

Tohum Kaplama Teknolojileri ve Sürdürülebilir Tarım

Ali ERKUL*

Adnan Menderes Üniversitesi, Sultanhisar Meslek Yüksekokulu, Kültür Bitkileri Bölümü, Akıllı Sera Teknolojileri Programı,
Sultanhisar-Aydın, TÜRKİYE

Geliş Tarihi/Received: 05.01.2026

Kabul Tarihi/Accepted: 09.03.2026

ORCID ID

orcid.org/0000-0001-9211-7369

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aerkul@adu.edu.tr

Öz: Tohum kaplama teknolojileri, modern tarımda tohum performansını artırmak, çevresel streslere karşı koruma sağlamak ve tarımsal girdilerin etkinliğini optimize etmek için kullanılan önemli uygulamalardır. Tohum kaplama yöntemleri arasında kuru toz kaplama, tohum giydirme, film kaplama, mini peletleme, peletleme, elektrospun tohum kaplama, mikrokapsülleme ve nano-kaplama yer almaktadır. Geleneksel tohum kaplama yöntemleri uzun yıllardır kullanılmakta olsa da, son yıllarda nanoteknoloji, biyopolimer bilimi ve kontrollü salım sistemlerindeki gelişmeler, tohum kaplama teknolojilerinde önemli yenilikler getirmiştir. Bu derlemede, tohum kaplama yöntemleri hakkındaki mevcut literatür bilgileri özetlenmekte, geleneksel tohum kaplama yöntemlerinin ve nano-kaplama teknolojisinin sınırlamaları tartışılmakta ve tohum kaplamada nanoteknolojinin sürdürülebilir tarım açısından önemi vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Film kaplama, mini peletleme, peletleme, elektrospun nanolifler, mikrokapsülleme, nano-kaplama

Seed Coating Technologies and Sustainable Agriculture

Abstract: Seed coating technologies are important practices used in modern agriculture to enhance seed performance, provide protection against environmental stresses, and optimize the efficiency of agricultural inputs. Seed coating methods include dry powder coating, seed dressing, film coating, encrusting, pelleting, electrospun seed coating, microencapsulation, and nano-coating. Although traditional seed coating methods have been used for many years, recent developments in nanotechnology, biopolymer science, and controlled release systems have brought significant innovations in seed coating technologies. In this review, the current literature on seed coating methods is summarized, the limitations of traditional seed coating methods and nano-coating technology are discussed, and the importance of nanotechnology in seed coating for sustainable agriculture is emphasized.

Keywords: Film coating, encrusting, pelleting, electrospun nanofibers, microencapsulation, nano-coating

1. Giriş

Günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık 8.2 milyar olduğu tahmin edilmekte ve 2050 yılında 10 milyara ulaşacağı öngörülmektedir. Nüfus artışına paralel olarak gıda gereksinimine olan talep artış göstermektedir. Dünya nüfusunun gıda talebinin karşılanması ancak sürdürülebilir tarımsal üretimle mümkün olacaktır. Tohum, tarımsal üretimin en temel girdisi olup, gıda temini için gerçekleştirilen

tarımsal üretimin % 90'ında kullanılmaktadır (Duman, 2005). Tarımsal üretimde kullanılan kaliteli tohumluk ürün veriminde % 30'a varan bir artışa neden olabilmektedir (Ellis, 2004). Tohumun çimlenme özelliklerinin iyileştirilmesi, biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı korunması iyi bir bitki standı sağlamakta ve böylelikle verimde artış görülmektedir. Toprak ve su kaynaklarının kirlenmesini önleyen sürdürülebilir tarım

kapsamında gerçekleştirilen tohum kaplama teknolojileri üretim verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Tohum kaplama, tohum yüzeyine fiziksel, kimyasal veya biyolojik materyallerin uygulanması yoluyla tohum performansını iyileştirme sürecidir. Bu teknoloji, tohumların çimlenme oranını artırma, hastalık ve zararlılara karşı koruma sağlama, besin maddelerinin etkin kullanımını optimize etme ve stres koşullarına toleransı geliştirme gibi çok yönlü faydalar sunmaktadır (Xu ve ark., 2020). Öte yandan, tohum kaplama teknolojilerinin küresel pazardaki payı giderek artış göstermekte; 2025 yılı küresel tohum kaplama pazarının değeri yaklaşık 2.38 milyar \$ olup, 2030 yılında bu değerin 3.52 milyar \$ civarında olacağı tahmin edilmektedir (Anonymous, 2026).

