik hem de sulu taşıyıcılardaki çözünürlüğü/dağılılılığı, ilaç iletiminde temel endişe kaynağıdır çünkü topaklaşma ve çökme CNT'lerin özelliklerini etkiler. Yine de, CNT'lerin işlenmesinde fonksiyonelleştirmelerle dağılılılıkları artırılabilir. Biyoaktif moleküllerin ve hedef ligandların spesifik ve seçici konjugasyonu için çeşitli fonksiyonel gruplar sağlar, biyolojik dağılımlarını iyileştirir ve özellikle bölgeye özgü hedeflemeyi geliştirir (Prajapati vd., 2022). Fonksiyonelleştirme, özel ihtiyaçlara bağlı olarak kovalent olmayan (fizyoadsorpsiyon) veya kovalent (kimyasal bağ oluşumu) yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Alosime, 2023). CNT'lerin hem organik hem de sulu ortamlardaki çözünürlüğü, kullanılan malzemelere göre özelleştirilebilir ve işlevselleştirilebilir. CNT'ler, yüksek kimyasal reaktivite, daha iyi yüzey özellikleri gibi biyomalzemeler kullanılarak kolayca geliştirilebilen spesifik özellikleri nedeniyle kullanılır. Biyomalzemeler, CNT'ler gibi nanomalzemeler kullanılarak geliştirilir. Bu bağlamda kullanılan diğer nanomalzemeler arasında grafen ve grafenle ilişkili malzemeler vb. bulunur. Nükleik asit, protein ve peptitler gibi biyomoleküller, CNT'lerle etkileşime girerek işlevselleştirir

(kimyasal olarak değiştirir) ve biyomedikal uygulamalar için CNT'lerin özelliklerini iyileştirir. İnsan hücrelerinin CNT'ler üzerinde yetiştirildiği ve toksik olmadıkları bulunmuştur. Karbon nanotüpler (CNT'ler), iyi elektronik özellikler, hücre zarına son derece nüfuz etme kabiliyeti, yüksek ilaç yükleme ve pH'a bağlı terapötik kullanım, alım kapasiteleri, termal özellikler, geniş yüzey alanı ve moleküllerle sorunsuz modifikasyon gibi onları biyomedikal uygulamalarda iyi bir aday yapan dikkate değer özelliklere sahiptir ve bu da onları kullanışlı bir malzeme haline getirir (Jain & Tiwari, 2021). Raporlar, saf CNT'lere kıyasla yüzey fonksiyonlu CNT'lerin daha az toksik olduğunu açıkça göstermektedir. Ayrıca, hücreye özgü biyomoleküllerin kullanımıyla yapılan yüzey modifikasyonu, CNT'lerin hedefleme yeteneğini artırarak sistemik toksik etkilerini ve immünojenitelerini azaltmaktadır (Singh ve Kumar, 2022). Malzemelere bağlı olarak, CNT'lerin hem organik hem de sulu taşıyıcılardaki çözünürlüğü değiştirilebilir ve işlevselleştirilebilir. CNT'lerin güçlü kimyasal reaktiviteleri ve biyomalzemelerin uygulanmasıyla kolayca geliştirilebilen yüzeyleri gibi benzersiz özellikleri onları kullanışlı kılar. CNT'ler ve diğer nanomalzemeler biyomalzeme oluşturmak için kullanılır. Grafen ve grafene bağlı bileşikler bu bağlamda kullanılan diğer nanomalzemelerdir. Proteinler, peptitler ve nükleik asitler gibi biyomoleküller, karbon nanotüplerle (CNT'ler) etkileşime girerek onları işlevselleştirir (kimyasal olarak değiştirir) ve biyomedikal kullanım özelliklerini artırır. CNT'lerin zararsız olduğu ve insan hücreleri oluşturmak için kullanılacağı keşfedilmiştir. Karbon nanotüpler (CNT'ler), onları biyomedikal uygulamalarda kullanım için iyi bir aday haline getiren bir dizi benzersiz özelliğe sahiptir. Bunlar arasında yüksek ilaç yüklemesi ve pH'a bağlı terapötik kullanım, mükemmel elektronik özellikler, geniş yüzey alanı, moleküllerle kolay modifikasyon ve hücre zarına yüksek derecede penetrasyon yer alır. Son çalışmalar, COVID-19 ve Ebola virüsü de dahil olmak üzere kanser ve virüsleri tedavi etmek için karbon nano yapıların kullanımına odaklanmıştır. Son yıllarda, karbon nano yapıların viral tedavisinde kullanımı üzerine çok sayıda makale yayınlanmıştır. Bazı araştırmacılar, karbon nano yapıları biyolojik moleküllerle işlevselleştirip birleştirerek, karbon bazlı malzemeleri klinik ilaç uygulama uygulamalarına yaklaştırmayı denemişlerdir (Riley ve Narayan, 2021).

