

Can, B. and A. Gurel, Nanopartiküllerin Bitki Sistemlerinde ve Bitki Doku Kültürlerinde Uygulamalarına Yönelik Genel Bir Bakış. International Journal of Life Sciences and Biotechnology, 2023 6(3): p. 335-370. DOI: 10.38001/ijlsb.1293031

Nanopartiküllerin Bitki Sistemlerinde ve Bitki Doku Kültürlerinde Uygulamalarına Yönelik Genel Bir Bakış

Buse Can^{1*}, Aynur Gürel²

ÖZET

Dünya nüfusunun hızla artmasıyla birlikte, bitkiye ve bitkisel materyallere duyulan ihtiyaç da artma göstermiştir. Bitki biyoteknolojisi, bu ihtiyaçların karşılanması için iyi bir alternatiftir. Bitki biyoteknolojisinin en önemli kısmını oluşturan bitki doku kültürleri, farklı amaçlara yönelik birçok tekniği içermektedir. Bitki doku kültürü teknikleri; mikroçoğaltım, genetik manipülasyon, biyoaktif bileşik üretimi ve bitki gelişimi vb. alanlarda bitki biyolojisinin temel yapıtaşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Nanoteknoloji, nano boyutlu yeni malzemelerin (nanomalzeme) üretimi, bunların tasarımını ve uygulamasını ele alan multidisipliner bir bilim dalıdır ve temelini nanopartiküller oluşturmaktadır. Nanopartiküllerin, bitki sistemlerinde ve bitki doku kültürlerindeki uygulamalarının bitki büyüme ve gelişme fizyolojisi üzerinde çeşitli etkileri mevcuttur. Bu alanlarda en çok çalışılan nanopartiküller; sırasıyla metal/metal oksit bazlılar, karbon bazlılar, kuantum noktaları, silikon ve polimerik nanopartiküllerdir. Bitki sistemlerinde nanopartiküllerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde; tohum çimlenmesi, bitki büyümesi ve verim, sürgün rejenerasyonu, kök/sürgün uzunluğu ve biyokütle artışı gibi parametrelerde olumlu sonuçlar alındığı, fizyolojik/biyokimyasal aktiviteler açısından da indükleyici etkilerin belirlendiği raporlanmıştır. Ayrıca genetik modifikasyonun sağlanması, biyoaktif bileşiklerin üretiminin iyileştirilmesi, bitki korumanın sağlanmasının yanı sıra biyotik ve abiyotik strese karşı dayanıklılığı artırma gibi etkileri de belirlenmiştir. Son yıllarda, nanopartiküllerin bitki doku kültürlerinde gerçekleştirilen uygulamaları ile de eksplantlardan kontaminantların yok edilmesi, kallus indüksiyonu, sürgün rejenerasyonu, organogenez, somatik embriyogenez, somaklonal varyasyon, *in vitro* çiçeklenme, genetik transformasyon ve sekonder metabolit üretimine yönelik başarılı sonuçlar alınmıştır. Nanopartiküllerin bitki sistemlerinde ve bitki doku kültürlerindeki uygulanma başarısı, kullanılan nanopartikül çeşidine, dozuna ve üzerinde çalışılan bitki türüne bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Bu derleme, nanoteknolojinin bitki sistemlerine ve bitki doku kültürlerine entegre edilmesine yönelik mevcut çalışmaların incelenerek, nanoteknoloji kullanımının olumlu yönlerinin ortaya konulmasını amaçlamıştır.

MAKALE GEÇMİŞİ

Geliş

5 Mayıs 2023

Kabul

14 Temmuz 2023

ANAHTAR

KELİMELELER

Bitki,
doku kültürleri,
biyoteknoloji,
nanoteknoloji,
nanopartikül

¹Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomühendislik Anabilim Dalı, Bornova/ İzmir, Türkiye

²Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Bornova/ İzmir, Türkiye

*Corresponding Author: Buse Can, e-mail: busecan207@gmail.com

An Overview of Applications of Nanoparticles in Plant Systems and Plant Tissue Cultures

ABSTRACT

With the rapid increase in the world population, the need for plants and plant materials has also increased. Plant biotechnology is a good alternative to meet these needs. Plant tissue cultures, which constitute the most important part of plant biotechnology, include many techniques for different purposes. These techniques; micropropagation, genetic manipulation, bioactive compound production, and plant growth, etc. it is accepted as one of the basic building blocks of plant biology in fields. Nanotechnology is a multidisciplinary science that deals with the production, design, and application of nano-sized new materials (nanomaterials), and its basis is nanoparticles. Applications of nanoparticles in plant systems and plant tissue cultures have various effects on plant growth and development physiology. The most studied nanoparticles in these areas are; metal/metal oxide-based, carbon-based, quantum dots, silicon, and polymeric nanoparticles. When the studies using nanoparticles in plant systems are examined; It has been reported that positive results were obtained in parameters such as seed germination, plant growth and yield, shoot regeneration, root/shoot length, and biomass increase, and inducing effects were determined by physiological/biochemical activities. Also, effects such as providing genetic modification, improving the production of bioactive compounds, providing plant protection as well as increasing resistance to biotic and abiotic stress have been determined. In recent years, successful results have been obtained for the elimination of contaminants from explants, callus induction, shoot regeneration, organogenesis, somatic embryogenesis, somaclonal variation, *in vitro* flowering, genetic transformation, and secondary metabolite production with the applications of nanoparticles in plant tissue cultures. It has been revealed that the success of the application of nanoparticles in plant systems and plant tissue cultures depends on the type of nanoparticle used, its dose, and the plant species studied. This review aims to reveal the positive aspects of the use of nanotechnology by examining the existing studies on the integration of nanotechnology into plant systems and plant tissue cultures.

ARTICLE HISTORY

Received

5 May 2023

Accepted

14 July 2023

KEYWORDS

Plant,
tissue cultures,
biotechnology,
nanotechnology,
nanoparticles,

Giriş

Bitki biyoteknolojisi; bitkilerin verim ve kalitesini artırmak, bitki verimliliğini sınırlayan hastalık, zararlı ve stres faktörlerini engellemek, azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla genetik mühendisliği ile birlikte hücre ve doku kültürü teknolojilerinin kullanıldığı bir süreçtir. Bu kapsamda bitki doku kültürleri; farklı özelliklere sahip birçok tarımsal türde çeşitli yöntem ve prosedürler yoluyla uygulanarak kaliteli üretimin hızlandırılmasına, bitkilerin daha verimli değerlendirilmesine ve ayrıca *ex situ* korumanın sağlanmasına önemli katkıda bulunmaktadır. Tarımsal öneme sahip ürünlerde, iklim değişikliğinin etkileri ve buna bağlı olarak gelişen olan farklı biyotik ve abiyotik streslerin yol açtığı biyolojik çeşitlilik ve ürün kayıpları göz önüne alındığında, bitki biyoteknolojisinin bu sorunlara sunduğu avantajlar son derece ilgi çekicidir [1].

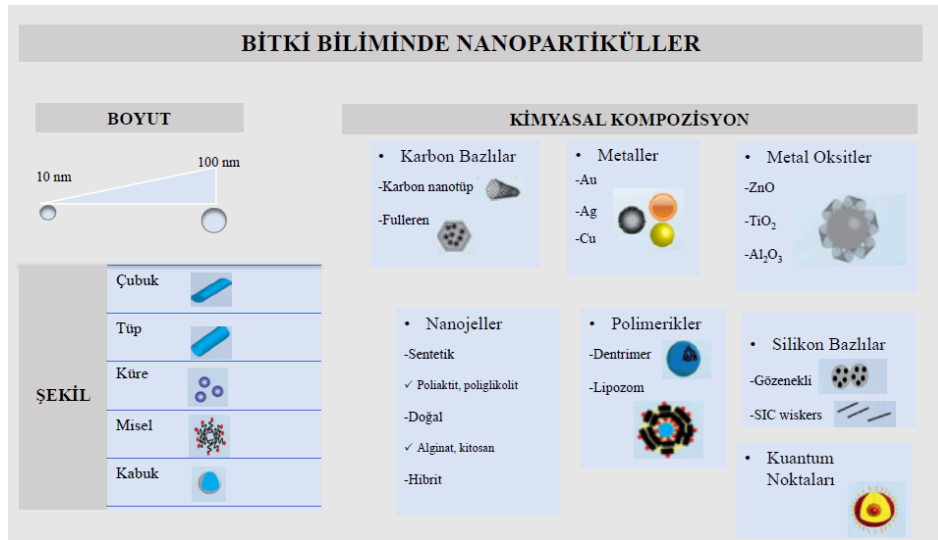
In vitro ya da steril kültürler olarak da adlandırılan bitki doku kültürleri hem temel hem de uygulamalı çalışmaların yanı sıra ticari uygulamalar için de önemli bir araç olarak

benimsenmiştir. Bitki doku kültürleri; hücre, doku ya da organların ve bunların bileşenlerinin, kontrollü, uygun kültür koşulları altında, genellikle mikroçoğaltım, klonal üretim ve *in vitro* rejenerasyonları gerçekleştirmek üzere steril, simüle edilmiş besin ortamlarında kültüre alınarak hücrelerin veya bitki kısımlarının büyüme ve gelişmelerinin araştırıldığı tekniklerdir [2]. Bitki doku kültürlerinin çalışma konuları içerisinde sitoloji, embriyogenez, morfogenez, patoloji ve germplazm koruma, genetik manipülasyon, büyük ölçekli mikroçoğaltım ve klonal üretim, patojen içermeyen bitkilerin ve yararlı metabolitlerin üretimi gibi bitki biyolojisinin hem temel hem de uygulamalı alanları yer almaktadır [3]. Nanopartiküller, benzersiz fizikokimyasal özelliklere sahiptir ve biyomoleküllerle işlevselleştirme için çok yönlü yapı iskeleleri sağlamaktadır [4]. Son yıllarda nanopartiküller bitkilerde, tohum çimlenmesini iyileştirmek, büyümesini ve verimini artırmak, genetik modifikasyonunu sağlamak, biyoaktif bileşik üretimini iyileştirmek ve bitki korumasını sağlamak gibi birçok araştırmaya konu olmaktadır [1]. Bu derlemede, nanoteknolojide önemli bir yere sahip olan olan nanopartiküller incelenmiş, bunların bitki sistemleri ve bitki doku kültürleri ile olan ilişkileri yapılan çeşitli araştırmalar kapsamında ele alınarak, nanopartiküllerin uygulama alanlarının aydınlatılmasına çalışılmıştır.

Nanopartiküllerin Özellikleri ve Bitki Sistemlerinde Genel Kullanılma Potansiyelleri

Teknik bir terim olarak 'nano', 10^{-9} ya da milyarda bir anlamındadır ve nanoteknoloji, 1-100 nm boyutları arasında çalışmaktadır [1]. Nanoteknoloji, nano boyutlu malzemeler üretmek için atomik, moleküler ve makromoleküler ölçekte malzemelerin tasarımını, üretimini ve uygulamasını ifade eden multidisipliner bir bilim dalıdır. Nanomalzemeler olarak tanımlanan bu yapılar, yapımında kullanılan hammaddenin özelliklerine, kimyasal bileşimlerine, boyut, şekil ve uygulama alanlarına göre farklı kategorilerde sınıflara ayrılabilen ve bunlar; nanokristaller, nanopartiküller, nanotüpler, nanoteller, nanoçubuklar ve nanofilmler olarak adlandırılmaktadır. Nanomalzemeler arasında nanopartiküller, birim başına çok büyük yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle uygulamalar arasında özellikle dikkat çekmektedir [5]. Boyutları 10-100 nm arasında olan nanopartiküller ise nano boyutlu malzemelerin, dolayısıyla nanoteknolojinin temelini oluşturmaktadır [6]. Nanopartiküller; spesifik şekilleri, ayarlanabilir gözenek

boyutları, geliştirilmiş yüzey alanı ve yüksek reaktiviteleri ile bilinirler [7]. Uygulama ve kullanımlarına bağlı olarak nanopartiküller; çubuk, tüp, küre, misel ve kabuk şekillerinde bulunabilirler. Nanopartiküllerin, kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılması ise; karbon bazlı (karbon nanotüpler, fulleren vb.), metal (Au, Ag, Cu vb.), metal oksit (ZnO, CuO, TiO₂ vb.), kuantum noktaları, silikon bazlı, polimerik (dendrimer, lipozom vb.) ve nanojeller (sentetik, doğal ve hibrit) şeklindedir [8] (Şekil 1).



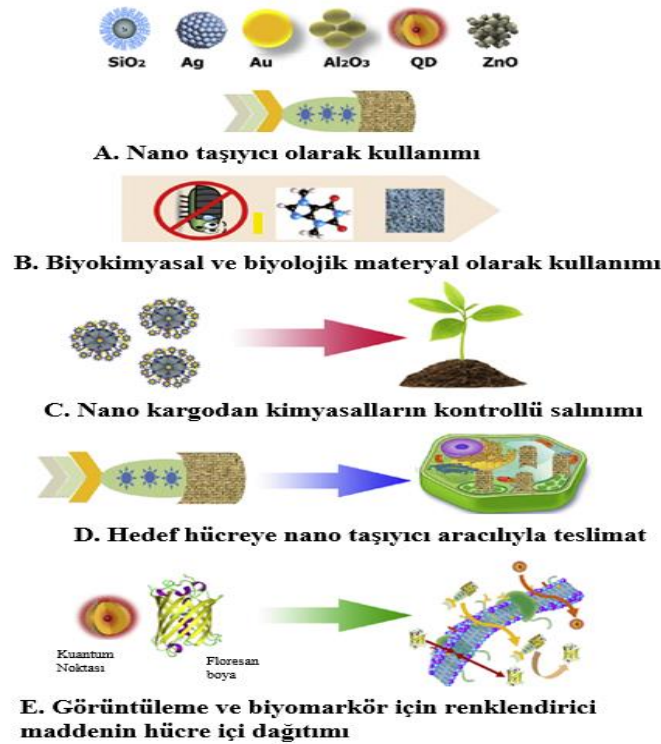
Şekil 1 Nanopartiküllerin çeşitli kategorilerde gruplandırılması [8]

Fig 1 Grouping of nanoparticles into various categories [8]

Nanopartiküller, belirli metal tuzlarının indirgenmesi yoluyla oluşturulan ve bu indirgenme sürecinde bağımsız hareket edebilen nano ölçekli sistemlerdir. Küçük sistemlere nüfuz etme kapasitesine sahip olan bu partiküller, farklı biyokimyasal ve fizyolojik yolları tetiklemek üzere bitki içerisindeki uzak bölgelere ulaşabilirler. Bu nanopartiküllerin boyutu ve konsantrasyonu, kullanılan bitki türüne özgüdür. Nanopartiküller; kalite iyileştirme, büyüme ve besin değerini geliştirme, gen koruma vb. dahil olmak üzere bitki sisteminin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Bitki sistemlerine nanopartiküllerin entegre edilmesi ile tarım kimyasallarının (gübre, pestisit, herbisit) kontrollü bir şekilde salınımı, biyomolekülerin (protein, aktivatör) hedefe yönelik iletimi gibi programlanabilir özelliklerin kazandırılması mümkündür [5]. Nanopartiküllerin bitki sistemlerinde translokasyon kabiliyetinin iki ana özelliğe bağlı olduğu bildirilmiştir: (1) nanopartiküllerin boyutu ve (2) nanopartiküllerin yüzey yükü.