Geleneksel tohum kaplama yöntemleri uzun yıllardır kullanılmakta olsa da, son yıllarda nanoteknoloji, biyopolimer bilimi ve kontrollü salım sistemlerindeki gelişmeler, tohum kaplama teknolojilerinde önemli yenilikler getirmiştir. Özellikle elektrospun nanolifler, yüksek yüzey-hacim oranı ve kontrollü geçirgenlik özellikleriyle tohum koruması ve aktif maddelerin hedefli salımı için umut verici platformlar sunmaktadır (Krishnamoorthy ve Rajiv, 2017). Öte yandan, nanomalzemelerin nano ölçekli boyutu, geniş yüzey alanı, yüksek reaktivite, biyoyumluluk ve biyolojik ayrışabilirlik gibi benzersiz özellikleri, nanomalzemeleri tohum kaplama uygulamaları için çevre dostu bir malzeme haline getirmektedir (Abrahimi ve ark., 2023).

Bu derlemede, mevcut literatür bilgileri ışığında tohum kaplama yöntemleri hakkında bilgi vermek, geleneksel tohum kaplama yöntemlerinin ve nanokaplama teknolojisinin sınırlamalarını tartışmak, tohum kaplamada sürdürülebilir tarım açısından nanoteknolojinin önemini vurgulamak amaçlanmıştır.

2. Geleneksel Tohum Kaplama Yöntemleri

Tohum kaplamada kullanılan ekipmanlar, geleneksel tohum kaplama yöntemleri ve nanolif kaplama yöntemi Şekil 1’de şematize edilmiştir.

2.1. Kuru toz kaplama

Kuru toz kaplama, tohumların kuru toz haznesi içerisine yerleştirilip karıştırıldığı bir yöntemdir (Şekil 1). Kuru tozlar, mantar veya bakteri uygulamaları için kullanılır ve ardından kurutma yapılır (Taylor, 2003). Bu yöntemde en yaygın kullanılan kuru tozların talk ve grafit olduğu belirtilmiştir (Badua ve ark., 2019). Tohumların kaplanması paslanmaz çelikten yapılmış, toz

malzemeyi bir dozaj eleği kullanarak eleyen döner bir fırçadan yararlanılır (Afzal ve ark., 2013). Tohumlara uygulanan kuru kaplama tozlarının dozajı, tohumlara yapışma sürelerine bağlı olarak artar ve tohum ağırlığının % 0.06 ila % 1’i arasında değişir (Afzal ve ark., 2020).

2.2. Tohum giydirme

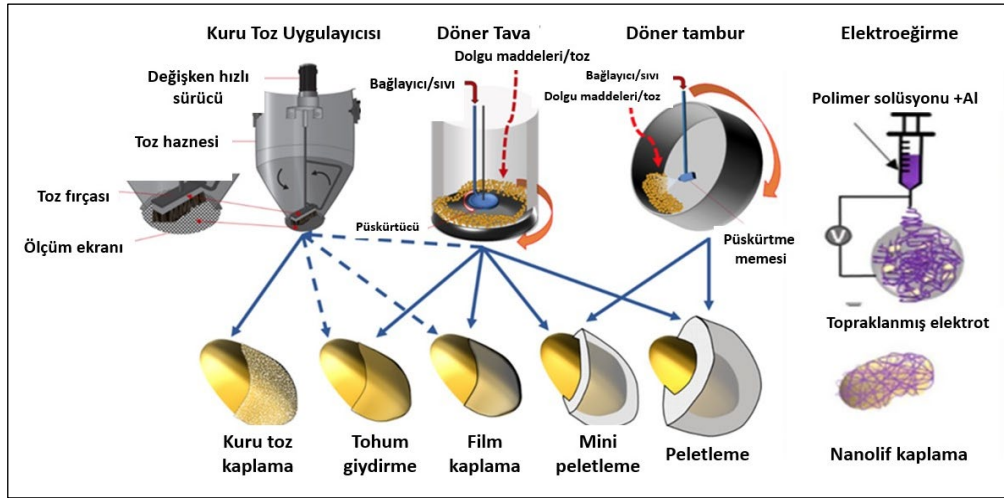
Tohum giydirme, tohumların yüzeyine düşük dozlarda aktif kaplama bileşenleri uygulamak için kullanılan yöntemlerden en yaygın olanıdır (Şekil 1). Bu yöntemde, aktif maddeler, özellikle kimyasal koruyucular geniş bir yelpazede kullanılabilir (Kimmelshue ve ark., 2019). Kaplama için kullanılan birçok ekipman türü olmasına rağmen en yaygın kullanılan cihaz döner tava (film kaplama makinesi)’dir. Sıvılar dönen bir diske uygulanır ve metal bir silindir içinde dönen tohumlara püskürtülür; ardından, taze işlenmiş tohumlar boşaltılır. Sıvı tohum işleme formülasyonlarının dozajı genellikle ağırlıkça % 0.05 ila % 1 arasında değişir (Afzal ve ark., 2020).