## 2. Karbon Nanotüplerin Yapısal Özellikleri

CNT'lerin etkinliği, yüksek yüzey alanı, mekanik özellikler ve nanoteknoloji gibi farklı yönlerden kendini göstermektedir. Çapları bir ila birkaç nanometre arasında değişen CNT'lerin boru şeklindeki

yapıları, nano olmayan homologlarına kıyasla benzersiz özellikler sunar. CNT'ler temelde elmas, grafit veya fullerenler gibi allotropik bir karbon formudur. İç geometri ve çap, üretim yöntemine ve nihai ürüne ulaşmak için kullanılan değişken yaklaşımlara bağlıdır (Ali vd., 2023). CNT'ler, iki boyutlu bir petek örgüsüne yerleştirilmiş karbon atomlarından oluşan tek katmanlı bir grafen olan tek atom kalınlığındaki tabakalardan oluşan nanotüplerdir. Tüm CNT'ler, katman sayısına göre iki alt sınıfa ayrılabilir: tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler). SWCNT'ler ve MWCNT'ler arasındaki bazı farklılıklar göz önünde bulundurulmalıdır. İlk olarak, SWCNT'lerin sentezi için kimyasal bir katalizör gerekirken, MWCNT'ler katalizör olmadan üretilebilir. İkinci olarak, SWCNT'lerin üretim süreci başlı başına hacimlidir ve saflığı MWCNT'lere kıyasla daha düşüktür (Saliev, 2019).

### 3. Karbon Nanotüplerin Sentezi

Karbon nanotüplerin (CNT) sentezi için çeşitli yöntemler bildirilmiştir, ancak en yaygın yöntemler ark deşarji, lazer ablasyonu ve kimyasal buhar biriktirme (CVD)'dir. Bunlara ek olarak, nanotüplerin sentezlenmesi için daha az kullanılan birkaç yaklaşım ise gaz fazı katalitik prosesi (HiPCO), alev sentezi, çekirdek-kabuk polimer mikroküre yöntemi, aerosol öncül yöntemi, ark su prosesi, düşük sıcaklık yolu, plazma yöntemi, akışkan yatak yöntemi ve nebülize püskürtme prosesisidir (Dubey vd., 2021).

### 4. Karbon Nanotüplerin Doku Mühendisliği ve Biyomühendislik Alanındaki Kullanımları

Doku mühendisliği alanı ilerledikçe, tasarlanmış dokuları daha iyi izlemek ve değerlendirmek için yeni araçlara ve doku büyümesini yönlendirecek yeni biyomalzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Karbon nanotüpler, hücrelerin daha iyi izlenmesi, mikro ortamların algılanması, transfeksiyon ajanlarının iletimi ve konakçının vücuduna dahil edilmesi için iskele oluşturma açısından önemli bir doku mühendisliği malzemesi olabilir. Karbon nanotüplerin optik, manyetik rezonans ve radyoaktif kontrast ajanlar için kullanılması, doku oluşumunu değerlendirmek için daha iyi bir araç sağlayacaktır. Ayrıca, hücre içi ve hücrelerarası süreçlerin izlenmesi ve değiştirilmesi, daha iyi tasarlanmış dokuların tasarımı için faydalı olacaktır. Karbon nanotüpler ayrıca iskelelere dahil edilerek yapısal güçlendirme sağlamanın yanı sıra iskelelere elektriksel iletkenlik gibi yeni özellikler kazandırarak hücre büyümesinin yönlendirilmesine yardımcı olabilir. Karbon nanotüplerle ilişkili potansiyel sitotoksik etkiler, yüzeyin kimyasal olarak işlevselleştirilmesiyle azaltılabilir. Genel olarak, karbon

nanotüpler, tasarlanmış doku oluşturmak ve izlemek için benzersiz bir biyomalzeme olarak önemli bir rol oynayabilir (Harrison ve Atala, 2007). CNT'lerin doku mühendisliğinde şu anda karşılaştığı sınırlamalar ve geleceğe yönelik beklentiler incelenmektedir. Her şey göz önüne alındığında, bu inceleme, karbon nanotüplerin (CNT'ler) gelecekteki biyolojik uygulamalar için potansiyel "yeni nesil" malzemeler olduğunu göstermektedir (Huang, 2020).

### 5. Karbon Nanotüplerin İlaç Taşınımı ve İletiminde Kullanılması

İlaçlar, odaklanmış ilaç salınımını sağlamak için çeşitli teknikler ve yollar kullanılarak uygulanabilir. İlaç salınımı, polimerler ve nanokompozitler de dahil olmak üzere çeşitli vektörler kullanır. Ancak bu ilaç salınım tekniklerinin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, polimerler biyolojik olarak parçalanmadığı için, eritropoietin (EPO) içeren bir polimer hidrojel formülasyonu kullanmak, ilaç uygulamasının ardından cerrahi bir eksizyon gerektirir (Packhaeuser vd, 2004). Ayrıca, midedeki asit saldırısı nedeniyle, doğal polisakkaritler ağızdan alındığında nispeten hızlı bir şekilde çözünür. CNT'ler, polimerlerin yerine bu tür sorunları çözmek için kullanılabilir. Biyolojik olarak parçalanabilir olmalarının yanı sıra, CNT'lerin ilaç uygulandıktan sonra cerrahi olarak çıkarılması gerekmez. Hücrelerin çekirdeğine ve sitoplazmasına taşınabilen farklı fizyolojik olarak aktif kısımları yüklemek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Patra vd., 2018). CNT'lerin kimyasal özellikleri nedeniyle, ilaçlar, kontrast maddeler, hedef moleküller ve haberci moleküller dahil olmak üzere birçok madde aynı anda tüpe yerleştirilebilir. Düşük suda çözünürlüğe, düşük içsel çözünme hızına ve düşük oral biyoyararlanıma sahip ilaçların terapötik uygulamaları sınırlıdır (Murjani vd., 2022).