Boyutlarına bağlı olarak, çoğu nanopartikül, bitkiler içinde yer değiştirebilmektedir. Bununla birlikte, negatif yüzey yüküne sahip nanopartiküller, bitki içine entegrasyonları daha kolay gerçekleşmekte ve bitki içinde yer değiştirme potansiyeline sahip olmaktadır, böylece bitkinin büyümesini ve korunmasını desteklerler [10].

Nanopartiküller, bitkilerde gösterdikleri önemli etkilerinden dolayı, son yıllarda tarım sektöründe de kendilerine yer bulmuşlardır. Bitki sistemlerinde yapılan çeşitli uygulamalar; I) nanomalzemelerin nanotaşıyıcı olarak kullanılması, II) böcek kovucular, böcek ilaçları ve gübrelerin nanomalzemeler ile birleştirilmesi ya da kapsülize edilmesi, III) nano taşıyıcılardan kimyasalların (böcek kovucular, böcek ilaçları ve gübreler vb.) hedefe kontrollü salınımı, IV) biyoaktif moleküllerin bitki hücrelerine nano taşıyıcı aracılı teslimi, V) görüntüleme ve biyomarkör amaçlı kullanılan renklendirici maddelerin (kuantum noktaları, floresan boyalar vb.) nano taşıyıcılar aracılığı ile hücre içi teslimi ve, VI) hastalıklara karşı direncin artırılması şeklinde sayılabilir (Şekil 2) [9].



Şekil 2 Nanopartiküllerin bitkilerdeki çeşitli uygulama alanları [9]

Fig 2 Various applications of nanoparticles in plants [9]

Nanopartiküllerin bitkisel sistemlerde abiyotik stres faktörlerine karşı uygulanmaları

Nanopartiküller; genellikle tohum çimlenmesini iyileştirmek, bitki büyümesini ve verimini artırmak, bitki genetik modifikasyonunu sağlamak, biyoaktif bileşiklerin üretimini iyileştirmek ve bitki korumasını sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [11 12]. Bitkilerde nanopartikül uygulamaları, çoğunlukla biyotik ve abiyotik strese karşı bitkilerdeki dayanıklılığı artırmaya ve dayanıklılık ile ilişkili yolları harekete geçirmeye yöneliktir [13, 14, 15]. Bitkiler durağan oldukları için tuzluluk, kuraklık, yüksek ve düşük sıcaklıklar, ağır metaller, taşkın, yüksek ve düşük ışık yoğunlukları, ultraviyole (UV) vb. çevresel stres koşullarıyla yüzleşmek zorundadırlar. Bu tip stres koşulları, makromoleküllerin parçalanmasına ve membran yapısının bozulmasına yol açan hücre toksisitesini tetikleyerek bitki büyümesini inhibe edici reaktif oksijen türlerinin çoğalmasına neden olmakta ve bunun sonucunda sitotoksikite ve genotoksikite meydana gelerek, bitkilerin büyümesi inhibe edilmektedir [16, 17].

Bitki büyümesi; su basıncı, tuzluluk, kuraklık, yüksek sıcaklık ve ultraviyole (UV) radyasyon gibi çeşitli çevresel koşullardan (abiyotik stres koşulları) etkilenmektedir. Bu nanopartiküllerin boyutu, şekli, yüzey yükü ve geniş yüzey alanı, bitkilerin büyümesini artırmaktadır. Nanopartiküller, ayrıca bitkilerin çevresel streslere karşı korunmalarında da önemli bir role sahiptirler, çünkü bu partiküllerin ROS'u (Reaktif Oksijen Türleri) temizleyen antioksidan enzimleri taklit edebilme özelliği bulunmaktadır. Reaktif oksijen türleri, oldukça yüksek reaktiviteye sahip moleküller olup başta mitokondri olmak üzere hücre organellerinde gerçekleşen, normal metabolizmanın sonucu olarak veya yaşlanma, radyasyon, inflamasyon ve kimyasal ajanlara maruz kalma gibi nedenlere bağlı olarak üretilirler [19, 20]. Nanopartiküller, bitki verimini düzenlemek ve abiyotik stres koşulları altında tolerans mekanizmalarını artırarak tarımsal üretimin mevcut ve gelecekteki sınırlamalarının üstesinden gelmek için etkili ve umut verici bir araç olarak kabul edilirler [18]. Çeşitli çalışma bulgularına dayanılarak nanopartiküllerin bitki büyümesini kolaylaştırmanın yanı sıra çevresel streslere karşı da toleransı oluşturma potansiyeline sahip oldukları ifade edilmektedir [10, 21].

Bitki sistemlerinde nanopartiküllerin çevresel stres faktörlerine karşı kullanımları kuraklık, ısı, tuzluluk ve UV stresi alt başlıkları halinde aşağıdaki gibi açıklanmaya çalışılmıştır:

a) *Kuraklık stresi*: Bitkilerdeki kuraklık stresi üzerine yapılan çalışmalarda, farklı nanopartikül çeşitlerinin kuraklık stres toleransı üzerinden olumlu sonuçları belirlenmiş

ve bu çalışmalar sonucunda kuraklık stresi altındaki fidelerde, büyümeyi ve fizyolojik parametreleri iyileştirdikleri bildirilmiştir. TiO_2 nanopartikülünün, tohum çimlenmesi ve fide büyümesi üzerindeki etkileri araştırılmış ve kuraklık stresi altındaki bitkilerde biyokütleyi artırma, bağıl su içeriğini (RWC) koruma ve antioksidan enzimleri artırmaya yardımcı olduğu gösterilmiştir. Fe_2O_3 nanopartiküllerinin karbonhidrat metabolizmasını ve stoma hareketlerini değiştirerek kuraklık stresine karşı toleransı artırdığı, ZnO nanopartiküllerinin ise fotosentetik pigment bozunmasını azalttığı, böylece fotosentez hızını ve stoma hareketlerini artırdığı kanıtlanmıştır. Nişasta ve sükröz sentezi de UDP glikoz pirofosforilaz, fosfoglucoizomeraz ve sitoplazmik invertaz gibi anahtar enzimlerin yönlendirmesiyle artmakta, kuraklık stresi altındaki bitki sistemlerinin daha iyi performans göstermesi sağlanmaktadır. Bu durum, ZnO 'yu kuraklık stresinin olumsuz etkilerini azaltmak için potansiyel bir nano ajan yapmaktadır [22].

b) Isı stresi: Nanopartiküller, ısı stresini azaltmak amacıyla bitki sistemlerinde kullanıldıklarında olumlu sonuçlar alınmıştır. Isı stresinin etkilerini azaltmak üzere farklı konsantrasyonlarda nanopartiküller uygulandığında, bitki büyümesinde ve hidrasyonda artışlar meydana gelmiştir [23]. Wang ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, mısır bitkisinde CeO_2 nanopartiküllerinin uygulanması sonrasında H_2O_2 'nin aşırı üretilmesine ve HSP70 geninin düzenlenmesine yol açılmış, ayrıca nanopartiküllerin hücrede stoma açıklığını düzenleyerek ısı stresinin etkilerini azalttığı belirtilmiştir [24]. Kareem ve ark., 2022 yılında maş fasulyesinde yaptıkları araştırmalarında nano ZnO partiküllerinin yüksek sıcaklık koşullarında bulunan bitkilere uygulanmasının klorofil aktivitesini, gaz değişim parametrelerini ve enzimatik dengeyi artırdığı ve bunun da bakla sayısında, boyutunda ve toplam tane veriminde artışa neden olduğu bildirilmiştir [25]. Isı stresi altındaki buğday fidelerinde ZnO ve TiO_2 uygulaması hem kök hem de sürgün parametrelerinde membran stabilitesini ve antioksidan savunma mekanizmasını iyileştirmiştir [26].

c) Tuzluluk stresi: Tuzluluk stresi altındaki bitkilerin büyümelerini ve hayatta kalmalarını iyileştirmek için etkili bir araç olarak nanopartiküller, son yıllarda çok dikkat çekmektedir. Nanopartiküllerin tuzluluk stresi altındaki bitkilerde yararlı etkileri olduğu farklı çalışmalarda gösterilmiştir. Nanopartiküllerin bitki sistemlerinde hormonal konsantrasyonları, antioksidan enzim aktivitesini, iyon homeostazını ve gen ekspresyonunu etkilediği için tuzluluk stresine karşı bitkinin tepkilerini manipüle

edebildiği bildirilmiştir [27, 28]. Uygulanan nanopartiküllerin boyutuna, şekline ve konsantrasyonlarına ek olarak, bu etkiler farklı çevre koşulları ve farklı bitki türleri arasında da değişiklik gösterebilmektedir. Tuzluluk stresine maruz kalan bitkilerde gözlenen potasyum\sodyum oranının yüksek bulunması, tuzluluk stresine karşı bitki dayanıklılığı için en kritik faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu stres altındaki bitki, nanopartikül uygulamasına tabi tutulması sonucunda, bitki hücrelerindeki ozmotik potansiyelin artması ile iyileştirilebilmektedir [29]. Farhangi-Abriz ve Torabian'ın 2018 yılında yapmış oldukları araştırmaya göre, SiO₂ nanopartiküllerinin yapraktaki K⁺ iyon konsantrasyonunu artırarak tuz stresi altındaki soya fasulyesinin fide büyümesini artırdığı gösterilmiştir [30]. Ayrıca tuzluluk stresi de dahil olmak üzere abiyotik streslere yanıt olarak bitkiler tarafından reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretildiği bilinmek ile birlikte stres altındaki bitkiler, hücrelerindeki aşırı ROS ile başa çıkmak için antioksidan enzimler geliştirmektedirler. Birçok çalışmada, nanopartiküllerin antioksidan enzim düzeylerini artırdığı gösterilmiştir. Bu da partiküllerin antioksidan özelliklere sahip oldukları için bitkilerdeki oksidatif stresin yaratmış olduğu koşulların üstesinden gelmelerine yardımcı oldukları bildirilmiştir [31, 32, 33].

d)Ultraviyole stresi: Dünya yüzeyinde, alınan ultraviyole-B (UV-B) radyasyonunun artışı ile ürün bitkilerinin veriminde dünya çapında düşüşler meydana gelmektedir. Yüksek UV-B seviyesinde (ROS) konsantrasyonu artmakta, antioksidan enzim aktivitesi düşmekte, fotosentetik hız düşmekte, DNA ve hücre zarları zarar görmekte ve mikrotübül yapısı bozulmaktadır. Bütün bunların sonucunda ise bitkilerin büyümesi olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, UV-B'nin bitkiler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için yeni stratejilere ihtiyaç duyulmuştur. Nanopartiküller; fotosentezi ve flavonoid birikimini artırarak, antioksidanları taklit ederek veya antioksidan enzim aktivitelerini iyileştirerek, bitki hücrelerinde mikrotübül depolimerizasyonunu önleyerek ve oksidatif stresin azalmasını sağlayarak UV-B stresini önemli ölçüde azaltmaktadırlar [34].

Nanopartiküllerin bitki sistemlerindeki olumsuz etkileri; çeşitli biyokimyasal, fizyolojik ve moleküler engellerle ilişkilidir. Bitkilerde yüksek konsantrasyonlarda nanopartikül bulunması; klorofil içeriğini inhibe edebilmekte, terlemeyi ve fotosentetik oranları azaltabilmekte ve elektron taşıma aktivitesini düşürebilmektedir [10, 17, 35].

Bitki büyümesine ve gelişmesine olumsuz yönde etki etmeyen güvenli nanopartikülleri tasarlama ve sentezleme gereksiniminin karşılanması durumunda, bitkilerde nanopartiküller ile ilişkili alım ve mobilizasyon mekanizmaları hakkında bilgi eksikliğinin giderilmesinin yanı sıra, multidisipliner yaklaşımların katkılarıyla da nanopartiküllerin kullanım alanlarının daha çok çeşitleneceği ve kullanımlarının giderek artacağı öngörülmektedir.

Farklı Nanopartikül Çeşitlerinin Bitki Sistemlerinde ve Bitki Doku Kültürlerindeki Uygulama Alanları

Nanopartiküllerin özelliklerine bağlı olan bitki-nanopartikül etkileşimi, bitkilerde farklı morfolojik ve fizyolojik değişikliklere neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, nanopartiküllerin bitki sistemlerinde olumlu ve olumsuz etkilerinin var olduğu, bunun da kullanılan nanopartikül çeşidine, konsantrasyonuna ve nanopartikül uygulanan bitkinin türüne özgü olduğu belirlenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda; bitki sistemlerinde uygulanan nanopartiküllerin tohum çimlenmesi, kök ve sürgün uzunluğu, bitki büyümesi ve fotosentezdeki rolü üzerinde bazı çalışmalar yapılmıştır. Nanopartiküllerin bitki doku kültürlerinde kullanımlarıyla ilgili olarak da tohum çimlenmesi, büyümenin iyileştirilmesi, genetik transformasyon, genetik modifikasyon, kontaminasyonun eliminasyonu, bitki koruma, *in vitro* rejenerasyon, (kallus, organ ve embriyo), somaklonal varyasyon ve sekonder metabolit üretimi vb. konularında çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir [11, 12]. Bitki doku kültürlerinde ve bitki sistemlerinde nanoteknolojinin kullanımından olumlu sonuçlar alındığını gösteren çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu nedenle makalenin bu kısmında, bitki doku kültürlerinde ve bitki sistemlerinde kullanılan nanopartikül çeşitlerinin tanıtılması esas alınarak, uygulama alanlarının belirlenmesine çalışılmıştır.

Metalik/metal oksit bazlı nanopartiküller

Bitkide büyüme ve gelişme çalışmalarında kullanılan metalik nanopartiküller, metal oksitler ve saf metaller olmak üzere iki geniş kategoride ele alınmaktadır [36].