2.3. Film kaplama

Film kaplama, tohum yüzeyine ince bir polimerik filmin uygulanması işlemidir (Şekil 1). Bu yöntem, endüstride en yaygın kullanılan tohum kaplama tekniklerinden biridir (Taylor ve ark., 2001; Qiu ve ark., 2005; Accinelli ve ark., 2016; Jacob ve ark., 2016). Film kaplama, pigmentler, fungusitler, polimerler gibi kaplama maddesinin ince bir tabakasının doğrudan tohum kabuğunun yüzeyine uygulanmasını içerir (Pedrini ve ark., 2017). Film kaplama için kullanılan birincil tohum kaplama ekipmanı döner tavadır. Film kaplama polimerleri tohumlara uygulanmadan önce aktif bileşeni çözmek veya dağıtmak için kullanılır. Film kaplama, % 90 uygulama geri kazanımı ile sonuçlanmıştır (Taylor ve Harman, 1990). Film kaplama, işleme ve ekim işlemleri sırasında tohumun akışkanlığını artırır. Bu tohum kaplama yöntemi, tohumlara koruyucu maddelerin mükemmel şekilde iletilmesi ve kozmetik bir görünüme sahip olması nedeniyle geleneksel yöntemlere göre tercih edilmektedir (Taylor, 2003). Film kaplı tohumlarda ağırlık artışları, tohum ağırlığının % 2 ila % 5’i arasında değişmektedir. Film kaplama yöntemi, koruyucu ve işlevsel bir bariyer oluştururken, tohum boyutunu veya şeklini önemli ölçüde etkilemez (Kaur ve ark., 2024).

2.4. Mini peletleme

Mini peletleme, sıvı ve katı partiküllerin eklendiği ve tamamen kaplanmış, ancak orijinal tohum şeklinin korunduğu bir tohum kaplama yöntemidir (Taylor, 2020). Mini peletleme yönteminde kullanılan iki makina döner tava veya



Şekil 1. Tohum kaplamada kullanılan ekipmanlar, geleneksel tohum kaplama yöntemleri ve nanolif kaplama yöntemi (Afzal ve ark., 2020; Zaim ve ark., 2023)

Figure 1. Equipment used in seed coating, traditional seed coating methods and nanofiber coating method (Afzal et al., 2020; Zaim et al., 2023)

döner tambur (peletleme kazanı)'dur (Şekil 1). Mini peletleme işlemi sırasında önemli miktarda su eklenmesi nedeniyle yeni kaplanmış tohumun paketlemeden ve depolamadan önce orijinal tohum nem içeriğine kadar kurutulması gerekir. Mini peletleme işlemi sonrası ağırlık artışı % 8 ila % 500 arasında değişebilir. Bu yöntemde, orijinal tohum şekli korunur ve fide çıkışı iyileştirilir (Pedrini ve ark., 2017; Afzal ve ark., 2020).

2.5. Peletleme

Peletleme, tohum etrafına agregat veya pelet şeklinde kalın bir kaplama tabakasının uygulanmasıdır (Şekil 1). Bu yöntem, özellikle küçük veya düzensiz şekilli tohumların işlenmesinde tercih edilir (Taylor ve ark., 2001; Pedrini ve ark., 2020). Peletleme, tohum yüzeyine sıvılar ve inert malzemeler (diatomlu toprak, talk ve bentonit gibi) uygulanarak daha fazla ağırlık artışı sağlayan bir tekniktir; bu nedenle, mini peletleme işleminin bir devamı olarak kabul edilir (Afzal ve ark., 2020). Bu işlem aynı zamanda döner tambur veya döner tava kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, peletleme genellikle tohum morfolojisini orijinal tohum şeklinden ayırt edilmesi zor olan daha büyük ve küresel bir şekle dönüştürür (Halmer, 2000). Peletleme, ağırlık yüzdesini % 500-5000'e kadar artırarak mekanik ekim ekipmanıyla ekimin iyileştirilmesine katkıda bulunur. Marul ve domates dahil olmak üzere küçük tohumlu veya düzensiz tohum şekline sahip bahçe bitkileri için ekimi kolaylaştırır (Kangsopa ve ark., 2018; Javed ve Afzal, 2020). Yeni peletlenmiş tohumlar paketlemeden ve depolamadan önce kurutulmalıdır.