### 6. Karbon Nanotüplerin Biyoyumluluğu

Biyomalzemelerin en önemli özelliklerinden biri olan biyoyumluluk, "bir biyomalzemenin, alıcı veya yararlanıcı üzerinde herhangi bir istenmeyen lokal veya sistemik etkiye yol açmadan, ancak aynı zamanda söz konusu tedavinin klinik olarak en uygun performansını üretirken, tıbbi bir tedaviyle ilgili istenen işlevini yerine getirme yeteneği" veya "bir malzemenin belirli bir durumda uygun bir konakçı tepkisiyle performans gösterme yeteneği" olarak tanımlanır. Bu nedenle, biyoyumluluk testi, düzenleyici kurumlar tarafından klinik kullanım için ortopedik malzemelerin geliştirilmesi ve onaylanmasında temel bir gerekliliktir. Biyomalzemelerin Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO 10993) tarafından belirlenen temel biyoyumluluk kriterlerini

karşılması gerekir. Uygun bir biyolojik tepki gösterebilmeleri için toksik, trombojenik, kanserojen, antijenik ve mutajenik olmamalıdır (Helmus vd., 2008; Huzum vd., 2021).

### 7. Karbon Nanotüplerin Kanser Tedavisinde Kullanımı

Kanser, son yıllarda ölüm oranlarını artıran en kötü hastalıklardan biridir (Siegel vd., 2018). Kontrolsüz kanser hücresi büyümesi, bu kanserli durumun yaygın tanımıdır; bu hücreler sonsuza dek çoğalır ve vücudun diğer bölgelerine ve dokularına invaziv olarak yayılır, normal hücrelerin biyolojik rolünü bozar ve etkilenenlerin sağlığı ve yaşam kalitesi için ciddi bir risk oluşturur (Klochov vd., 2021). Radyoterapi, cerrahi, endokrin tedavi, kemoterapi, fototerapi, gen tedavisi ve immünoterapi gibi tedavi tekniklerinin hızla gelişmesi sayesinde kanser tedavisinin durumu önemli ölçüde iyileşmiş olsa da, bu yaklaşımlar, özellikle metastatik kanser tedavisinde yaygın olarak kullanılmalarını engelleyen birçok engelle karşı karşıyadır (Ganesh ve Massagué, 2021). Son yıllarda, karbon nanotüplerin (CNT'ler) ilaç iletimi için birincil kullanımı kanser tedavisi olmuştur. Dar bir terapötik pencereye, düşük hücrel penetrasyona, sistemik toksisiteye ve ilaç direncine sahip kemoterapötik ilaçlar, kanser tedavisine yönelik geleneksel yaklaşımda kullanılmaktadır. Bu durumda, CNT'ler, kanser karşıtı ilaçların canlılar üzerindeki toksisitesini azaltarak ve ihtiyaç duyulan yerlerde lokal birikimi teşvik ederek, bu ilaçlara karşı savunma sağlamanın bir yolunu sunar. Bugüne kadar, birçok kanser karşıtı bileşik üretilmiş ve CNT'lerle etkinlikleri değerlendirilmiştir (Naief vd., 2024).

### 8. Karbon Nanotüplerin Biyosensör ve Teşhis Uygulamalarında Kullanımı

Birçok farklı CNT türü mevcuttur ve bu yoğun çalışma alanı genişledikçe daha fazlası modellenmekte ve üretilmektedir. Sonuç olarak, CNT'ler çeşitli sektörlerde büyük ilgi görmektedir. Biyosensör endüstrisindeki kullanımları özellikle ilgi çekici bir alandır. CNT'ler, farklı yapıları ve nanometre ölçeğindeki boyutları nedeniyle kimyasal ve biyolojik algılama uygulamaları için oldukça avantajlı olan çok sayıda özelliğe sahiptir. Geniş en/boy oranı ve hacim oranına göre yüzey alanı, üstün elektriksel iletkenlikler, yüksek kimyasal kararlılık ve ışık kalitesi bu özelliklerden bazılarıdır. Elektrokimyasal, fotonik ve alan etkili cihazlar, karbon nanotüplerin (CNT'ler) biyosensörlerdeki ana uygulamaları olmuştur (Wang vd., 2005; Saleh Ahammad vd., 2009; Chen vd., 2011). Biyosensörlerin oluşturulmasında bu nanomalzemenin olağanüstü özelliklerinden yararlanmak için CNT'lerin biyotanıma bileşenleriyle rafine edilmesi ve işlevselleştirilmesi gerekmektedir.