Bitki sistemlerinde uygulamalar

Bitki büyümesi üzerindeki etkileri araştırılan nanopartiküller arasında gümüş nanopartikülleri (Ag NP'ler), çinko oksit nanopartikülleri (ZnO NP'ler), altın nanopartikülleri (Au NP'ler), silika nanopartikülleri (SiO₂ NP'ler), nanoselenyum nanopartikülleri (Se NP'ler), seryum oksit nanopartikülleri (CeO₂ NP'ler), bakır ve bakır

oksit nanopartikülleri (Cu ve CuO NP'ler), demir nanopartikülleri (Fe NP'ler), nikel oksit ve nikel hidroksit nanopartikülleri (NiO ve Ni(OH)₂ NP'ler), alüminyum oksit nanopartikülleri (Al₂O₃ NP'ler), indiyum oksit (In₂O₃ NP'ler), kobalt oksit (CoO, Co₂O₃, Co₃O₄ NP'ler) ve neodimyum oksit nanopartikülleri (Nd₂O₃ NP'ler) yer almaktadır [37]. Tüm metal oksit nanopartikülleri, bitkilerin büyüme ve gelişimi üzerinde çeşitli etkilere sahiptirler. Bu etkiler; tohum çimlenmesi, sürgün/kök gelişimi, biyokütle üretimi ve fizyolojik/biyokimyasal aktiviteler açısından indükleyici niteliktedir [36]. Metalik nanopartiküllerin bitkilerde inhibe edici özelliği; morfo-anatomik, fizyolojik ve genetik bileşenleri etkilemesi ve daha yüksek konsantrasyonlarda ise toksisiteye neden olmasıyla ilişkilendirilmiştir [38, 39]. Metal ve metal oksit bazlı nanopartiküller ile yapılan çalışmalar incelendiğinde; farklı bitki türlerinin farklı konsantrasyonlarda, farklı nanopartikül çeşitlerine farklı tepki verdikleri gözlenmiştir [40].

Dekontaminasyon ajanı olarak kullanım: Abdulrazaq'ın 2018 yılında yapmış olduğu bir çalışmada, domates bitkisinde kurşuni küf hastalığı (*Botrytis cinerea*) üzerinde ZnO ve CuO nanopartiküllerinin ve nanopartikül-kekik (*Origanum vulgare*) uçucu yağ karışımlarının antifungal aktivitesi araştırılmıştır. ZnO ve CuO nanopartikülleri 5, 50, 100, ve 200 mg L⁻¹ konsantrasyonlarda uygulanmıştır. Buna ek olarak, 50 ve 200 mg L⁻¹ konsantrasyonda ZnO ve CuO; 0, 10, 20, 40, 80, 160, 320 ve 640 µl L⁻¹ kekik uçucu yağı ile karıştırılarak yapraklara uygulanmış ve kurşuni küf oluşumu incelenmiştir. Denemeler sonunda iki nanopartikülün de kurşuni küf kolonisi oluşumu üzerinde baskılayıcı etkiye sahip olduğu gösterilmiştir [41]. Mahna ve ark.'nın (2008) yapmış oldukları çalışmada ise, Arabidopsis tohumları, patates yaprakları ve domates kotiledonlarının yüzey dezenfeksiyonu üzerine gümüş nanopartikülleri ile muamelenin etkisi araştırılmıştır. Eksplantların 1 ve 5 dakika süreyle 100 mg L⁻¹ Ag nanopartikülleri ile muamele edilmesinin tohum, yaprak veya kotiledonların dekontaminasyonu (%100) için ideal olduğu ve bu işlemin eksplant canlılığı üzerinde herhangi bir olumsuz etkisinin bulunmadığı raporlanmıştır. Bununla birlikte, daha yüksek konsantrasyonlarda Ag nanopartikülleri ile muamele yapıldığında ise tohum çimlenmesi, yaprak ve kotiledon sağ kalımının azaldığı bildirilmiştir [42].

Shokri ve ark.'nın 2013 yılında gül nodal segmentlerini kullanarak yapmış oldukları çalışmada, eksplantların 0, 100, 200 ve 400 ppm konsantrasyonlarında gümüş nanopartiküllerine daldırıldıkları denemeler sonucunda, 200 ppm'lik konsantrasyon

kullanımının dekontamine kültürler elde etmek için en iyi daldırma işlemi olduğu belirlenmiştir [43].

Bitki doku kültürlerinde uygulamalar

Antioksidan savunma sistemi: Bitkiler, oksidatif hasarı önlemek ve aynı zamanda metal oksit toksisitelerine karşı direnci artırmak için enzimatik ve enzimatik olmayan bileşenleri içeren antioksidan savunma zırhlarını geliştirmişlerdir [44]. Poborilova ve ark. (2013)'na ait bir çalışmada, tütün hücre süspansiyon kültürlerine Al_2O_3 nanopartiküllerinin ($10-100 \mu g mL^{-1}$) eklenmesinin, reaktif oksijen (ROS) ve reaktif azot (RNS) türlerinin üretimi yoluyla hücre canlılığını önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir [45]. Iannone ve ark. (2016)'nın yapmış oldukları çalışmalarda; Fe_3O_4 nanopartikülleri ile muamele edilen buğday bitkilerinde süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve peroksidaz (POX) enzimlerinin aktivitelerinde artışlar kaydedilmiştir [46]. Benzer bir durum, Okupnik ve Pflugmacher (2016) tarafından *Hydrilla verticillata* bitkisi ile gerçekleştirdikleri çalışmada TiO_2 nanopartikül kaynaklı katalaz ve glutatyon redüktaz aktivitelerinde artışların meydana geldiği ifade edilmiştir. Nanopartikül kaynaklı toksisiteye karşı bitki savunmasının altında yatan kesin mekanizma tam olarak bilinmemekle birlikte, bitkinin farklı bölümlerinde metal oksit nanopartiküllerinin absorpsiyonu ve translokasyonunun; konsantrasyonlarına, çözünürlüklerine ve maruz kalma sürelerine bağlı olduğu ifade edilmiştir [47].

Tabay 2021 yılında, CuO ve ZnO nanopartiküllerinin mısır bitkisinde büyüme, gelişme ve bazı genlerin ekspresyonu üzerine etkilerini incelediği bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, mısır fidelerine 3 farklı konsantrasyonda CuO ($250, 500, 1000 mg L^{-1}$) ve ZnO ($100, 200, 400 mg L^{-1}$) nanopartikülleri uygulanmış ve kök-gövde uzunluğu, malondialdehit (MDA) miktarı, hidrojen peroksit (H_2O_2) ve süperoksit anyon ($O_2^{\cdot-}$) seviyesi, süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT), peroksidaz (POD), glutatyon redüktaz (GR) aktivitesi, glutatyon (GSH) miktarı ve ayrıca *sod, cat, pod, gr, gst, gpx* gibi antioksidan sistemle ilişkili genlerin ekspresyonlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Sonuç olarak, uygulanan CuO ve ZnO nanopartiküllerinin kök-gövde uzunluğunu, klorofil a ve b miktarını azalttığı, MDA miktarını, H_2O_2 ve $O_2^{\cdot-}$ seviyesini ise artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca nanopartikül uygulamalarının (tüm konsantrasyonlarda) fide kök ve yapraklarındaki SOD enzim aktivitesini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ek olarak, mısır fidelerinin kök ve gövdelerindeki CAT enzim aktivitesinin

CuO nanopartikül uygulaması ile azaldığı, ZnO nanopartikül uygulaması ile arttığı gözlenmiştir. POD enzim aktivitesinin ise fidelere uygulanan CuO nanopartikülü ile arttığı, ZnO nanopartikül uygulaması ile azaldığı kaydedilmiştir. CuO ve ZnO nanopartiküllerin hem kök hem de yapraklarda GR aktivitesi ve GSH miktarını artırdığı raporlanmıştır. Son olarak, uygulanan nanopartiküllerin mısır kök ve yapraklarında SOD, CAT, POD, GR, GST, GPX gibi antioksidan sistemle ilişkili genlerin ekspresyonunu artırıp ya da azalttığı gözlenmiş ve bu nanopartiküllerin uygulanmasının fidelerde toksik etkiye yol açtığı, fidelerin antioksidan sistemini harekete geçirdiği tespit edilmiştir [48].

Dekontaminasyon ajanı olarak kullanım: Bitki doku kültürlerinde eksplantların sterilizasyonu ve aseptik koşulların korunması, *in vitro* kültürün önemli bir bölümünü kapsamaktadır. Farklı mikroorganizmaların, *in vitro* besin ortamlarında bitki hücrelerine kıyasla daha hızlı büyümeleri sonucunda, bitki hücrelerinin büyümesini inhibe ettikleri bilinmektedir. Geleneksel yöntemde, bitki organ ve dokuları, kontaminasyonu en aza indirmek için farklı antibiyotikler ve antifungal solüsyonlarla sterilize edilmektedir [6].

Nanopartiküller, özellikle *in vitro* kültürlerde sıkça karşılaşılan ve en önemli problemlerden biri olan kontaminasyon kaynağı olarak görev yapan mikroorganizmaları yok etme kapasitesine sahiptirler. Nanopartiküllerin antibakteriyel etki gösterebilmeleri için, bakteriyel hücrelerle elektrostatik çekim, Van der Waals kuvvetleri, reseptör ligand ve hidrofobik etkileşimleri sağlaması gerekmektedir. Bu etkileşimlerin sağlanabilmesi için bakteri hücreleri-nanopartikül teması şarttır. Bu temastan sonra; nanopartiküller bakteri zarını geçerek bakteri hücresinin zarının şeklini ve işlevini bozarlar. Nanopartiküller hücre zarını geçtikten sonra bakteride; oksidatif strese, heterojen değişikliklere, bozulmuş hücre zarı geçirgenliğinin yol açtığı elektrolit denge bozukluklarına ve ayrıca DNA, lizozomlar, ribozomlar ve enzimler gibi bakterilerin hücresel temel bileşenleri ile etkileşime girerek de enzim inhibisyonuna ve protein deaktivasyonuna sebep olurlar [6, 49]. Ek olarak, nanopartiküller doku kültürü ortamında antimikrobiyal olarak kullanıldıklarında; bitkilerin sağlıklı büyüme şansını ve verimini artırdığının gözlenmesi, dikkatleri bu konuda yapılan çalışmaların üzerine çekmiştir [9].

Nanopartiküllerin antibakteriyel özelliği yeni bir konu olmamakla birlikte; en bilinenleri Ag nanopartikülleri, TiO₂ nanopartikülleri ve ZnO nanopartikülleridir ve ayrıca üzerinde en derin ve iyi çalışılmış nanopartikül türleridirler. Özellikle gümüş nanopartikülleri, gümüşün çok geniş spektrumlu bir antibiyotik olması ve bakteri direncinin neredeyse hiç

bulunmaması gibi özelliklerinden dolayı en çok ilgi göreni ve üzerinde çalışılanıdır [49]. Gümüş iyonlarının güçlü antibakteriyel, antifungal ve antiviral aktiviteye sahip oldukları ve mikroorganizmaların hücre yapısını tahrip ettikleri ifade edilmiştir [50]. Gümüş nitrat gibi gümüş bazlı bileşiklerin de mikroorganizmalar açısından oldukça toksik olduğu kabul edilmektedir [6].

Odunsu bitkiler söz konusu olduğunda, *in vitro* kültürlerde kontaminant kaynağının yok edilmesi büyük bir zorluktur. Rostami ve Shamsavar (2009) tarafından bu alanda yapılan bir çalışmada, gümüş nanopartiküllerinin kültür ortamına 4mg L^{-1} konsantrasyonda eklenmesinin, zeytinin *in vitro* kontaminasyonlarını ortadan kaldırmada etkili olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada, 9 yıllık zeytin bitkisinin nod ve sürgün uçları eksplant kaynağı olarak kullanılmış ve 1 dakika boyunca %70 EtOH, ardından 10 dakika boyunca %10 Clorox ile muamele edilmiştir. Bu sterilizasyon yöntemi ile %51,4 dekontamine kültürler elde edilmiş, fakat eksplantlar EtOH ve Clorox'a maruz bırakıldıktan sonra 60 dakika boyunca 100 mg L^{-1} gümüş nanopartikülleri ile muamele edilmeleri durumunda ise kontaminasyon tamamen ortadan kaldırılmakla birlikte, eksplantlardan çok düşük bir sağ kalım yüzdesi (%18) sağlanmıştır. Öte yandan, kültür ortamına gümüş nanopartiküllerinin (4 mg L^{-1}) eklenmesi, zeytin eksplantlarındaki içsel kontaminantları baskılamış ve eksplantların büyümeleri üzerinde herhangi bir olumsuz etki oluşturmamıştır [51]. Gümüş nanopartikülleri, Sarmast ark. (2012) tarafından doku kültürlerinde *Araucaria excelsa* eksplantlarının dekontaminasyonu için başarıyla kullanılmıştır [52]. Bunu destekleyici bir çalışma olarak geçici daldırma sistemlerinde (TIS) kontaminasyonun ciddi bir sorun olduğu gerçeğinden yola çıkarak, Spinoso-Castillo ve ark.'nın (2017) yapmış oldukları bir çalışmada, vanilya bitkisinde sürgün rejenerasyonu için MS sıvı ortamında farklı konsantrasyonlarda (0, 25, 50, 100 ve 200 mg L^{-1}) gümüş nanopartikülleri kullanılmıştır. 50, 100 ve 200 mg L^{-1} gümüş nanopartiküllerini içeren besin ortamlarında bakteriyel kontaminasyonun azaldığı, 25 ve 50 mg L^{-1} gümüş nanopartikülleri bulduran ortamlarda büyüme uyarımının gözlemlendiği, 100 ve 200 mg L^{-1} gümüş nanopartikülleri içeren ortamlarda ise inhibisyon tespit edildiği raporlanmıştır [53]. Başka bir çalışmada ise; Abdi ve ark. (2008), *Valeriana officinalis*'te bakteriyel kontaminasyonu kontrol etmek için ilk kez Ag nanopartiküllerini kullanmışlardır. Serada yetiştirilen bitkilerden sağlanan tek nodlu eksplantların, 1 dakika %70 EtOH, 1 dakika %10 Clorox ve ardından 180 dakika boyunca 100 mg L^{-1} Ag

nanopartikülleri ile yüzey dezenfeksiyonu yapılmıştır. Bu işlem sonunda, %89 dekontamine kültürler elde edilmiştir. *Valeriana officinalis* bitkisinde Ag nanopartikülleri ile muamele edilen eksplantlarda sürgün çoğaltım katsayısında ve köklenmede bir artış gözlenmemiştir [54].

Helaly ve ark. (2014) yaptıkları bir çalışmada, 3 yaşındaki muz bitkilerinden elde edilen sürgün ucu eksplantları, %80 NaOCl, %95 EtOH ve son olarak %0,1 HgCl₂ şeklinde ilerleyen ve her bir ajan ile 15 dakika muamelenin söz konusu olduğu sterilizasyon aşamalarına dahil edilmişlerdir. Bu işlemler sonunda mikrobiyal kontaminasyonu önlemede başarısız olunmuştur. Araştırmacılar bunlara ek olarak, kullandıkları MS besin ortamına 100 mg L⁻¹ Zn nanopartiküllerinin dahil edilmesine karar vermişler ve kontaminasyon içermeyen kültürler elde etmişlerdir [55].