3. Geleneksel Tohum Kaplama Yöntemlerinin Sınırlamaları

Film kaplama, mini peletleme ve peletleme geleneksel tohum kaplamalarının en yaygın üç türüdür. Geleneksel tohum kaplama teknolojileri birçok avantaj sunmakta; ancak, bu teknolojilerin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Geleneksel tohum kaplamalarında kullanılan polimerlerin, aktif bileşenlerin ve yapıştırıcıların pahalı olması kaplanmış tohumun maliyetini artırmaktadır. Öte yandan, film kaplama ve mini peletleme gibi yöntemlerin etkinliği abiyotik tolerans bakımından sınırlıdır. Kuraklık, tuzluluk veya sıcaklık dalgalanmaları gibi olumsuz çevresel koşullarda tohumları yeterince korumazlar. Örneğin, film kaplamalarının su tutum kapasitesi düşüktür ve bu yöntem tohumları nem stresine karşı savunmasız bırakır. Yine geleneksel tohum kaplamalarının erken gelişim döneminde gerekli olan besinleri, pestisitleri veya biyoaktif ajanları taşıma kapasiteleri genellikle sınırlıdır (Durgadevi ve ark., 2025). Bir diğer sınırlama, neonikotinoid pestisitler gibi kaplamalarda kullanılan sentetik kimyasalların, özellikle tozlayıcılar gibi hedef dışı organizmaları olumsuz biçimde etkilemesidir (Rundlöf ve ark., 2015). Bu durum, geleneksel tohum kaplama uygulamalarının ekolojik sürdürülebilirliği konusunda endişeleri artırmaktadır. Son olarak, geleneksel kaplamalar genellikle mikrobiyal aşılama gibi biyolojik ajanların canlılığını korumakta zorlanır. Sentetik bağlayıcıların ve yapıştırıcıların kullanılması bu faydalı organizmaların hayatta kalmasını tehlikeye atabilir ve bitki büyümesini desteklemedeki etkinliklerini azaltabilir (Rocha ve ark., 2019).

4. Nano-Kaplama Yöntemleri

Geleneksel tohum kaplamalarının sınırlamalarını gidermek için, nano-yapılı malzemeler araştırılmış ve tohum kaplamalarında kullanılmıştır. En yaygın örneklerden biri elektrospun nanoliflerdir (Krishnamoorthy ve Rajiv, 2018). Elektroğirme, yüksek voltaj altında polimer çözeltilerinden veya eriyiklerinden nanometre ölçeğinde lifler üretme tekniğidir (Şekil 1). Bu yöntem, tohum kaplama teknolojilerinde son yıllarda önemli bir ilgi görmektedir (Krishnamoorthy ve Rajiv, 2017; Zaim ve ark., 2023; Rajah ve ark., 2025). Elektroğirme, kimyasallar, hormonlar, gübreler, pestisitler, antimikrobiyal ajanlar ve mikro besinler gibi çeşitli bitki gereksinimlerinin kapsüllenmesine olanak tanır (Zaim ve ark., 2023). Ayrıca, elektrospun nanoliflerin yüksek yüzey alanı-hacim oranı ve gözeneklilikleri aktif bileşenlerin korunmasına ve bu bileşiklerin kontrollü salınımına imkan sağlamaktadır. Elektroğirme yöntemiyle üretilen nanolifler, koruyucu bir tabaka oluşturarak, tohumları kuraklık ve sıcaklık dalgalanmaları gibi abiyotik faktörlere ve patojenler ve zararlılar gibi biyotik tehditlere karşı korumaya yardımcı olur (Rajah ve ark., 2025). Nanolif tohum kaplamalarının avantajı, elektroğirme işleminin herhangi bir artık çözücü olmadan tohum yüzeyinde lif üretimine olanak sağlamasıdır. Nano hidroksiapatit ve çinko oksit nanopartikülü ilave edilmiş polikaprolakton nanolifle kaplanmış mısır bitkisi tohumlarında çimlenme yüzdesinin, kökçük, fide ve kök uzunluğunun önemli ölçüde arttığı açıklanmıştır (Chakkalakal ve ark., 2022).