Biyosensörlerin geliştirilmesindeki en büyük engel, biyoalgılama arayüzünün tasarımıdır. Hem transdüksiyon hem de işlevselleştirme süreçlerini hesaba katmalıdır. Analitin biyosensör yüzeyinde seçici olarak tanımlanabilmesi için, biyoalgılama elemanının immobilizasyonunun ayarlanması gerekir. Ayrıca, hedef analitin varlığından kaynaklanan biyotanıma elemanındaki küçük değişikliklerin hızlı ve hassas bir şekilde tespit edilebilmesi için transdüksiyonun ayarlanması gerekir (Ferrier ve Honeychurch, 2021). Karbon atomlarının tüp benzeri bir düzende dizilmesiyle oluşan karbon allotroplarına karbon nanotüpler (CNT'ler) denir. İlaç taşıma kabiliyetleri, zengin elektronik poliaromatik yapıları, yüksek yüzey alanları ve kimyasal kararlılıkları sayesinde kolaylaştırılır. Sonuç olarak, CNT'ler olası bir kanser tedavisi de dahil olmak üzere çeşitli tıbbi kullanımlar için kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. CNT'ler, akıllı üretim teknikleri kullanılarak kanser hücrelerini hassas bir şekilde hedef alabilir (He vd., 2013; Zare vd., 2021). CNT'lerin terapötik potansiyelini optimize etmenin yanı sıra, bu odaklı ilaç taşıma stratejisi, serbest ilaç moleküllerinin olumsuz yan etkilere sahip olma olasılığını azaltır. Ayrıca, CNT'ler immünoterapötik uygulamalarda ve kanser hücrelerini öldüren reaktif oksijen türleri (ROS) üretmek için fotosensitizörlerin kullanıldığı fototerma tedavide (PTT) kullanılabilir. Örneğin, CNT bazlı formülasyonlar, tümör içi düzenleyici T hücrelerini, özellikle de bu hücrelere göre hedefleme yeteneğine sahiptir. Ek olarak, CNT'ler etkili antijen sunucularıdır. CNT'ler ayrıca fotoakustik, floresans ve Raman görüntüleme özellikleri nedeniyle mükemmel teşhis araçlarıdır. Ek olarak, CNT'ler, biyolojik etkileşimleri değerlendiren nanobiyosensörler üretmek için altın veya gümüş gibi metalik nanopartiküllerle karıştırılır. CNT'lerin teranostik potansiyeline dair güncel anlayış, geniş ölçekte üretimlerindeki zorluklar, olası yan etkiler ve terapötik uygulamalarını araştırırken dikkate alınması gereken önemli faktörler, bu incelemenin ana konularıdır (Sharma vd., 2024).

### 9. Karbon Nanotüplerin Antimikrobiyal Özellikleri

Yuvarlanma açısına bağlı olarak, CNT'ler yarı iletken veya metalik özelliklere sahip olabilir. CNT'ler, yüzeyleri boyunca yuvarlanan grafen tabakalarının miktarına göre tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler) veya çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) olarak kategorize edilir. İkincisi, tüpler içinde gruplandırılmış birkaç tek duvarlı nanotüpten oluşur. Üstün fizikokimyasal özellikleri nedeniyle, SWCNT'ler birçok CNT türü arasında en güçlü antibakteriyel aktiviteye sahiptir (Saleemi vd., 2021). Saflaştırılmış SWCNT'lerin antibakteriyel etkisi üzerine ilk yayında, Kang ve arkadaşları (2007), bakteri zarlarının doğrudan

temas halindeki bütünlüğünün hem saflaştırılmış SWCNT versiyonu hem de MWCNT'ler tarafından önemli ölçüde etkilendiğini bulmuşlardır. Ayrıca, metabolik süreçler ve morfoloji de etkilenmiştir (Kang vd., 2008a). SWCNT'lerin deneylerinde, MWCNT'lerden daha güçlü bir antibakteriyel etkiye sahip oldukları görülmüştür; bu büyük olasılıkla yüzey alanlarını artıran ve zarrın parçalanmasını kolaylaştıran küçük boyutlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca oksidatif stres, CNT'lerin antibakteriyel özelliklerine katkıda bulunmaktadır (Kang vd., 2008b). CNT'ler çeşitli farmakolojik ve tıbbi alanlarda yaygın uygulama alanı bulmuştur (Aslan vd., 2010; He vd., 2013). CNT'lerin antibakteriyel aktivitesi, gümüş, enzimler, antimikrobiyal peptitler (AMP'ler) ve polimerler dahil olmak üzere çok çeşitli nanokompozitlerin adsorpsiyonu ile artar. Bugüne kadar, CNT'leri biyoaktif bileşikler veya antimikrobiyal ilaçlarla karıştırarak ve ardından yeni antimikrobiyal tedavi seçenekleri geliştirerek antimikrobiyal direnci ele almak için umut verici yeni bir yaklaşım oluşturulmuştur. Ayrıca, özellikle katalitik olarak aktif demir ve diğer potansiyel yan ürünler mevcut olduğunda, karbon nanotüplerin toksikolojik değerlendirmelerini ele almak önemlidir (Saliev, 2019; Chaudhari vd; 2019; Saleemi vd., 2021). CNT'lerin, hücre gelişimini veya oksidatif stresi engellemek yerine, öncelikle bakteri zarlarını delen "nano oklar" işlevi görerek hücreleri öldürdüğü fikri Chen ve arkadaşları (2013) tarafından desteklenmiştir. SWCNT delme, *Staphylococcus aureus* ve *Bacillus subtilis* gibi Gram pozitif bakteriler de dahil olmak üzere daha yumuşak yüzeyli bakterilerde hücre ölümü olasılığını artırır (Chen ve arkadaşları, 2013; Liu ve arkadaşları, 2009). Dahası, CNT'lerin formları nedeniyle çubuk şeklindeki bakterilere kıyasla küresel bakteriler üzerinde daha güçlü bir bakterisidal etkiye sahip olduğu görülmektedir (Chen ve arkadaşları, 2013). Mikroorganizmalar bir biyofilm yapısı tarafından korunduğunda, bakterilerin büyüme durumu açısından serbest yüzen hücrelere kıyasla karbon nanotüplerin (CNT'ler) etkilerine karşı daha az savunmasızdırlar. Karbon nanotüplerin (CNT) öldürücü etkilerini azaltmak için biyofilmdeki mikrobiyal hücreler hücre dışı polimerik maddeler (EPS) salgırlar (Rodrigues ve Elimelech, 2010; Maksimova vd., 2023).