Shokri ve ark. tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada, *in vitro* kültürlerde gül bitkisinde ana sınırlayıcı faktör olan bakteri kontaminasyonlarının önlenmesi amacıyla gümüş nanopartiküllerin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, nodüler gövde segmentleri eksplant olarak kullanılmış ve iki farklı yöntem uygulanarak dekontamine hale getirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan ilki; gümüş nanopartiküllerinin 0, 50, 100 ve 150 ppm konsantrasyonlarda kültür ortamına ilave edilmesidir. Bu yöntem sonunda, direkt olarak ortama eklenen 100 ppm konsantrasyonunun bakteriyel kontaminasyonu ve fenolik eksüdasyon oranını azalttığı belirlenmiştir [43].

Bao ve ark.'nın (2022) begonya (*Begonia × tuberhybrida Voss*) bitkisinde yapmış oldukları çalışmada, farklı eksplant tipleri (petiol, nod ve çiçek salkımı) üzerinde cıva klorür ve kalsiyum hipoklorit gibi yaygın sterilizasyon ajanları yerine bakır nanopartiküllerini kullanmışlardır. Bu nanopartiküllerin, sterilizasyon ajanı olarak, somatik embriyo oluşumu, somatik embriyo morfolojisi, antioksidan aktivite ve karbonhidrat içeriği üzerindeki etkilerini belirlemek için yaprak sapı, çiçek salkımı ve nod eksplantları yaklaşık 1 mm uzunluğunda ince hücre tabakaları halinde enine kesilmiş ve somatik embriyo indüksiyon ortamında kültüre alınmışlardır. Çalışma sonunda araştırmacılar, bakır nanopartiküllerin cıva klorür ve kalsiyum hipokloritin yerini alabildiğini ve ayrıca petiol, çiçek salkımı ve nod eksplantlarının yüzey dezenfeksiyonunda etkili olduğubelirtmiştir. Bakır nanopartiküllerinin, cıva klorür veya kalsiyum hipoklorite kıyasla, eksplantların embriyogenik kallus ve somatik embriyogenezini artırdığı bildirilmiştir. Çiçek salkımı ve gövde nodu eksplantlarında, en

yüksek somatik embriyo sayısı (36,67 – 38 embriyo) ve kotiledon şeklindeki somatik embriyo (%47,37–49,09) elde edilmiştir. Bakır nanopartikül ile muamele edilmiş çiçek salkımlarının ve gövde nodlarının eksplantlarından türetilen somatik embriyo kümelerinin antioksidan enzim aktiviteleri ve nişasta içerikleri, cıva klorür ve kalsiyum hipoklorit ile steril edilenlere kıyasla enzim aktivitesi açısından yüksek ve şeker içeriğinin ise daha düşük olduğu bulunmuştur. Farklı işlemlerden elde edilen bitkicikler, seraya transfer edildikten sonra morfoloji, *in vitro* köklenme veya aklimatizasyon aşamalarında hiçbir farklılık gözlenmemiştir [56].

In vitro rejenerasyon (*kallus indüksiyonu, organogenez ve somatik embriyogenez*): Nanopartiküllerin çeşitli çalışmalarda; kallus oluşumu, sürgün rejenerasyonu ve büyümesinin yanı sıra somatik embriyogenez üzerine de olumlu etkileri gösterilmiştir. *Tecomella undulata* bitkisinde yapılan çalışmada, gövde eksplantları 10 mg L⁻¹ Ag nanopartikülleri içeren ve 2,5 mg L⁻¹ BAP ve 0,1 mg L⁻¹ IAA ile güçlendirilmiş MS ortamında kültüre alındıklarında, sürgün indüksiyon yüzdesi, sürgün sayısı ve kallus oluşumunun arttığı ortaya konmuştur [52]. Bununla birlikte, gümüş nanopartiküllerinin, *Vanilla planifolia*'da sürgün rejenerasyonu [53], *Solanum nigrum*'da yüksek frekanslı kallus oluşumu (%89) [57], *Prunella vulgaris*'te kallus çoğaltımı [58] ve *Linum usitatissimum*'da artan embriyogenez oranı (%50) [59] gibi büyüme parametreleri üzerinde çeşitli etkilerinin bulunması, *in vitro* kültürlerde etkili olduklarını kanıtlamaktadır. Ayrıca gümüş nanopartiküllerinin organogenez üzerindeki olumlu etkileri, etilen üretiminin inhibisyonu ile ilişkilendirilmektedir [37]. Yapılan çalışmalar sonunda, ZnO nanopartiküllerinin de benzer etki gösterdikleri kaydedilmiştir. Javed ve ark.'nın (2016) domates bitkisinde gerçekleştirdikleri ZnO nanopartikül çalışmasında maksimum bitki rejenerasyonu ve kallus büyümesi gözlemlenirken [60], ZnO nanopartiküllerinin *Stevia rebaudiana*'da en yüksek sürgün oluşumunu (%89,6) teşvik ettiğini bildirmiştir [61]. Muz bitkisi ile yapılan başka çalışmada ise ZnO nanopartiküllerinin maksimum somatik embriyo oluşumunu tetiklediği ve kontrole kıyasla bu embriyolardan sürgün ve kök uzunluğunun arttığı bildirilmiştir [55]. *Verbena bipinnatifida* fidelerinin *in vitro* kültürleri sırasında kullanılan bakır sülfat nanopartiküllerinin de kök ve sürgün uzunluğunu artırdığı bildirilmiştir [62]. Ayrıca CuO nanopartiküllerinin ve Co nanopartiküllerinin de *Mentha longifolia*'daki sürgünlerin sayısını ve uzunluğunu artırdıkları belirlenmiştir [63].

Phong ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, *Passiflora edulis* Sims f. *edulis* bitkisinde gümüş nanopartiküllerinin sürgün oluşumu, *in vitro* çiçeklenme ve meyve oluşumu üzerindeki etkileri araştırmışlardır Bitkinin internodları, ince hücre tabakası tekniği kullanılarak kültüre alınmış ve besin ortamına gümüş nanopartikülleri eklenmiştir. Eklenen gümüş nanopartiküllerinin sürgün sayısında önemli role sahip olduğu belirlenmiş ve elde edilen sürgünlerin, sürgün çoğaltımı için kullanılması planlanmıştır. Bu aşamada sürgünler 1 mg L⁻¹ konsantrasyonda metatopolin ve 5 mg L⁻¹ gümüş nanopartikülleri ilave edilmiş MS besin ortamında kültüre alınmıştır. Kültür sonunda eksplantlarda, maksimum sürgün sayısı (13.67 sürgün/eksplant) kaydedilmiştir. Bu sürgünlerin sürgün uçları bir sonraki adımda çiçek indüksiyonunun sağlanması için kullanılmıştır. Çiçek indüksiyonu için, 7 mg L⁻¹ bir konsantrasyonda gümüş nanopartiküller ile takviye edilmiş MS ortamında kültüre alınan sürgün uçlarının; maksimum çiçeklenme oranı (%51,67), sürgün başına maksimum çiçek sayısı (2,33 adet), maksimum çiçek açma oranına (%100) sahip oldukları belirtilmiştir. Bu çiçekler, kendi kendine döllenerek meyve oluşturmuşlardır. 90 günlük kültür sonunda da en yüksek meyve verme oranına (%56,67), meyve sayısına (1,67 meyve) ve meyve çapına (1,13 cm) ulaşıldığı belirlenmiştir [64].

In vitro kültürlerde elisitör amacıyla kullanılan nanopartiküllerin bitki fizyolojisi üzerine olan etkileri değişkendir. Arslan'ın (2022) yapmış olduğu bir çalışmada, yeşil sentez yöntemi kullanılarak üretilen Ag nanopartiküllerinin *Salvia Sclarea* bitkisinde sürgün rejenerasyonu ve sekonder metabolit içeriklerine olan etkileri araştırılmıştır. Eksplant olarak bitkinin nodal segmentleri farklı konsantrasyonlarda (0, 25, 50, 100 mg L⁻¹) AgNP veya AgNO₃ ilave edilmiş, 1 mg L⁻¹ MT (meta-topolin) ve 0,2 mg L⁻¹ IAA içeren MS besin ortamlarında kültüre alınmıştır. Kültür sonrası elde edilen verilere göre; AgNP ve AgNO₃ uygulamalarının eksplant başına düşen sürgün sayısında istatistiksel olarak farklılık olmadığı, fakat sürgün uzunluğu, sürgün yaş ve kuru ağırlığı bakımından farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Sürgün uzunluğu bakımından ise en iyi sonuç kontrol grubundan elde edilmiş olup (18.29 mm), 25 mg L⁻¹ AgNP içeren ortam (14.08 mm) ile kontrol uygulaması aynı grupta yer almıştır. Sürgün yaş ağırlığı bakımından incelendiğinde ise kontrol uygulaması ve 25 mg L⁻¹ AgNP konsantrasyonundan elde edilen değerlerin (5.33-7.53 mg) en iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Sürgün kuru ağırlığı bakımından ise en yüksek sonuç 50 mg L⁻¹ AgNP (0,74 mg) içeren ortamdan elde

edilmiştir. Denemede ayrıca, rejenere sürgün yapraklarının sekonder metabolit içeriğine bakılmış ve besin ortamına AgNP ve AgNO₃ ilavesinin yapraklardaki sekonder metabolit içeriklerini ve miktarlarını artırdığı tespit edilmiştir [65].

T. undulata'da yapılan diğer bir çalışmada ise, bitkinin nodal eksplantları 60 µg L⁻¹ Ag nanopartikülleri, 2,5 mg L⁻¹ BAP ve 0,1 mg L⁻¹ IAA ile güçlendirilmiş MS ortamında kültüre alındıklarında; sürgün sayısı, uyarılmış sürgünlerin uzunluğu ve üretilen sürgünlerin yüzdesi önemli artış göstermiştir [66]. Buna ek olarak, Ag nanopartiküller ile yapılan muamelede, eksplant yaşlanmasını geciktirdiği ve yaşama oranını artırdığı belirlenirken, daha yüksek konsantrasyonlarda (60 µg L⁻¹'in üzerinde) ise sürgün rejenerasyonu üzerinde negatif etkiye sahip olduğu belirlenmiştir [3]. *Brassica nigra* bitkisinde yapılan bir çalışmada, MS ortamına ZnO nanopartiküllerinin (500–1500 mg L⁻¹) eklenmesi tohum çimlenmesini önemli ölçüde inhibe ettiği ve ZnO nanopartiküllerinin varlığında bitkinin sürgün ve kök uzunluklarını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Öte yandan, 1–20 mg L⁻¹ ZnO nanopartiküllerini içeren MS ortamında *B. nigra*'nın gövde eksplantlarının büyümesi ve kök oluşumu gözlenmiştir [67]. Anwaar ve ark.'nın gerçekleştirdikleri bir çalışmada ise CuO nanopartikülleri (15-20 mg L⁻¹) ile muamelenin çeltik çeşitlerinde organogenezi artırdığı tespit edilmiştir [68]. *Daucus carota*'da yapılan bir çalışmada, Fe₃O₄ içeren MS ortamında somatik embriyo sayısında azalma gözlemlenmiştir [69]. TiO₂ nanopartiküllerinin de sitokin ve gibberellik asit gibi bitki büyüme düzenleyicileri ile benzer bir rol oynayabileceği bildirilmiştir [70]. Domokos-Szaabolcsy ve ark. (2012), *Nicotiana tabacum* bitkisinde yapmış oldukları çalışmada, selenyum nanopartiküllerini ve selenatı karşılaştırmışlardır. Selenyum nanopartiküllerinin organogenezi uyardığı ve kök sisteminin gelişimini %40'a kadar artırdığı, selenatta ise böyle bir etkinin gözlenmediği raporlanmıştır [71].

Sekonder metabolit üretimi: Sekonder metabolitler, insanlar için tıbbi öneme sahip bileşiklerdir. Bu durum, bitkilerde sekonder metabolit üretiminin artırılması ihtiyacını doğurmuştur. Bitki hücre, doku ve organ kültürleri yoluyla sekonder bileşiklerin içeriğini iyileştirmek için yapılan uygulamalardan bazıları; besin ortamı bileşiminin değiştirilmesi, prekürsörlerin ve elisitörlerin sağlanması ve çevresel koşulların değiştirilmesini içermektedir [37, 73]. Diğer uygulamalara ek olarak nanopartiküller de bu bileşiklerin artan üretimi için kullanılabilir. Nanopartiküllerin bitkilere ve *in vitro* kültürlerine uygulanmasının, önemli sekonder metabolitlerin üretimini sağlayabileceği çeşitli

araştırmalarla öne sürölmüştür. Örneğin, nanopartiköllerin optimize edilmiş bir şekilde bitki doku költüründe uygulanması sonucunda; gümüş nanopartiköllerin, *Echinacea purpurea* hücre süspansiyon költürlerinde kikorik asit içeriğini [74] ve çemen otu bitkisinde diosgenin konsantrasyonunu [75] artırdığı, ayrıca fenoliklerin ve fitoaleksinlerin biyosentezini de etkilediği raporlanmıştır. Bunlara ek olarak alüminyum oksit (Al_2O_3) nanoparçacıklarının eklenmesi, tütünün hücre süspansiyon költürlerindeki fenolik içeriği önemli ölçüde artırmıştır [53].

Amir ve ark.'nın 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada, sekonder metabolitleri nedeniyle tıbbi açıdan önemli ve tehdit altında bir tür olan *Caralluma tuberculata* kullanılmış ve kallus költürleri yoluyla sürdürülebilir biyokötle ve sekonder metabolit üretimi için *in vitro* költürlere farklı oranlarda gümüş nanopartiköller ve bitki büyüme düzenleyicileri eklenmiştir. Sonuçlar, çeşitli gümüş nanopartiköl konsantrasyonlarının, MS ortamında bitki büyüme düzenleyicileri ile birlikte kallus proliferasyonunu önemli ölçüde etkilediğini ve kallus yaş (kontrol grubuna göre $0.637 mg L^{-1}$ artış) ağırlığını arttırdığı göstermiştir. En yüksek yaş ($0.78 g L^{-1}$) ve kuru ($0.051 g L^{-1}$) kallus biyokötle birikimi, $0,5 mg L^{-1}$ 2,4-D, $3,0 mg L^{-1}$ BA ve $60 \mu g L^{-1}$ Ag nanopartiköllerini içeren MS besi ortamından elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, $90 \mu g L^{-1}$ Ag nanopartiköllerini içeren MS besin ortamı ile oluşturulan kallus költürlerinin fitokimyasal analizine bakıldığında ise; kalluslarda sırasıyla daha yüksek fenolik (TPC: $3,0 mg$), flavonoidler (TFC: $1,8 mg$), fenilalanin amonyak (PAL: $5,8 U mg^{-1}$) üretimi ve antioksidan aktivitesi (%90) gözlenmiştir. Ayrıca, süperoksit dismutaz (SOD: $4,8 U mg^{-1}$), peroksidaz (POD: $3,3 U mg^{-1}$), katalaz (CAT: $2,5 U mg^{-1}$) ve askorbat peroksidaz (APX: $1,9 U mg^{-1}$) gibi antioksidan enzimlerin aktivitelerini de arttırdığı tespit edilmiştir. Çalışma sonunda, gümüş nanopartiköllerin, tıbbi açıdan önemli olan *C. tuberculata*'nın kallus költürlerinde biyoaktif antioksidanların artırılması için etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [76].