Mikrokapsülleme, aktif maddelerin (gübre, pestisit, mikroorganizma) polimerik kapsüller veya nanomalzemeler içine alınması işlemidir. Deniz yosunlarından elde edilen deniz bakterisi *Pontibacter actiniarum*'un kalsiyum alginat ile oluşturulan mikrokapsülleri buğday tohumlarına batırılmış; tuzlu koşullarda yetiştirilen bu tohumlarda çimlenmenin iyileştiği, kök büyümesinin teşvik edildiği, enzimatik antioksidanlar ve osmoprotektan seviyelerinin arttığı ve oksidatif stres belirteçlerinin azaldığı bildirilmiştir (Gong ve ark., 2023).

Nano-kaplama ise nanometre ölçeğinde materyallerin tohum yüzeyine uygulanmasını içerir. Mikroorganizma veya nanoparçacık kapsülleme ile kombine edilebilen bu yöntem, hedefli, kontrollü ve zamanla bozunan salım sağlamaktadır (Chakkalakal ve ark., 2022).

5. Nano-Kaplama Teknolojisinin Sınırlamaları

Tohum kaplamada biyolojik olarak parçalanabilir nanomalzemelerin umut verici faydalarına rağmen, halen bazı zorluklar bulunmaktadır. Biyolojik olarak parçalanabilir nanomalzemelerin pahalı olması çiftçiler tarafından tercih edilmesini sınırlayabilir. Ayrıca, nanomalzeme birikiminin toprak ekosistemlerindeki uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bu malzemeler biyolojik olarak parçalanabilir olsa da, bozunma ürünlerinin toprak sağlığı, mikrobiyal flora ve yeraltı suları üzerindeki potansiyel etkileri daha fazla araştırma gerektirmektedir. Bir diğer zorluk ise biyolojik olarak parçalanabilir nanomalzemelerin güvenlikleri, çevresel etkileri ve etkinlikleri konusunda net yönergelerin bulunmamasıdır.

Son olarak, nanomalzemelerin çeşitli tohum türleri ve çevre koşullarıyla uyumlulukları daha fazla araştırma gerektiren bir alandır. Farklı ürünler ve iklimler, nanomalzeme bazlı kaplamalara farklı tepki verebilir; bu da, formülasyonların belirli tarımsal koşullara göre uyarlanmasını gerekli kılar. Özetle, biyolojik olarak parçalanabilen nanomalzemeler tohum çimlenmesini ve bitki büyümesini artırmada büyük bir potansiyele sahip olsa da, bu sınırlamalar konusunda daha fazla araştırma yapılması, sürdürülebilir tarımda bu malzemelerin tüm potansiyellerinin gerçekleştirilmesinde kilit rol oynayacaktır (Durgadevi ve ark., 2025).

Tohum kaplama yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi Tablo 1'de verilmiştir. Bu tablodan her yöntemin avantajları ve dezavantajları izlenebilmektedir.

Tablo 1. Tohum kaplama yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi

Table 1. Comparative analysis of seed coating methods

Yöntem	Yapı ve form	Kontrollü salım özellikleri	Ölçeklenebilirlik	Uygulama notları
Film kaplama	İnce polimerik film	Orta düzeyde düzenleme	Yüksek	Endüstride yaygın, ekonomik
Peletleme	Agregat/pelet şeklinde	Mekanik koruma, su girişini etkiler	Orta-Yüksek	Ekipman ve proses gerektirir
Elektrospun nanolifler	Nanofibröz matris	Yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir salım	Düşük-Orta	Laboratuvar-saha adaptasyonu gerekli
Mikrokapsülleme /Nano-kaplama	Polimerik kapsül /nanomat	Hedefli, kontrollü, bozunan salım	Düşük	Mikroorganizma/Nano parçacık kombinasyonu

6. Tohum Kaplamada Nanoteknolojinin Önemi

Tohum kaplamalarında nanomalzemelerin kullanılmasıyla çimlenme oranlarını iyileştirmek, besin alımını artırmak, çevresel streslere karşı koruma sağlamak ve tohum kaynaklı patojenlerle mücadele etmek mümkün hale gelmiştir (Xu ve ark., 2020; Shelar ve ark., 2023). Selüloz, kitosan, nişasta, aljinat ve jelatin gibi kaynaklardan türetilen bu nanomalzemeler, nano ölçekli boyutlara (1-100 nm) işlenir; bu da, toplu formlarında gözlemlenmemiş benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler elde edilir. Yüksek yüzey alanı-hacmi oranları, reaktiviteyi, biyolojik sistemlerle etkileşimi ve fonksiyonel kaplamalar oluşturma yeteneğini artırır; bu da, onları çeşitli uygulamalar için değerli kılar (Baranwal ve ark., 2022).