#### 10. Karbon Nanotüplerin Antiviral Özellikleri

Geçmişte COVID-19 gibi viral hastalıklar, feci sonuçlara yol açan pandemilere neden olmuştur. Antivirallerin yerine, bu viral hastalıklarla mücadele etmek için karbon bazlı nanomalzemeler (CBN'ler) geliştirilmektedir. Çok çeşitli virüslerle mücadele etme yeteneklerini kanıtlamışlardır, ancak şiddetli akut solunum yolu

sendromu koronavirüs 2 (SARS-CoV-2) ile mücadele etme yetenekleri son zamanlarda özellikle dikkat çekmektedir (Kumar vd., 2023) CBN'ler artık viral enfeksiyonları durdurabilen antiviral bileşikler oluşturmak için büyük umut vaat etmektedir. Diğer uygulamalara ek olarak, bu malzemeler antiviral yüz maskeleri ve siperlikleri, antiviral yüzeyler, hastane ve havaalanı duvarları ve zeminleri için antiviral seramikler ve asansörler için antiviral metaller yapmak için kullanılabilir. CBN'leri bu uygulamalara dahil etmenin önemli terapötik ve pratik faydaları vardır. CBN'ler, mekanik mukavemeti ve antiviral nitelikleri iyileştirerek sağlık ortamlarındaki pratik sorunları çözebilir. Ancak, biyoyoumluluğun sağlanması, homojen dağılım sağlanması, test prosedürlerinin standartlaştırılması, maliyetlerin kontrol altına alınması, uzun vadeli dayanıklılığın garanti altına alınması ve çevresel etkilerinin ele alınması gibi konuların çözümü için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Klinik uygulamalara güvenli ve etkili bir şekilde dahil edilebilmeleri için, engellerin aşılması ve potansiyelin değerlendirilmesi arasında dikkatli bir denge kurulması gerekmektedir (Serrano-Aroca vd., 2024). Antiviral ajanlar olarak CBN'ler şimdiye kadar umut vaat etmektedir. SARS-CoV-2, savaştığı gösterilen 13 zarflı pozitif polariteli tek zincirli RNA virüsünden biridir (Serrano-Aroca vd., 2021) Mevcut incelemeye göre, beş farklı Baltimore grubundan çok çeşitli virüslere karşı da değerlendirilmişlerdir ve dang humması (DENV), EV, grip (IFV) ve Zika (ZIKV) gibi çeşitli viral hastalıkların tedavisine yardımcı olabileceği ifade edilmiştir. Fototerma özellikleri sayesinde CBN'ler, çeşitli ışınlama türleri altında antiviral aktivitelerini artırabilir ve antiviral bağışıklık tepkilerini destekleyebilirler (Huang vd., 2021; Nader vd., 2023; Serrano-Aroca vd., 2024)

#### 11. Sonuç ve Geleceğe Yönelik Perspektifler

Son 20 yılda, en yaygın kullanılan nanomalzeme türleri arasında yer alan karbon bazlı nanopartiküller üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu malzemelerin içsel mekanik, optik, elektrokimyasal ve elektriksel özellikleri, yaygın kullanımlarına yol açmıştır. Çeşitli yüzey özellikleri, boyutları ve formları nedeniyle karbon bazlı nanopartiküller (CBN'ler), son on yıldır biyomedikal mühendisliğinde büyük ilgi görmüştür. İnorganik yarı iletken ve organik istifleme özelliklerinin birleşimi, karbon bazlı nanomalzemeleri umut verici bir malzeme haline getirmektedir. Bu özel karışım sayesinde ışığa tepki verebilir ve biyomoleküllerle verimli bir şekilde etkileşime girebilirler. Gelecekteki biyomedikal uygulamalar, karbon bazlı nanomalzemelerin çeşitli özellikleri tek bir organizmada birleştirme yeteneğinden faydalanabilir. Biyolojik sistemler üzerindeki zararlı sonuçlarına rağmen, ilaç taşımacılığı,