Al-Oubaidi ve Mohammed-Ameen (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, gümüş nanopartiköllerini ile muamele edilen *Calendula officinalis*'in kallus költürlerinde uçucu yağların miktarlarının arttığı bildirilmiştir [77]. Benzer şekilde, titanyum oksit nanoparçacıklarının eklenmesi, *Cicer arietinum*'un kallus költürlerinde klorojenik asit, sinamik asit, gallik asit, o-kumarik asit ve tanik asit miktarını artırmıştır [3]. Ayrıca, farklı nanopartiköllerin kombinasyonlar şeklinde uygulanmasının bitkilerde metabolit içeriğini

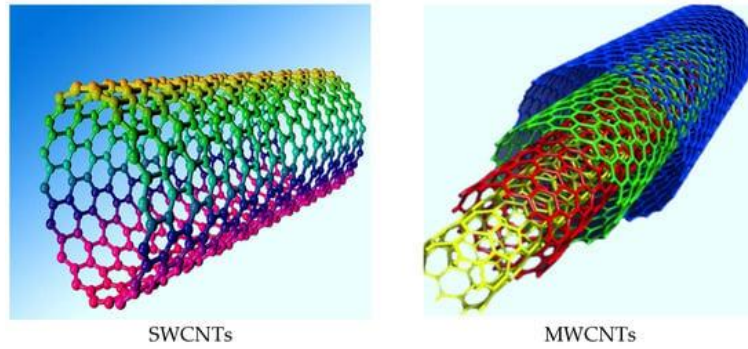
artırmada etkili olduğu da kanıtlanmıştır. Örneğin, Au-Ag nanopartiküllerin 1:3 oranlarında eklenmesi ile *Prunella vulgaris* kallus kültürlerinde toplam fenolik bileşiklerin birikiminin arttığı belirlenmiştir [58]. Bitkilerde sekonder metabolit üretiminin artırılması için kullanılan nanopartikül çeşitleri arasında Ag nanopartikülleri, ZnO nanopartikülleri, CuSO₄ nanopartikülleri, Fe nanopartikülleri ve TiO₂ nanopartikülleri yer almaktadır [62]. Nanopartiküllerin uygulanması ile *Arabidopsis thaliana* fidelerindeki antosiyaninler [78], *Stevia rebaudiana*'nın sürgün kültürlerindeki steviol glikozitler [60], *Satureja khuzestanica* sürgün kültürlerindeki rosmarinik asit ve kafeik asit [79], Aloe vera süspansiyon hücrelerinde aloin [80], *Hyoscyamus reticulatus*'un saçaklı kök kültürlerinde hiyosiyamin ve skopolamin [81] ve *Capsicum frutescens* hücre süspansiyon kültürlerinde kapsaisin [82] gibi sekonder metabolitlerin üretimini artırdığı raporlanmıştır.

Ancak nanopartiküllerin bitkilerde sekonder metabolitlerin üretimini artırdığına dair çalışmalar bulunmasına karşın, bitkilerdeki sekonder metabolizmanın hızlandırılmasının altında yatan mekanizma henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bu konu üzerine birkaç hipotez sunulmuştur. Bu hipotezler arasında, ROS'un neden olduğu stresle başa çıkmak için sekonder metabolizmayı tetikleyen nanopartiküller tarafından sekonder metabolitlerin üretilmesi ve sekonder metabolitlerin biyosentezinde yer alan çeşitli genlerin daha yüksek eksprese edilmesi bulunmaktadır. Kaveh ve ark. (2013), Ag nanopartikülleri ile muamele edilmiş bitkilerde talinol biyosentetik yolunda yer alan genlerin daha fazla aktive olduklarını bildirmişlerdir [83]. Sonuç olarak, nanopartiküllerin farklı bitkilerde ve bitki hücre kültürlerinde biyoaktif bileşiklerin üretimini önemli ölçüde etkiledikleri ve bu nedenle değerli metabolitler üretmek üzere bitki hücre, doku ve organ kültürlerinde standart elisitörler olarak kullanılacakları de ileri sürülmüştür [37].

Karbon bazlı nanopartiküller (çok duvarlı ve tek duvarlı nanotüpler)

Karbon bazlı nanaopartiküller, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, mekanik dayanım gibi benzersiz fizikokimyasal ve yapısal özellikleri taşıyan bir nanomalzeme sınıfıdır [84]. Bu nanomalzeme; metalli veya metalsiz, küçük boyutlu ve optik, elektriksel ve manyetik özelliklere sahiptir [85]. Karbon bazlı nanaopartiküller iki gruba ayrılmaktadır: çok duvarlı karbon nanotüpler (MWNT's-Multi-walled carbon nanotubes) ve tek duvarlı karbon nanotüpler (SWNT- Single-walled carbon nanotubes) [86] (Şekil 3). Yapısal

olarak, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWNT'ler), eş eksenli olarak yerleştirilmiş birçok silindirden oluşmaktadır (Şekil 3). Her silindir, içi boş bir çekirdeği çevreleyen tek bir grafen tabakasına sahip olup MWNT'lerin 2-100 nm aralığında dış çapı ve 1-3 nm'lik iç çapı bulunmaktadır [87]. Bunun yanı sıra, tek duvarlı karbon nanotüpler (SWNT'ler) ise tek bir grafen silindirden oluşmakta ve çapları 0,4 ile 2 nm arasında değişmektedir [96]. Sarmallıklarına ve çaplarına göre SWNT'ler ya metalik ya da yarı iletken olabilmektedirler [88, 89].



Şekil 3 Karbon nanotüpleri (tek duvarlı-SWCNT ve çok duvarlı-MWCNT karbon nanotüpleri) [90]

Fig 3 Carbon nanotubes (single-walled-SWCNT and multi-walled-MWCNT carbon nanotubes) [90]

Bitki sistemlerinde uygulamalar

Nanoteknolojinin hızlı bir büyüme ivmesine sahip olması, nanomalzemelerin özellikle nanopartiküllerin canlı organizmalarla etkileşiminin incelenmesi gerekliliğini de beraberinde getirmiştir. Bu iki nanotüp tipi (çok duvarlı ve tek duvarlı karbon nanotüpler), bitkilerde kullanılan ve incelenen çeşitli karbon nanomalzemelerdendir ve bitki gelişimini hem olumlu hem de olumsuz yönde etkileyebilmektedir [91]. Bu konuda yapılan birçok çalışma, MWCN nanotüplerin önemli DNA hasarına, mikronükleus oluşumuna ve kromozom sapmalarına neden olduğunu bildirmiştir [92, 93]. Karbon bazlı nanotüplerin, agregasyon nedeniyle bitki hücrelerinde fitotoksik etkilere sahip olduğu, hücre ölümüne ve doza bağlı bir şekilde ROS birikmesine neden olduğu da bilinmektedir [94, 95]. Ayrıca karbon nanopartikülleri, transgenik bitkiler elde etmek için kullanılabilen bir nanomalzemedir [85]. Bu tip tepkiler; farklı bitki türleri [94], kullanılan farklı nanopartikül çeşitleri [96] ve bitki gelişiminin değişik aşamaları arasında da farklılık göstermektedir.

Bitki doku kültürlerinde uygulamalar

Bitki doku kültürlerinde MWCNT'ler ile yapılan çalışmalara bakıldığında, *A. thaliana*'nın süspansiyon hücre kültüründe, çok duvarlı karbon nanotüp aglomeralarının (yığınlarının) olası toksisiteleri analiz edildiğinde, hücre kuru ağırlıkları, hücre canlılıkları, hücre klorofil içerikleri ve süperoksit dismutaz (SOD) aktiviteleri değerlerinde düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Bu da MWCNT aglomeralarının *A. thaliana* hücre süspansiyonu için toksik olduğunu göstermiştir [96].

Xiao-ming Tan ve ark.'nın (2009) yapmış oldukları bir başka çalışmada da çok duvarlı karbon nanotüplerin bitki hücreleri üzerindeki olası toksik etkileri araştırılmıştır. Süspanse haldeki çeltik hücreleri (*Oryza sativa* L.) MWCNT'lerle kültüre alındıklarında reaktif oksijen türlerinin (ROS) arttığı ve hücre canlılığının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Primer bir antioksidan olan askorbik asit, kültür süspansiyonuna dahil edildiğinde ROS içeriğinin azaldığı ve hücre canlılığının arttığı bildirilmiştir. Geçirimli Elektron Mikroskopu (TEM) altında yapılan incelemelerde hücre duvarlarıyla temas halinde olan tüpler gözlemlenmiş ve hücre duvarlarında MWCNT'lere sahip süspanse haldeki çeltik hücrelerinin, mikrobiyal patojenlerin yaşam döngülerini tamamlamalarını önlemek üzere ROS savunma yanıtı kaskadı olan aşırı duyarlı bir tepkiye maruz kaldıkları rapor edilmiştir [97]. Mohamed Lahiani ve ark.'nın 2013 yılında üç önemli bitki türü olan soya fasulyesi, arpa ve mısırın *in vitro* çimlenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, MWCNT'lerin etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, çok duvarlı karbon nanotüplerin tohum çimlenmesini, büyümesini ve üç önemli ürün bitkisinin gelişimini etkilediği ve MWCNT'lere maruz kalan tohumların erken çimlendikleri gözlenmiştir. Benzer şekilde, MWCNT'lerin tohum yüzeylerinde birikmesi, tüm ürün bitkilerinde tohum çimlenmesini aktive etmiştir. MWCNT'lerin mısır, arpa ve soya fasulyesinin tohum katlarına nüfuz etme yeteneği, Raman spektroskopisi ve TEM kullanılarak MWCNT'ye maruz kalan tohumların içindeki nanotüp aglomeratlarının saptanmasıyla kanıtlanmıştır. Ters transkripsiyon polimeraz zincir reaksiyonu (RT-PCR) analizi, MWCNT'lerle kaplanmış soya fasulyesi, mısır ve arpa tohumlarında çeşitli su kanalı proteinlerini kodlayan genlerin ekspresyonunun, kaplanmamış kontrol tohumlarına kıyasla arttığını ortaya koymuştur [98]. Begum ve ark. (2011)'nin yapmış oldukları çalışmada ise grafenin *in vitro*'da kök ve sürgün büyümesi, biyokütle, hücre ölümü ve

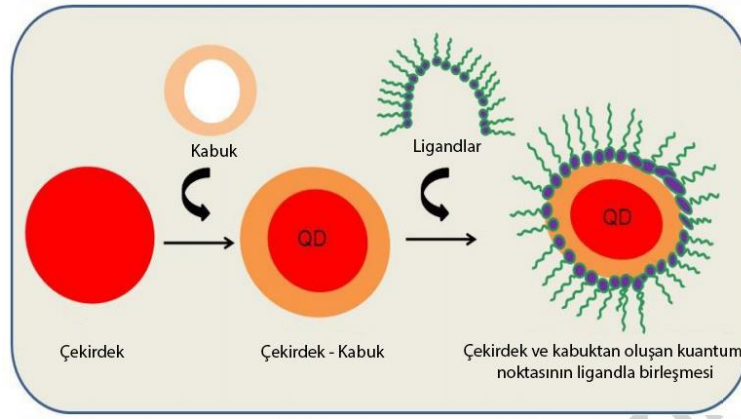
reaktif oksijen türleri (ROS) gibi parametreler üzerindeki etkileri, 500 ila 2000 mg L⁻¹ konsantrasyon aralığında araştırılmıştır. 20 günlük maruziyet sonrası, morfolojik ve fizyolojik analizlerin sonucunda, grafenin, kontrole kıyasla bitki büyümesini ve biyokütleyi önemli ölçüde inhibe ettiği gösterilmiş ve grafen ile muamele edilmiş bitkilerin yaprak sayısı ve boyunun, doza bağlı bir şekilde azaldığı bildirilmiştir. ROS ve hücre ölümünde konsantrasyona bağlı bir artışın yanı sıra nekrotik lezyonların semptomlarını gösteren önemli etkiler de tespit edilmiştir. Bu durum, oksidatif stres nekrozunun aracılık ettiği lahana, domates ve kırmızı ıspanak üzerindeki grafen kaynaklı olumsuz etkileri işaret etmiştir. Aynı koşullar altındaki marul fidelerinde ise önemli toksik etki gözlenmemiştir [95]. Ghorbanpour ve Hadian yapmış oldukları çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüplerin (25–500 µg mL⁻¹) *Satureja khuzestanica*'nın yaprak eksplantlarında kallus oluşumu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Burada kallus büyümesinin, 25-50 µg mL⁻¹ MWCNT ile desteklenmiş B5 ortamında önemli ölçüde teşvik edildiği (%64,5-%77,2) belirlenmiştir. 100-500 µg mL⁻¹'de çok duvarlı karbon nanotüplerin varlığında ise kallus biyokütlesinin azaldığı gözlemlenmiştir [79]. Khodakovskaya ve ark.'nın arkadaşlarının çalışmasında ise, 100 µg mL⁻¹ çok duvarlı karbon nanotüplerin 1 mg L⁻¹ 2,4-D içeren MS besin ortamına dahil edilmesinin tütün eksplantlarının kallus büyümesini artırdığı bildirilmiştir (kontrol grubu üzerinde %64 artış). Karbon nanotüplerinin kullanımı sonucu, hücre bölünmesi (CycB), hücre duvarı uzantısı (NtLRX1) ve su taşınımı (NtPIP1) ile ilgili genlerin yüksek aktivite göstermeleri nedeniyle kallus büyümesinin arttığı yapılan çalışmada rapor edilmiş, ancak karbon nanotüp muamelesinin (10–600 mg L⁻¹) *Arabidopsis*'te hücre canlılığını ve kuru ağırlığı azalttığı bildirilmiştir [99].

Tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT), bitki biyoteknolojisinde üzerine az çalışılmış nanopartiküllerdir. Bu nedenle az sayıda literatür bilgisi mevcuttur. Nanotüplerin bitkiler üzerindeki etkilerini belirlemeye yönelik protokollerin geliştirilmesine yardımcı olmak için, tek duvarlı karbon nanotüplerin altı bitki türünde (lahana, havuç, salatalık, marul, soğan ve domates) kök uzaması üzerindeki etkileri araştırılmış ve bu bitki türlerinde kök uzamasıyla ilişkili olarak farklı sonuçlar alınmıştır [100]. Bitki doku kültürlerinde SWCNT uygulamaları incelendiğinde, incir [101] ve mısır [102] gibi çeşitli bitki türlerinde fide büyümesini arttığı bildirilmiştir [103]. Ayrıca, Mohammed ve ark. (2011)

tarafından domates fidelerinde yapılan bir çalışmada da SWCNT nanosistemlerine maruz kalma durumunda bazı olumlu etkilerin elde edildiği ifade edilmiştir [104].