doku mühendisliği, biyomolekül tanımlama ve kanser tedavisi dahil olmak üzere birçok kimyasal değiştirme tekniği oluşturulmuş ve biyomedikal uygulamalarda etkili bir şekilde uygulanmıştır. Bu derleme makalede, karbon bazlı nanomalzemelerin biyolojik amaçlar için kullanımındaki gelişmeler ele alınmaktadır. Ayrıca, kapsamlı bir şekilde incelenen CBN'lerin temel özelliklerini ve daha iyi biyolojik uygulamalar için kullanımlarını vurgulamaktayız. Karbon bazlı nanomalzemelerin toksisitesini ve biyoyararlanımını değerlendirmek için daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır, ancak yine de zararlı olabilirler. İlaç iletimi, doku mühendisliği, biyomolekül tanımlama ve kanser tedavisindeki devrim niteliğindeki potansiyelleri, biyomedikal uygulamalarda karbon bazlı nanomalzemelerin (CBN'ler) umut verici manzarasıyla vurgulanmaktadır. Özel nitelikleri, araştırma alanında büyük ilgi görmüş ve zorlu tıbbi sorunlara yaratıcı çözümler sunmuştur. Ancak alan geliştikçe, bu bileşiklerin olası toksisitesini anlamamanın ne kadar önemli olduğu giderek daha belirgin hale gelmektedir. Klinik uygulamalarda hasta güvenliğini ve etkinliğini garanti altına almak için, toksisiteleri ve biyoyararlanımları üzerine sistematik çalışmalar gereklidir. CBN'lerin çağdaş tıba başarılı bir şekilde dahil edilmesi, araştırmacılar muazzam potansiyellerini araştırmaya devam ettikçe, şaşırtıcı avantajları ve dikkatli güvenli değerlendirilmeleri arasında bir denge kurulmasına bağlı olacaktır.

## 12. Article Information / Makale Bilgileri

**Evaluation:** Two External Reviewers / Double Blind

**Değerlendirme:** İki Dış Hakem / Çift Taraflı Körleme

**Ethical Consideration:** Since this research is a review, ethical committee approval is not required.

It is declared that scientific and ethical principles were complied with during the preparation of this study and all the studies used in this study were cited in the bibliography. No artificial intelligence-based tools or applications were utilized in the preparation of this manuscript. All content was generated solely by the author(s) in adherence to scientific research methodologies and academic ethical standards.

**Etik Beyan:** Bu araştırma bir derleme olduğundan etik kurul izni gerekmemektedir.

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur. Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde yapay zeka tabanlı herhangi bir araç veya uygulama kullanılmamıştır. Çalışmanın tüm içeriği, yazar(lar) tarafından bilimsel araştırma yöntemleri ve akademik etik ilkelere uygun şekilde üretilmiştir

**Similarity Screening:** Done- intihal.net

**Benzerlik Taraması:** Yapıldı –intihal.net


**Conflict of Interest:** No conflict of interest declared.


**Çıkar Çatışması:** Çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Financing:** No external funding was used to support this research

**Finansman:** Bu çalışma için herhangi bir bütçe desteği yoktur

**Copyright & Licence:** The authors own the copyright of their work published in the journal and their work is published under the

CC BY-NC 4.0 licence. 

**Telif Hakkı & Lisans:** Yazarlar dergide yayınlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmalarını CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır. 

## Kaynaklar

- Ali, A., Kolor, S. S. R., Alshehri, A. H., & Arockiarajan, A. (2023). Carbon nanotube characteristics and enhancement effects on the mechanical features of polymer-based materials and structures—A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6495-6521. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.072>
- Alosime, E. M. (2023). A review on surface functionalization of carbon nanotubes: methods and applications. *Discover Nano*, 18(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03789-6>. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03789-6>
- Aslan, S., Loebick, C. Z., Kang, S., Elimelech, M., Pfefferle, L. D., & Van Tassel, P. R. (2010). Antimicrobial biomaterials based on carbon nanotubes dispersed in poly (lactic-co-glycolic acid). *Nanoscale*, 2(9), 1789-1794. <https://doi.org/10.1039/C0NR00329H>
- Chaudhari, A. A., Joshi, S., Vig, K., Sahu, R., Dixit, S., Baganizi, R., ... & Pillai, S. (2019). A three-dimensional human skin model to evaluate the inhibition of *Staphylococcus aureus* by antimicrobial peptide-functionalized silver carbon nanotubes. *Journal of Biomaterials Applications*, 33(7), 924-934. <https://doi.org/10.1177/0885328218814984>
- Chen, Z., Zhang, X., Yang, R., Zhu, Z., Chen, Y., & Tan, W. (2011). Single-walled carbon nanotubes as optical materials for biosensing. *Nanoscale*, 3, 1949-1956. <https://doi.org/10.1039/C0NR01014F>
- Chen, H., Wang, B., Gao, D., Guan, M., Zheng, L., Ouyang, H., Chai, Z., Zhao, Y., & Feng, W. (2013). Broad-spectrum antibacterial activity of carbon nanotubes to human gut bacteria. *Small*, 9(16), 2735-2746. <https://doi.org/10.1002/sml.201202792>
- Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., & Chattopadhyay, P. (2021). Functionalized carbon nanotubes: synthesis, properties, and applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. *Nanoscale Advances*, 3(20), 5722-5744. <https://doi.org/10.1039/D1NA00293G>
- Ferrier, D. C., & Honeychurch, K. C. (2021). Carbon nanotube (CNT)-based biosensors. *Biosensors*, 11(12), 486. <https://doi.org/10.3390/bios11120486>
- Ganesh, K., & Massagué, J. (2021). Targeting metastatic cancer. *Nature Medicine*, 27(1), 34-44. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-01195-4>
- Harrison, B. S., & Atala, A. (2007). Carbon nanotube applications for tissue engineering. *Biomaterials*, 28(2), 344-353. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.07.044>
- He H, Pham-Huy LA, Dramou P, Xiao, D., Zou, P., & Pham-Huy, C. (2013). Carbon nanotubes: applications in pharmacy and medicine. *Biomed Research International*, 578290. doi: 10.1155/2013/578290.
- Helmus, M. N., Gibbons, D. F., & Cebon D. (2008) Biocompatibility: Meeting a key functional requirement of next-generation medical devices. *Toxicologic Pathology*, 36(1), 70-80. <https://doi.org/10.1177/0192623307310>