Kuantum nokta nanopartikülleri

Kuantum noktaları, endüstriyel ve biyolojik uygulamalarda kullanılan yarı iletken nanopartiküllerdir. Ekosisteme salınan önemli miktardaki kuantum noktaları, canlı organizmalarda, özellikle kültür bitkilerinde olası toksik etkileri nedeniyle endişe yaratmaktadır [78]. Buğday fidelerinde yapılan bir çalışmada, bitki kök hücrelerinde CdTe (Kadmiyum Tellürid) kuantum noktaları birikimi programlanmış hücre ölümüyle sonuçlanmıştır. Ayrıca kuantum noktalarının floresan özelliğinin, partikül yapısal bütünlüğünü ve su ya da besin ortamında toplanma eğilimlerini temsil ettiği bildirilmiştir [105].



Şekil 4 Kuantum noktasının şematik görünümü [106]

Fig 4 Schematic view of the quantum dot [106]

Bitki sistemlerinde uygulamalar

Djikanovic ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada, CdSe (Kadmiyum Selenür) kuantum noktalarının *Picea omorika*'nın hücre duvarında bulunan selüloza bağlanabildikleri ve dolayısıyla hücre duvarı için bir biyomarkör olarak kullanılabilecekleri belirtilmiştir [107]. Santos ve ark.'nın (2013), DNA onarımı ile ilgili bir dizi test ve gen ekspresyonunu ele aldıkları öncü bir çalışmada, 10 nM³ merkaptopropanoik kaplı-CdSe/ZnS kuantum noktalarının yonca hücreleri için sitotoksik ve genotoksik olduğu gösterilmiş, ayrıca CdTe kuantum nokta nanopartiküllerinin ve UV-B radyasyonunun, buğday fidelerinin köklerinde ve sürgünlerinde antioksidan savunma sistemini etkilediği raporlanmıştır [108].

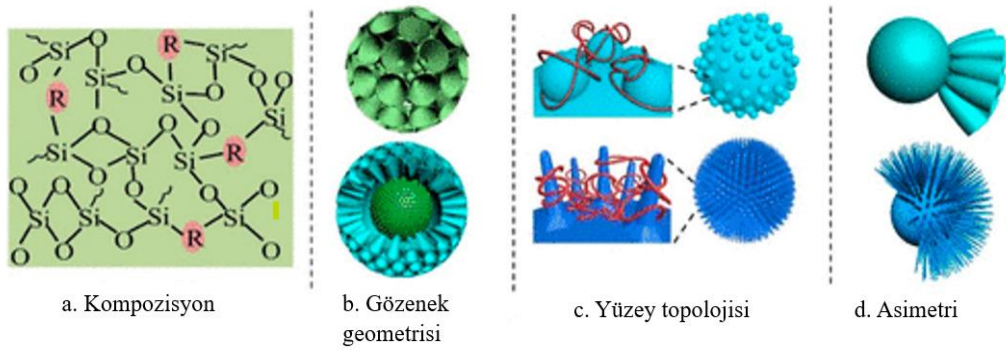
Bitki doku kültürlerinde uygulamalar

Borovaya ve ark.'nın (2016) yapmış oldukları çalışmada, sentezlenen CdS kuantum noktaları (0,097-0,049-0,025-0,012-0,006-,003 ve 0,002 mg mL⁻¹ stok çözeltiler halinde) *Nicotiana tabacum* bitkisinden elde edilen protoplast kültürlerinde kullanılmıştır. Bu çalışmada, biyolojik olarak sentezlenen CdS (Kadmiyum Sülfid) kuantum noktalarının çok hassas bir model tür olan *Nicotiana tabacum* protoplastları üzerindeki toksik etkisi araştırılmış ve düşük konsantrasyonlarda biyolojik olarak sentezlenen CdS nanopartiküllerinin herhangi bir toksik etki oluşturmadığı ortaya konmuştur [109]. Santos ve ark.'nın (2013) yapmış oldukları çalışmada ise, merkaptopropanoik asit kaplı CdSe/ZnS kuantum noktalarının eklenmesi ile ortaya çıkan etkilerin değerlendirilmesi için *Medicago sativa* bitkisinin hücre süspansiyon kültürleri kullanılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda, üstel büyüme fazı aşamasında 100 nM merkaptopropanoik asit kaplı kuantum noktaları eklendiğinde, hücre büyümesinin önemli ölçüde azaldığı ve hücrelerin %50'sinden daha azının merkaptopropanoik asit kaplı kuantum noktalarının eklenmesinden 72 saat sonra canlı kaldıkları bildirilmiştir. *Medicago sativa* hücrelerinde yapılan optik ve konfokal görüntüleme, merkaptopropanoik asit kuantum noktalarının hücrelerin sitoplazmasında ve çekirdeğinde biriktiği ortaya konulmuş ve *Medicago sativa* hücrelerinin, reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini doza ve zamana bağlı şekilde artırdığı bildirilmiştir. Ayrıca çalışma sonunda, bitki hücrelerinde merkaptopropanoik asit kaplı CdSe/ZnS kuantum noktalarının sitotoksitesinin, kuantum noktalarının özelliklerine, dozuna ve çevresel uygulama koşulları gibi bir dizi faktöre bağlı olduğu ve *Medicago sativa* hücreleri için güvenli doz aralığının 10-50 nM arasında olduğu tespit edilmiştir [108].

In vitro koşullar altında gelişmiş organlarda ve bitkiciklerde gözlenen değişiklikler olarak da ifade edilen somaklonal varyasyonlar; genellikle kromozom sayısında, kromozom yapısında, DNA dizisinde, DNA metilasyonunda, mitoz bölünmede ve transposable elementlerin aktivasyonundaki değişikliklerle ilişkilendirilirler. Somaklonal varyasyonlar, bitki doku kültürlerinde hem avantajlara hem de dezavantajlara sahiptirler [110, 111]. Nanopartiküllerin mitotik indeks ve DNA bütünlüğü üzerindeki etkileri, bitkilerde protein ve DNA ekspresyonunu değiştirmektedir [112, 113]. Nanoteknoloji, hastalıkların hızlı tespiti ve moleküler tedavisinde, ayrıca bitkilerin besinleri emme kabiliyetinin artırılmasında kullanılabilecek bir inovasyon potansiyeline sahiptir [114].

Silikon bazlı nanopartiküller

Küçük boyutlu moleküller, daha geniş ve gelişmiş uygulamalar için birçok endüstride kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında, biyomedikal ve tarım endüstrilerinde nanopartiküllerin kullanımına daha fazla önem verilmektedir. Tarımda, nanogübreler şeklinde temel makro ve mikro besinler kullanılarak mahsulün verimi önemli ölçüde artırılmaya çalışılmaktadır. Silika, toprakta bol miktarda bulunan [115], bitkilerin kök ucu yoluyla topraktan emilen ve gövdelerinde biriken bir bileşiktir. Bitkilerde hastalık ve zararlılara karşı dayanıklılık, dona karşı dayanıklılık, bitkinin su kullanımında iyileşme ve toksisitenin azaltılması gibi konularda önemlidir [116, 117]. Bunun yanı sıra, bitkinin hastalıklı kısımlarının çevresinde birikerek iyileştirici bir etki göstermektedir. Silikon, temel bir mikro besindir ve yüzyıllar boyunca bitki büyümesini artırdığı bilinmektedir [118, 119]. Bitki türlerinin çoğunluğunda silisyum birikimi, ksilemden sürgünlere kadar pasif difüzyon ve su akışı yoluyla gerçekleşmektedir [120, 121].



Şekil 5 Silika bazlı nanopartiküllerin bileşimi ve mimarisinin şematik gösterimi [122]

Fig 5 Schematic representation of the composition and architecture of silica-based nanoparticles [122]

Bitki sistemlerinde uygulamalar

Silisyum, köklerdeki etkisine benzer şekilde, yaprakların terleme oranını (%20–35) ve ksilemdeki su akış hızlarını azaltmaktadır, bundan dolayı mısır bitkisinin üzerinde yapılan çalışmalarda, su kullanım verimliliğinin artmasına yol açtığı gösterilmiştir [123, 124, 125]. Bunu destekleyici bir çalışma ise Rathinam ve ark. (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, silika, toprakla karıştırılarak mısır bitkilerine verilmiştir. *In vivo* olarak, nanosilikanın gövde yüksekliği, gövde genişliği, yaprak sayısı ve silika

içeriği gibi temel parametreler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Nanosilikanın mısır mahsulü üzerindeki etkisinin her açıdan arttığı bulunmuştur [126].

Toprak, aynı zamanda çeltik ve şeker kamışının üretimi için sınırlayıcı bir faktördür. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek üzere çeltik ve şeker kamışı dahil olmak üzere çeşitli ürün bitkileri için silikon bazlı gübreler rutin olarak tavsiye edilmektedir. Çevre dostu bir tarımsal element olan silisyumun değerli bir gübre olarak uygulanması Japonya'da ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar tarafından silikanın bitki büyümesi ve verimi üzerindeki etkisini incelemek üzere bir silikon kaynağı olarak, kalsiyum silikatlar [121] ve silisik asit [123] kullandıkları belirtilmiştir [9].

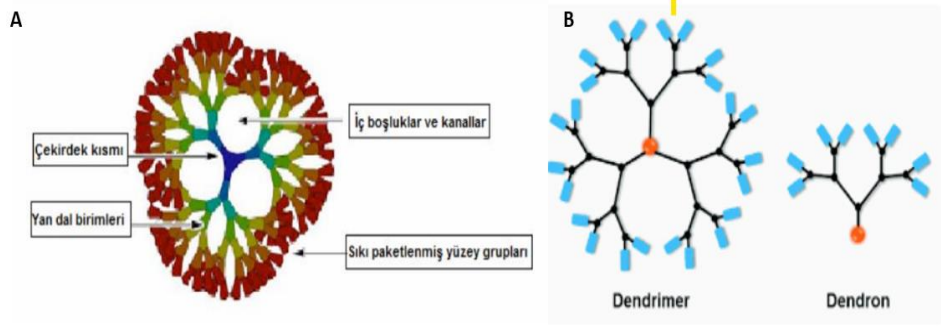
Bitki doku kültürlerinde uygulamalar

Rathinam ve ark. (2011) tarafından mısır bitkisi üzerinde nanosilikanın mahsül iyileştirici özelliği üzerinde durulmuştur. *In vitro*'da nanosilika tuzlarının uygulanmasının, mısır mahsulünün tohum çimlenmesini (%2-11), su kullanım verimliliğini (%53'e kadar) ve toplam klorofil içeriğini (%13-17) artırdığı rapor edilmiştir [126].

Polimerik nanopartiküller

Polimerik nanaopartiküller, farklı polimer tipleri (doğal ya da sentetik) ile hazırlanan, hazırlanma yöntemine göre nanokapsül veya nanoküre olarak adlandırılan, etkin maddenin partikül içerisinde çözündürüldüğü, hapsedildiği veya absorbe edildiği ya da bağlandığı matriks sistemlerdir. Polilaktik asit (PLA), Poliglikolik asit (PGA) ya da bunların kopolimeri olan Poli(d,l-laktik-ko-glikolik asit) (PLGA) gibi biyobozunur ve biyoyumlu polimerlerden üretilen nanopartiküller yaygın olarak araştırılan sistemlerdir. Nanopartiküller, nanoboyutlu yapılarından dolayı mikropartiküler sistemlere kıyasla hücre içine daha fazla alınırlar [127].

Nanoteknolojide polimerlerin bir sınıfı olan dendrimerler [128], nano boyutlu küresel makromoleküllerdir. Bu polimerlerin küresel olmasının nedeni ise yüzeyindeki dendronların (büyüyen dallanmış polimerik kollar) bir çözücü varlığında çözünmeleri ve küre şekline sahip olmalarıdır. Dendrimer örnekleri arasında PAMAM [Poli (amido amin)], PPI [Poli (propilen imin)], POPAM [Poli (propilen amin)] vb. bulunmaktadır [129].



Şekil 6 A Dendrimer kısımları [130] **B** Dendrimer ve dendron terimleri arasındaki farkların şematik gösterimi [131]

Fig 6 A Dendrimer parts [130] **B** Schematic representation of the differences between the terms dendrimer and dendron [131]

Bitki sistemlerinde uygulamalar

Santiago-Morales ve ark.'nın (2014) yapmış olduğu çalışma, amin sonlu G3 PAMAM dendrimerinin çavdar, domates ve marul gibi tek çenekli ve çift çenekli türlerin normal tohum çimlenmesini etkilediğini göstermiştir. Bulgular sonucunda, test edilen dendrimerlerin (veya nano boyutlu küresel makromoleküllerin) tohum çimlenmesi üzerinde olumsuz etkileri olduğu ve yüksek bitki sistemleri üzerinde sitotoksik etkiler ürettiği raporlanmıştır [131].

Bitki doku kültürlerinde uygulamalar

Pasupathy ve ark. (2008), poli(amidoamin) dendrimerini kullanarak bitkilerde yeni bir gen aktarım yönteminin geliştirilmesini hedeflemişlerdir. Araştırmacılar tarafından yeşil floresan proteini (GFP) kodlayan plazmit DNA'nın çim hücrelerine başarıyla dahil edildiği raporlanmış ve transfeksiyon verimliliğinin, hücre kültürü ortam pH'ını ve dendrimerin plazmit DNA'ya olan molar oranını optimize ederek daha da arttığı bildirilmiştir. Çalışmada mevcut teslimat sisteminin kullanımının, başarılı rejenerasyon sistemlerine sahip hemen hemen tüm bitki türlerini kapsayacak şekilde genişletilebileceği öne sürülmüştür [132].

Sonuç

Bu derlemede kapsamında, bitki sistemlerinde ve bitki doku kültürlerinde nanopartiküllerin avantajları hakkında bilgilendirme yapmak, bu alana olan ilgiyi arttırmak ve yeni uygulamaların keşfedilmesine yardımcı olmak hedeflenmiştir.

Nanoteknoloji, nanopartiküllerin benzersiz fizikokimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle bitki sistemleri ve bitki doku kültürlerinde yeni ve geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Nanopartiküller, bitkilerin büyümesini arttırmanın yanı sıra, aynı zamanda kuraklık, tuzluluk ve sıcaklık değişiklikleri gibi çevresel streslere karşı da koruma sağlamaktadır. Bitkilerde çeşitli olumlu sonuçlara yol açan nanopartiküllerin, bitki büyümesi ve gelişmesine yönelik etkilerini gösteren mekanizmalar hakkında çok az çalışma yapılmıştır. Ancak nanobilim, bitkilerdeki nanopartiküllerin hareket tarzını anlaşılmasına yol açan yeni fikirlere katkı sağlamaya devam etmektedir. Bitkilerdeki nanopartiküllerin fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler mekanizmalarının uygun şekilde aydınlatılması, büyüme ve gelişmeye yönelik çalışmaların iyileştirilmesine öncü olacağı bir gerçektir. Ayrıca bu nanopartiküllerin etki şekillerini, biyomoleküllerle olan etkileşimlerini ve gen ifadelerini araştırmak için fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Nanomalzemelerden özellikle de nanopartiküllerin bir taraftan bitkilerde ve bitki biyoteknolojisi üzerindeki etkileri detaylı şekilde ele alınmaya devam edilmeli, diğer yandan da nanoteknolojinin multidisipliner doğası gereği pek çok avantajının olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda, bitkilerle ilişkili farklı uygulama alanlarının kısa sürede keşfedilme potansiyeli yüksek olduğu ifade edilebilir.

Abbreviations/Kısaltmalar

NP: Nanopartikül/Nanoparticle, ark.: Arkadaşları/ Et All, UV: Ultraviyole/Ultraviolet, DNA: Deoksiribo Nükleik Asit/ Deoxyribo Nucleic Acid, ROS: Reaktif Oksijen Türleri/Reactive Oxygen Species, RSN: Reaktif Azot Türleri/Reactive Nitrogen Species, CdTe: Kadmiyum Tellürid/ Cadmium Telluride, CdSe: Kadmiyum Selenür/ Cadmium Selenide, CdS: Kadmiyum Sülfid/Cadmium Sulfide, SOD: Süperoksit Dismutaz/ Superoxide Dismutase, CAT: Katalaz/Catalase, POD: Peroksidaz/ peroxidase, APX: Askorbat Peroksidaz/ Ascorbate Peroxidase, CuO: Bakır Oksit / Copper Oxide, ZnO: Çinko Oksit/ Zinc Oxide, Fe: Demir/Iron, Au: Altın/Gold, Ag: Gümüş /Silver, Cu: Bakır/Copper, SiO₂: Silika/Silica, K: Potasyum/ Potassium, Se: Selenyum/Selenium, CeO₂: Seryum Oksit/Cerium Oxide, NiO: Nikel Oksit/Nickel Oxide, Ni(OH)₂: Nikel Hidroksit/Nickel Hydroxide, Al₂O₃: Alüminyum Oksit/Aluminum Oxide, In₂O₃: İndiyum Oksit/ Indium Oxide, Co: Kobalt/ Cobalt, CoO: Kobalt Oksit/ Cobalt Oxide, Nd₂O₃: Neodimyum Oksit/ Neodymium Oxide, CuSO₄: Bakır (II) sülfat/ Copper(II) sulfate, MDA: Malondialdehit/Malondialdehyde, H₂O₂: Hidrojen Peroksit/ Hydrogen Peroxide, O₂⁻: Süperoksit Anyonu/ Superoxide Anion, GR: Glutatyon Redüktaz/Glutathione Reductase, GSH: Glutatyon/ Glutathione, TiO₂: Titanyum dioksit/Titanium Dioxide, EtOH: Etanol/Ethanol, µg: Mikrogram/Microgram, mg: Miligram/Milligram, L: Litre/Liter, mL: Mililitre/Milliliter, µL: Mikrolitre/Microliter, NaOCl: Sodyum Hipoklorit/Sodium Hypochlorite, HgCl₂: Civa Klorür/Mercury Chloride, ppm: Milyonda Bir/Parts Per Million, MWNT: Çok

Duvarlı Karbon Nanotüp/Multi-walled carbon nanotube, SWNT: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp/ Single-walled carbon nanotubes, BA: Benzil Adenin/Benzyl Adenine, BAP: 6-Benzilaminopurin/ 6-Benzilaminopurine, IAA: Indol-3-Asetik Asit/ Indole-3-Acetic Acid, 2,4-D: 2-4 Diklorofenoksi Asetik Asit/ 2-4 Dichlorophenoxy Acetic Acid, MS: Murashige Skoog, MT: Meta-Topolin/ Meta-Topolin, TEM: Geçirimli Elektron Mikroskobu/ Transmission Electron Microscope, RT-PCR: Ters Transkripsiyon Polimeraz Zincir Reaksiyonu/ Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction, PLA: Poliaktik Asit/ Polylactic Acid, PGA: Poliglikolit Asit/ Polyglycolic Acid, PLGA: Poli-d,l-laktik-ko-glikolik Asit/ Poly-d,l-lactic-co-glycolic Acid, PAMAM: Poli-amido amin/Poly-amido amine, PPI: Poli-propilen imin/ Poly-propylene Imine, POPAM: Poli-propilen Amin/ Poly-propylene Amine, GFP: Yeşil Floresan Proteini/ Green Fluorescent Protein

Acknowledgments / Teşekkürler

We would like to thank Ege University and the Department of Bioengineering for making it easy to access resources while writing this review.

Bu derleme yazarken, kaynaklara ulaşmada kolaylık sağlayan Ege Üniversitesine ve Biyomühendislik Bölümüne teşekkür ederiz.

Funding / Fon desteği

The author did not receive support from any organization for the submitted work.

Yazar, gönderilen çalışma için herhangi bir kuruluştan destek almamıştır.

Data Availability statement / Veri Kullanılabilirliği bildirimi

The author confirms that the data supporting this study are cited in the article.

Yazar, bu çalışmayı destekleyen verilere makalede atıfta bulunulduğunu onaylamaktadır.

Compliance with ethical standards / Etik standartlara uyum

Conflict of interest / Çıkar çatışması

The author declare no conflict of interest.

Yazar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir

Ethical standards / Etik standartlar

The study is proper with ethical standards.

Çalışma etik standartlara uygundur.

Authors' contributions / Yazar katkıları

During the study, Buse CAN conducted a literature search, Buse CAN and Aynur GÜREL wrote the review. Çalışma sırasında Buse CAN literatür araştırması yapmış ve derlemeyi Buse CAN ve Aynur GÜREL kaleme almıştır.

Kaynaklar

1. Álvarez, S. P., et al., Nanotechnology and plant tissue culture. Plant Nanobionics: Volume 1, Advances in the Understanding of Nanomaterials Research and Applications, 2019. p.333-370.
2. Kim, D. H., J. Gopal, I. Sivanesan, Nanomaterials in plant tissue culture: the disclosed and undisclosed. RSC Advances, 2017. 7(58): p. 36492-36505.

3. Jain, D., et al., Synthesis of plant-mediated silver nanoparticles using papaya fruit extract and evaluation of their anti microbial activities. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2009. 4(3): p. 557-563.
4. Khan, T., et al., Production of biomass and useful compounds through elicitation in adventitious root cultures of *Fagonia indica*. *Industrial Crops and Products*, 2017. 108: p. 451-457.
5. Çiftçi, Y. Ö. and Altinkut-Uncuoğlu A., *Bitki Biyoteknolojisinde Güncel Yaklaşımlar*, 2019, Ankara: Palme Press-In Turkey
6. Cansız, E. İ. and S. Kirmusaoğlu, Nanoteknolojide nano gümüşün antibakteriyel özelliği. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018. 1: p. 119-130.
7. Seleiman, M. F., et al., Nano-Fertilization as an emerging fertilization technique: why can modern agriculture benefit from its use?. *Plants*, 2020. p. 10, 2.
8. Sanzari, I., A. Leone and A., Ambrosone, Nanotechnology in plant science: to make a long story short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2019. p: 7, 120.
9. Verma, S. K., et al., Engineered nanomaterials for plant growth and development: a perspective analysis. *Science of the Total Environment*, 2018. 630: p. 1413-1435.
10. Omar, R. A., et al., Impact of nanomaterials in plant systems. *Plant Nanobionics: Advances in the Understanding of Nanomaterials Research and Applications*, 2019. 1: p. 117-140.
11. Wang, P., et al., Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science*, 2016. 21(8): p. 699-712.
12. Ruttkay-Nedecky, B., et al., Nanoparticles based on essential metals and their phytotoxicity. *Journal of Nanobiotechnology*, 2017. 15(1): p. 1-19.
13. Ocsoy, I., et al., Nanotechnology in plant disease management: DNA-directed silver nanoparticles on graphene oxide as an antibacterial against *Xanthomonas perforans*. *ACS Nano*, 2013. 7(10): p. 8972-8980.
14. Djanaguiraman, M., et al., Cerium oxide nanoparticles decrease drought-induced oxidative damage in sorghum leading to higher photosynthesis and grain yield. *ACS omega*, 2018. 3(10): p. 14406-14416.
15. Gao, H., et al., Enhanced plant growth promoting role of mPEG-PLGA-based nanoparticles as an activator protein PeaT1 carrier in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2018. 93(11): p. 3143-3151.
16. Qados, A. M. A., Mechanism of nanosilicon-mediated alleviation of salinity stress in faba bean (*Vicia faba* L.) plants. *Journal of Experimental Agriculture International*, 2015. 7(2): p. 78.
17. Prasad, R., et al., Nanomaterials act as plant defense mechanism. *Nanotechnology: Food and Environmental Paradigm*, 2017c. p. 253-269.
18. Khalid, M. F., et al., Lemon tetraploid rootstock transmits the salt tolerance when grafted with diploid kinnow mandarin by strong antioxidant defense mechanism and efficient osmotic adjustment. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022. 41: p. 1125–1137.
19. Özcan, O., et al., Oksidatif stres ve hücre içi lipid, protein ve DNA yapıları üzerine etkileri. *Journal of Clinical and Experimental Investigations*, 2015. 6(3): p. 331-336.
20. O'Brien, J. A., et al., Reactive oxygen species and their role in plant defence and cell wall metabolism. *Planta*, 2012, 236: p. 765-779.
21. Amiri, R.M., et al., Expression of acyl-lipid $\Delta 12$ -desaturase gene in prokaryotic and eukaryotic cells and its effect on cold stress tolerance of potato. *Journal of Integrative Plant Biology*. 2010, 52(3): p. 289–297.
22. Sarraf, M., et al., Metal/metalloid-based nanomaterials for plant abiotic stress tolerance: An overview of the mechanisms. *Plants*, 2022. 11(3): p. 316.
23. Ali, S., A. Mehmood and N. Khan, Uptake, translocation, and consequences of nanomaterials on plant growth and stress adaptation. *Journal of Nanomaterials*, 2021. 2: p. 1-17.
24. Wang, S., et al., Phytotoxicity and accumulation of copper-based nanoparticles in brassica under cadmium stress. *Nanomaterials*, 2022. 12: p. 1497.

25. Kareem, H.A., et al., Zinc Oxide nanoparticles interplay with physiological and biochemical attributes in terminal heat stress alleviation in mungbean (*Vigna radiata* L.). *Frontiers in Plant Science*, 2022. 13: p. 842349.
26. Thakur, S., et al., Zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles influence heat stress tolerance mediated by antioxidant defense system in wheat. *Cereal Research Communications*, 2021. 50: p. 385–396.
27. Zulfiqar, F., Nanoparticles potentially mediate salt stress tolerance in plants. *Plant Physiology Biochemical*, 2021. 160: p. 257–268.
28. Wahid, I., et al., Silver nanoparticle regulates salt tolerance in wheat through changes in ABA concentration, ion homeostasis, and defense systems. *Biomolecules*, 2021. 10: p. 1506.
29. Tahjib-Ul-Arif, M., et al., Differential response of sugar beet to long-term mild to severe salinity in a soil–pot culture. *Agriculture*, 2019. 9: p. 223.
30. Farhangi-Abriz, S. and S. Torabian, Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity, *Protoplasma*, 2018. 255: p. 953-962.
31. You, J. and Z. Chan, ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015.6: p. 1092.
32. González-García, Y., et al., Effect of three nanoparticles (Se, Si and Cu) on the bioactive compounds of bell pepper fruits under saline stress. *Plants*, 2021, 10: p. 217.
33. Mushtaq, A., et al., Effect of silicon on antioxidant enzymes of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under salt stress. *Silicon*, 2020. 12: p. 2783–2788.
34. Soni, S., et al., Application of nanoparticles for enhanced UV-B stress tolerance in plants. *Plant Nano Biology*, 2020. p. 100014.
35. Komatsu, S., et al., A comprehensive analysis of the soybean genes and proteins expressed under flooding stress using transcriptome and proteome techniques. *Journal of Proteome Research*, 2009. 8(10): p. 4766–4778.
36. Sheikh Mohamed, M. And D. Sakthi Kumar, Effect of nanoparticles on plants with regard to physiological attributes. In *Plant Nanotechnology*, 2016. p. 119-153.
37. Khan, I., K. Saeed and I. Khan, Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019. 12(7): p. 908-931.
38. Rico, Cyren M., J. R. Peralta-Videa and J. L. Gardea-Torresdey, Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. *Nanotechnology and plant sciences: nanoparticles and their impact on plants*, 2015. p. 1-17.
39. Tripathi, D. K., et al., Silicon nanoparticles alleviate chromium phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiology Biochemical*, 2015. 96: p. 189–198.
40. Zhu, H., et al., Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring*, 2008. 10(6): p. 713-717.
41. Abdulrazaq, M. S., Application of nanoparticles and oregano (*Origanum vulgare*) essential oil against gray mold disease agent (*Botrytis cinerea*) on tomato. Yüksek Lisans Tezi, Natural and Applied Sciences Department of Agricultural sciences and Technologies, 2018. Erciyes Üniversitesi.
42. Mahna, N., S. Z. Vahed and S. Khani, Plant *in vitro* culture goes nano: nanosilver-mediated decontamination of *ex vitro* explants. *Journal of Nanomedicine and Nanotechnology*, 2013. 4(161): p. 1.
43. Shokri, S., et al., The effects of different concentrations of Nano-Silver on elimination of Bacterial contaminations and phenolic exudation of Rose (*Rosa hybrida* L.) *in vitro* culture. *International Symposium on In Vitro Culture and Horticultural Breeding*, 2013. 1083: p. 391-396.
44. Kumari, R., J. S. Singh and D. P. Singh, Biogenic synthesis and spatial distribution of silver nanoparticles in the legume mungbean plant (*Vigna radiata* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017. 110: p. 158-166.