- Huang, B. (2020). Carbon nanotubes and their polymeric composites: the applications in tissue engineering. *Biomufacturing Reviews*. 5(3), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s40898-020-00009-x>
- Huang, L., Gu, M., Wang, Z., Tang, T. W., Zhu, Z., Yuan, Y., Wang, D., Shen, C., Thang, B. Z., & Ye, R. (2021). Highly efficient and rapid inactivation of coronavirus on non-metal hydrophobic laser-induced graphene in mild conditions. *Advanced Functional Materials*. 31(24), 2101195. <https://doi.org/10.1002/adfm.202101195>
- Huzum, B., Puha, B., Necoara, R. M., Gheorghievici, S., Puha, G., Filip, A., Sirbu, P. D., & Alexa, O. (2021). Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices: An overview. *Experimental and Therapeutic Medicine*. 22(5), 1315. <https://doi.org/10.3892/etm.2021.10750>
- Jain, N., & Tiwari, S. (2021). Biomedical application of carbon nanotubes (CNTs) in vulnerable parts of the body and its toxicity study: A state-of-the-art-review. *Materials Today: Proceedings*. 46, 7608-7617. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.895>
- Kang, S., Pinault, M., Pfefferle, L. D., & Elimelech, M. (2007). Single-walled carbon nanotubes exhibit strong antimicrobial activity. *Langmuir*. 23(17), 8670-8673. <https://doi.org/10.1021/la701067r>
- Kang, S., Herzberg, M., Rodrigues, D. F., & Elimelech, M. (2008a). Antibacterial effects of carbon nanotubes: size does matter!. *Langmuir*. 24(13), 6409-6413. <https://doi.org/10.1021/la800951v>
- Kang, S., Mauter, M. S., & Elimelech, M. (2008b). Physicochemical determinants of multiwalled carbon nanotube bacterial cytotoxicity. *Environmental Science & Technology*. 42(19), 7528-7534. <https://doi.org/10.1021/es8010173>
- Klochkov, S. G., Neganova, M.E., Nikolenko, V.N., Chen, K., Somasundaram, S.G., Kirkland, C.E., & Aliev, G. (2021). Implications of nanotechnology for the treatment of cancer: Recent advances. *Seminars in Cancer Biology*. 69:190-199. 31446004. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2019.08.028>
- Kumar, S. S., Lakshmi, A., Murali, A., M, H., RC, K. P., Gangopadhyay, M., & Saritha, A. (2023). Carbon Based Antibacterial and Antiviral Materials. In *Antibacterial and Antiviral Functional Materials*, 1: 327-361. American Chemical Society.
- Liu, S., Wei, L., Hao, L., Fang, N., Chang, M.W., Xu, R., Yang, Y., & Chen, Y. (2009). Sharper and faster "nano darts" kill more bacteria: a study of antibacterial activity of individually dispersed pristine single-walled carbon nanotube. *ACS Nano*. 3(12), 3891-3902. <https://doi.org/10.1021/nm901252r>
- Maksimova, Y., Zorina, A., & Nesterova, L. (2023). Oxidative stress response and E. coli biofilm formation under the effect of pristine and modified carbon nanotubes. *Microorganisms*. 11(5), 1221. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051221>
- Murjani, B. O., Kadu, P. S., Bansod, M., Vaidya, S. S., & Yadav, M. D. (2022). Carbon nanotubes in biomedical applications: current status, promises, and challenges. *Carbon Letters*. 32(5), 1207-1226. <https://doi.org/10.1007/s42823-022-00364-4>
- Nader, K., Shetta, A., Saber, S., & Mamdouh, W. (2023). The potential of carbon-based nanomaterials in hepatitis C virus treatment: a review of carbon nanotubes, dendrimers, and fullerenes. *Discover Nano*. 18(1), 116. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03895-5>
- Naief, M. F., Mohammed, S. N., & Mohammed, A. M. (2024). Carbon nanotubes: A review on synthesis and drug delivery for cancer treatment. *Inorganic Chemistry Communications*. 159, 111694. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111694>
- Packhaeuser, C. B., Schnieders, J., Oster, C. G., & Kissel, T. (2004) In situ forming parenteral drug delivery systems: an overview. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 58(2):445-455. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2004.03.003>
- Patra, J. K., Das, G., Fraceto, L. F., et al. (2018). Nano based drug delivery systems: recent developments and future prospects. *Journal of Nanobiotechnology*. 16, 71. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0392-8>
- Prajapati, S. K., Malaiya, A., Kesharwani, P., Soni, D., & Jain, A. (2022). Biomedical applications and toxicities of carbon nanotubes. *Drug and Chemical Toxicology*. 45(1), 435-450. <https://doi.org/10.1080/01480545.2019.1709492>
- Patel, K. D., Singh, R. K., & Kim, H. W. (2019). Carbon-based nanomaterials as an emerging platform for theranostics. *Materials Horizons*. 6(3), 434-469. <https://doi.org/10.1039/C8MH00966J>
- Riley, P. R., & Narayan, R. J. (2021). Recent advances in carbon nanomaterials for biomedical applications: A review. *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 17, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100262>
- Rodrigues, D.F., & Elimelech, M. (2010). Toxic effects of single-walled carbon nanotubes in the development of E. coli biofilm. *Environmental Science & Technology*. 44, 4583-4589. <https://doi.org/10.1021/es1005785>
- Saleemi, M. A., Kong, Y. L., Yong, P. V. C., & Wong, E. H. (2021). An overview of antimicrobial properties of carbon nanotubes-based nanocomposites. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. 12(3), 449. <https://doi.org/10.33472/apb.2022.049>
- Saleh Ahammad, A. J., Lee, J. J., & Rahman, M. A. (2009). Electrochemical sensors based on carbon nanotubes. *Sensors*. 9(4), 2289-2319. <https://doi.org/10.3390/s90402289>
- Saliev, T. (2019). The advances in biomedical applications of carbon nanotubes. *C, Journal of Carbon Research*. 5(2), 29. <https://doi.org/10.3390/c5020029>
- Serrano-Aroca, Á., Takayama, K., Tuñón-Molina, A., Seyran, M., Hassan, S. S., Pal Choudhury, P., ... & Brufsky, A. (2021). Carbon-based nanomaterials: promising antiviral agents to combat COVID-19 in the microbial-resistant era. *ACS Nano*. 15(5), 8069-8086. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00629>
- Serrano-Aroca, Á., Takayama, K., Mishra, Y. K., & de la Fuente-Nunez, C. (2024). Carbon-based nanomaterials for antiviral applications. *Advanced Functional Materials*. 34(38), 2402023. <https://doi.org/10.1002/adfm.202402023>
- Sharma, M., Alessandro, P., Cheriyaundath, S., & Lopus, M. (2024). Therapeutic and diagnostic applications of carbon nanotubes in cancer: recent advances and challenges. *Journal of Drug Targeting*. 32(3), 287-299. <https://doi.org/10.1080/1061186X.2024.2309575>
- Siegel, R. L., Miller, K. D., & Jemal, A. (2018). Cancer statistics, 2018. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 68(1), 7-30. <https://doi.org/10.3322/caac.21442>
- Singh, R., & Kumar, S. (2022). Cancer targeting and diagnosis: recent trends with carbon nanotubes. *Nanomaterials*. 12(13), 2283. <https://doi.org/10.3390/nano12132283>
- Speranza, G. (2021). Carbon nanomaterials: Synthesis, functionalization and sensing applications. *Nanomaterials*. 11(4), 967. <https://doi.org/10.3390/nano11040967>
- Tiwari, S. K., Pandey, R., Wang, N., Kumar, V., Sunday, O. J., Bystrzejewski, M., ... & Mishra, Y. K. (2022). Progress in diamonds and diamondoids nanosystems for emerging technologies. *Advanced Science*. 9(11), 2105770. <https://doi.org/10.1002/advs.202105770>
- Wang, J. (2005). Carbon-nanotube based electrochemical biosensors: A review. *Electroanalysis*. 17, 7-14. <https://doi.org/10.1002/elan.200403113>
- Zare, H., Ahmadi, S., Ghasemi, A., Ghanbari, M., Rabiee, N., Bagherzadeh, M., Karimi, M., Webster, T. J., Hamblin, M. R., Mostafavi, E. (2021). Carbon nanotubes: smart drug/gene delivery carriers. *International Journal of Nanomedicine*. 16, 1681-1706. <https://doi.org/10.2147/IJN.S299448>