45. Poborilova, Z., R. Opatrilova and P. Babula, Toxicity of aluminium oxide nanoparticles demonstrated using a BY-2 plant cell suspension culture model. *Environmental and Experimental Botany*, 2013. 91: p. 1-11.
46. Iannone, M. F., et al., Impact of magnetite iron oxide nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) development: evaluation of oxidative damage. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 131: p. 77-88.
47. Okupnik, A. and S. Pflugmacher, Oxidative stress response of the aquatic macrophyte *Hydrilla verticillata* exposed to TiO₂ nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016. 35(11): p. 2859-2866.
48. Tabay, D., Bakır oksit ve çinko oksit nanopartiküllerin mısır (*Zea mays* L.) bitkisinde büyüme, gelişme ve bazı genlerin ekspresyonu üzerine etkilerinin araştırılması. Doktora tezi, 2021. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Ana Bilim Dalı.
49. Aktay, A., Bitki doku kültürü uygulamalarındaki sterilizasyon prosedürlerinde nanopartiküllerin kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı, 2019. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi.
50. Lubick N., Nanosilver toxicity: ions, nanoparticles or both?, *Environ Science Technology*, 2008. 42(23): p.8617-8617.
51. Rostami, A. A. and A. Shahsavari, Nano-silver particles eliminate the *in vitro* contaminations of olive mission explants. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2009. 8: p. 1-5
52. Aghdaei, M., M. K. Sarmast, and H. Salehi, Effects of silver nanoparticles on *Tecomella undulata* Seem. Micropropagation. *Adv. Hortical Science*, 2012. p. 21-24.
53. Spinoso-Castillo, J. L., et al., Antimicrobial and hormetic effects of silver nanoparticles on *in vitro* regeneration of vanilla (*Vanilla planifolia* Jacks. Ex. Andrews) using a temporary immersion system. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2017. 129(2): p. 195-207.
54. Abdi, G., H. Salehi, and M. Khosh-Khui, Nano silver: a novel nanomaterial for removal of bacterial contaminants in valerian (*Valeriana officinalis* L.) tissue culture. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2008. 30(5): p. 709-714.
55. Helaly, M. N., et al., Effect of nanoparticles on biological contamination of *in vitro* cultures and organogenic regeneration of banana. *Australian Journal of Crop Science*, 2014. 8(4): p. 612-624.
56. Bao, H. G., et al., Copper nanoparticles enhanced surface disinfection, induction and maturation of somatic embryos in tuberous begonias (*Begonia × tuberhybrida* Voss) cultured *in vitro*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2022. p. 1-15.
57. Ewais, E. A., S. A. Desouky and E. H. Elshazly, Evaluation of callus responses of *Solanum nigrum* L. exposed to biologically synthesized silver nanoparticles. *Nanoscience Nanotechnology*, 2015. 5(3): p. 45-56.
58. Fazal, H., et al., Elicitation of medicinally important antioxidant secondary metabolites with silver and gold nanoparticles in callus cultures of *Prunella vulgaris* L.. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2016. 180(6): p. 1076-1092.
59. Kokina, I., et al., Penetration of nanoparticles in flax (*Linum usitatissimum* L.) calli and regenerants. *Journal of biotechnology*, 2013, 165(2): p. 127-132.
60. Javed, R., et al., Effect of zinc oxide (ZnO) nanoparticles on physiology and steviol glycosides production in micropropagated shoots of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017. 110: p. 94-99.
61. Alharby, H.F., et al., Impact of application of zinc oxide nanoparticles on callus induction, plant regeneration, element content and antioxidant enzyme activity in tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) under salt stress. *Archives of Biological Sciences*, 2016. 68: p. 723–735.
62. Genady, E. A., E. A. Qaid and A. H. Fahmy, Copper sulfate nanoparticales *in vitro* applications on *Verbena bipinnatifida* Nutt. stimulating growth and total phenolic content increasments. *international journal of pharmaceutical research and allied sciences*, 2016. 5: p. 196-202.

63. Talankova-Sereda, T. E., et al., The Influence of Cu-Co Nanoparticles on growth characteristics and biochemical structure of mentha longifolia *in vitro*. In Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications, 2016. p. 427-43.
64. Phong, T. H., et al., Silver nanoparticles: a positive factor for *in vitro* flowering and fruiting of purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sim f. *edulis*). Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2022. 151(2): p. 401-412.
65. Arslan, E., Gümüş nanopartiküllerin *Salvia sclarea*'da sürgün rejenerasyonu ve sekonder metabolit içeriklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalı, Moleküler Biyoloji ve Genetik Programı, 2022. Yıldız Teknik Üniversitesi.
66. Sarmast, M. K., et al., Silver nanoparticles affect ACS expression in *Tecomella undulata in vitro* culture. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2015. 121(1): p. 227-236.
67. Zafar, H., et al., Effect of ZnO nanoparticles on *Brassica nigra* seedlings and stem explants: growth dynamics and antioxidative response. Frontiers in Plant Science, 2016. 7: p. 535.
68. Anwaar, S., et al., The effect of green synthesized CuO nanoparticles on callogenesis and regeneration of *Oryza sativa* L.. Frontiers in Plant Science, 2016. p.13-30.
69. Giorgetti, L., et al., Nanoparticles effects on growth and differentiation in cell culture of carrot (*Daucus carota* L.). Agrochimica, 2011. 55(1): p. 45-53.
70. Mandeh, M., M. Omidi and M. Rahaie, *In vitro* influences of TiO₂ nanoparticles on barley (*Hordeum vulgare* L.) tissue culture. Biological Trace Element Research, 2012. 150(1): p. 376-380.
71. Prabha, D. and Y. K. Negi, Seed treatment with salicylic acid enhance drought tolerance in capsicum. World Journal of Agricultural Research, 2014. 2(2): p. 42-46.
72. Domokos-Szabolcsy, E., et al., Accumulation of red elemental selenium nanoparticles and their biological effects in *Nicotinia tabacum*. Plant Growth Regulation, 2012. 68(3): p. 525-531.
73. Khan, T., et al., Production of biomass and useful compounds through elicitation in adventitious root cultures of *Fagonia indica*. Industrial Crops and Products, 2017. 108: p. 451-457.
74. Ramezannezhad, R., M. Aghdasi and M. Fatemi, Enhanced production of cichoric acid in cell suspension culture of *Echinacea purpurea* by silver nanoparticle elicitation. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2019. 139: p. 261-273.
75. Jasim, B., et al., Plant growth and diosgenin enhancement effect of silver nanoparticles in Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). Saudi Pharmaceutical Journal, 2017. 25(3): p. 443-447.
76. Hussain, A., et al., Biosynthesized silver nanoparticle (AgNP) from Pandanus odorifer leaf extract exhibits anti-metastasis and anti-biofilm potentials. Frontiers in microbiology, 2019. p. 10.
77. Al-Oubaidi, H. K. M. And A. S. Mohammed-Ameen, The effect of AgNO₃ NPs on increasing of secondary metabolites of *Calendula officinalis* L. *in vitro*. International Journal of Pharmacy Practice, 2014. 5: p. 267-272.
78. Syu, Y. Y., et al., Impacts of size and shape of silver nanoparticles on *Arabidopsis* plant growth and gene expression. Plant Physiology and Biochemistry, 2014. 83: p. 57-64.
79. Ghorbanpour, M. and J. Hadian, Multi-walled carbon nanotubes stimulate callus induction, secondary metabolites biosynthesis and antioxidant capacity in medicinal plant *Satureja khuzestanica* grown *in vitro*. Carbon, 2015. 94: p. 749-759.
80. Raei, M., et al., Effect of abiotic elicitors on tissue culture of *Aloe vera*. International Journal of Biosciences, 2014. 5(1): p. 74-81.
81. Moharrami, F., et al., Enhanced production of hyoscyamine and scopolamine from genetically transformed root culture of *Hyoscyamus reticulatus* L. elicited by iron oxide nanoparticles, In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 2017. 53(2): p. 104-111.
82. Bhat, P. and A. Bhat, Silver nanoparticles for enhancement of accumulation of capsaicin in suspension culture of *Capsicum* sp., Journal of Experimental Sciences, 2016. 7: p. 1-6.

83. Kaveh, R., et al., Changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression in response to silver nanoparticles and silver ions. *Environmental Science & Technology*, 2013. 47(18): p. 10637-10644.
84. Dresselhaus, M. S., G. Dresselhaus and P. C. Eklund, *Science of fullerenes and carbon nanotubes: their properties and applications*. Elsevier, 1996.
85. Sabahat, S., et al., Electrochemical fabrication of self assembled monolayer using ferrocene-functionalized gold nanoparticles on glassy carbon electrode. *Electrochimica Acta*, 2011. 56(20): p. 7092-7096.
86. Iijima, S. and T. Ichihashi, Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 1993. 363(6430): p. 603-605.
87. Dresselhaus, M. S. and A. Phaedon, *Introduction to carbon materials research. Carbon nanotubes*, 2001. p.1-9.
88. Mintmire, J. W., B. I. Dunlap and C. T. White, Are fullerene tubules metallic?. *Physical Review Letters*, 1992. 68(5): p. 631.
89. Saito, R., et al., Electronic structure of chiral graphene tubules. *Applied Physics Letters*, 1992. 60(18): p. 2204-2206.
90. Zeeshan, A., et al., Electromagnetic flow of SWCNT/MWCNT suspensions in two immiscible water-and engine-oil-based Newtonian fluids through porous media. *Symmetry*, 2022. 14(2): p. 406.
91. Mukherjee, A., et al., Carbon nanomaterials in agriculture: A critical review. *Plant Science*, 2016a. 7: p. 172
92. Akin-Idowu, P. E., D. O. Ibitoye, and J., Ademoyegun, Tissue culture as a plant production technique for horticultural crops. *African. Journal Biotechnology*, 2009. 8: p. 3782–3788.
93. Ghosh, M., et al., MWCNT uptake in *Allium cepa* root cells induces cytotoxic and genotoxic responses and results in DNA hyper-methylation. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2015. 774: p. 49-58.
94. Katti, D. R., et al., Carbon nanotube proximity influences rice DNA, *Chemical Physics*, 2015. 455: p. 17-22.
95. Begum, P., R. Ikhtari and B. Fugetsu, Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. *Carbon*, 2011. 49(12): p. 3907–3919.
96. Tiwari, D. K., et al., Interfacing carbon nanotubes with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Applied Nanoscience*, 2014. 4(5): p. 577-591.
97. Tan, X. M., C. Lin and B. Fugetsu, B., Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on suspension rice cells. *Carbon*, 2009. 47(15): p. 3479-3487.
98. Lahiani, M. H., et al., Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013. 5(16): p. 7965-7973.
99. Khodakovskaya, M. V., et al., Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011. 108(3): p. 1028-1033.
100. Cañas, Jaclyn E., et al. "Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species." *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 27.9 (2008): 1922-1931
101. Flores, D., et al., A novel technique using SWCNTs to enhanced development and root growth of fig plants (*Ficus carica*). In *Technical Proceedings of the NSTI Nanotechnology Conference and Expo*, 2013. 3: p. 167-170.
102. Pourkhaloee, A., et al., Carbon nanotubes can promote seed germination via seed coat penetration. *Seed Technology*, 2011. 33: p.155–169.
103. Vithanage, M. et al., Contrasting effects of engineered carbon nanotubes on plants: a review. *Environmental geochemistry and health*, 2017. 39: p. 1421-1439.

104. Mohammad, A., et al., Physiological responses induced in tomato plants by a two-component nanostructural system composed of carbon nanotubes conjugated with quantum dots and its *in vivo* multimodal detection. *Nanotechnology*, 2011. 22(29): p. 295101.
105. Danish, R., F. Ahmed, and B.H. Koo, Rapid synthesis of high surface area anatase titanium oxide quantum dots. *Ceramics International*, 2014. 40(8): p. 12675-12680.
106. Nagihan Emeksiz, Kuantum noktaları., **Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021. Mersin Üniversitesi.**
107. Djikanović, D., et al., Interaction of the CdSe quantum dots with plant cell walls. *Colloids and Surfaces Biointerfaces*, 2012. 91: p. 41-47.
108. Santos, A. R., The impact of CdSe/ZnS quantum dots in cells of *Medicago sativa* in suspension culture, *Journal of Nanobiotechnology*, 2010. 8(1): p. 1-14.
109. Borovaya, M. N., et al., Extracellular synthesis of luminescent CdS quantum dots using plant cell culture. *Nanoscale Research Letters*, 2016. 11(1): p. 1-8.
110. Bairu, M. W., A. O. Aremu, J. Van Staden, Somaclonal variation in plants: causes and detection methods. *Plant Growth Regulation*, 2011. 63(2): p. 147-173.
111. Sivanesan, I. and B.R. Jeong, Identification of somaclonal variants in proliferating shoot cultures of *Senecio cruentus* cv.. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2012. 111(2): p. 247-253.
112. Atha, D. H., et al., Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environmental Science & Technology*, 2012. 46(3): p. 1819-1827
113. Tripathi, P. K., B. Joshi and S. Singh, Pristine and quantum dots dispersed nematic liquid crystal: Impact of dispersion and applied voltage on dielectric and electro-optical properties. *Optical Materials*, 2017. 69: p. 61-66.
114. Epstein, E., The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1994. 91(1): p. 11-17.
115. Epstein, E., Silicon, *Annual Review of Plant Biology*, 1999. 50: p. 641.
116. Ma, J. F., Y. Miyake and E. Takahashi, Silicon as a beneficial element for crop plants. *Studies in Plant Science*, 2001. 8: p. 17-39.
117. Currie, H. A. and C. C. Perry, Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies, *Annals of Botany*, 2007. 100(7): p. 1383-1389.
118. Takahashi, N. and K. Kurata, Relationship between transpiration and silica content of the rice panicle under elevated atmospheric carbon dioxide concentration. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2007. 63(2): p. 89-94.
119. Raven, J. A., The transport and function of silicon in plants. *Biological Reviews*, 1983. 58(2): p. 179-207.
120. Cunha, K. P. V. And C. W. A. Nascimento, Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009. 197(1): p. 323-330.
121. Yang, Y., et al., Silica-based nanoparticles for biomedical applications: from nanocarriers to biomodulators. *Accounts of Chemical Research*, 2020. 53(8): p. 1545-1556.
122. Gao, X., et al., Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2005. 27(8): p. 1457-1470.
123. Gao, X., et al., Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2006. 29(9): p. 1637-1647.
124. Henriët, C., et al., Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa* spp.) under controlled conditions. *Plant and Soil*, 2006. 287(1): p. 359-374.
125. Derman, S., et al., Polymeric nanoparticles. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2013. 31(1): p. 107-120.
126. Rathiam, Y., et al., Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). *International Journal of Green Nanotechnology*, 2011. 3(3): p. 180-190.

127. Samad, A., M. I. Alam and K. Saxena, Dendrimers: a class of polymers in the nanotechnology for the delivery of active pharmaceuticals. *Current Pharmaceutical Design*, 2009. 15(25): p. 2958-2969.
128. Karabulut, B., O. Kerimoğlu and T. Uğurlu, Dendrimerler-ilaç taşıyıcı sistemler. *Clinical and Experimental Health Sciences*, 2015. 5(1): p. 31-40.
129. Serdar, S. G., et al., Tekstil Sektöründe Dendrimerlerin Kullanım Alanları ve Yeni Gelişmeler. *Yekarum*, 2016. 3(2).
130. Le, N. T. T., et al., Recent progress and advances of multi-stimuli-responsive dendrimers in drug delivery for cancer treatment. *Pharmaceutics*, 2019. 11(11): p. 591.
131. Santiago-Morales, J., et al., Fate and transformation products of amine-terminated PAMAM dendrimers under ozonation and irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 2014. 266: p. 102-113.
132. Pasupathy, K., Direct plant gene delivery with a poly (amidoamine) dendrimer. *Biotechnology Journal: Healthcare Nutrition Technology*, 2008. 3(8): p. 1078-1082.