Nanoteknoloji kullanılarak büyümeyi teşvik eden maddeler kontrollü bir şekilde doğrudan tohuma iletilerek tohum çimlenmesi iyileştirilir. Nanopartiküller, yüksek yüzey alanları ve ayarlanabilir özellikleri nedeniyle oksinler, gibberellinler ve sitokininler gibi bitki büyüme düzenleyicilerini kapsülleyebilir (Pemula ve ark., 2023). Bu büyüme hormonları, hücre uzaması, bölünmesi ve farklılaşması dahil olmak üzere tohum çimlenmesini etkileyen çeşitli fizyolojik süreçlerin düzenlenmesinde önemli roller oynar. Nanopartiküller taşıyıcı amaçlı kullanılarak, bu hormonlar zamana ve çevreye duyarlı bir şekilde iletebilir.

Tohum kaplamalarında nanoteknoloji kullanılarak besin maddesi iletimine daha etkin ve hedef odaklı bir yaklaşım sağlanmış olur. Geleneksel gübreler, toprağa uygulandığında genellikle sızıntı ve yüzey akışına maruz kalır; bu da, besin maddesi kayıplarına ve çevre kirliliğine yol açar. Nano gübreler, tohum kaplamalarına entegre edildiğinde, çimlenme ve büyümenin ilk aşamalarında temel besin maddelerini doğrudan tohuma ileterek bu olumsuzlukları en aza indirir (Zaim ve ark., 2023). Çinko, bakır, demir ve magnezyum gibi mikro besin maddelerinden yapılan nano-parçacıklar tohum kaplamalarına dahil edilebilir. Bu mikro besinler, klorofil üretimi, enzim aktivasyonu ve solunum dahil olmak üzere çeşitli bitki metabolik süreçlerinde kullanılır (Guardiola ve ark., 2023). Nitekim, nano-çinko oksit (ZnO) partikülleriyle yapılan tohum kaplamasıyla çimlenme oranının % 80'den % 93-100'e çıkarıldığı, indol-3-asetik asit (IAA) üretiminin ve klorofil içeriğinin arttığı açıklanmıştır (Adhikari ve ark., 2016).

Tohum çimlenmesi ve bitki büyümesinin erken dönemlerinde mantarlar, bakteriler ve virüsler dahil olmak üzere tohum kaynaklı patojenlerin varlığı

bitkide biyotik strese neden olur. Bu patojenler, zayıf çimlenmeden fide ölümlerine kadar çeşitli sorunlara yol açarak veriminin düşmesine neden olabilir. Nanoteknoloji, patojen saldırılarına karşı koruyucu bir bariyer sağlayan antimikrobiyal nanopartikülleri tohum kaplamalarına dahil ederek bir çözüm sunar (Zaim ve ark., 2023). Gümüş (Ag) nanopartikülleri, geniş spektrumlu antimikrobiyal özellikleriyle yaygın olarak bilinmektedir. Bu nanopartiküllerin çok çeşitli bakteri, mantar ve virüslere karşı oldukça etkili olduğu gösterilmiştir. Söz konusu nanopartiküller, mikrobiyal hücre zarlarını bozar, reaktif oksijen türlerinin üretimini ve mikrobiyal DNA replikasyonunu engellerler. Gümüş nanopartikülleri, tohum kaplamaya ilave edildiğinde tohum yüzeyinin zararlı patojenler tarafından kolonize edilmesini önleyerek tohum kaynaklı hastalıkların görülme sıklığını önemli ölçüde azaltabilir. Ayrıca, Ag nanopartikülleri düşük konsantrasyonlarda oldukça etkili olduğundan, az miktarlarda kullanılabilir ve tohumda fitotoksikite riskini en aza indirir (Singh ve ark., 2024).

Kuraklık, aşırı sıcaklıklar ve tuzluluk gibi çevresel stresler, tohum çimlenmesini ve ürün verimliliğini sınırlayan önemli abiyotik faktörlerdendir. Çinko oksit, titanyum dioksit, silisyum dioksit gibi nanopartiküllerin ve karbon bazı nanomalzemelerin tohum çimlenmesini, kök gelişimini ve antioksidan savunma mekanizmalarını geliştirdiği bilinmektedir. Söz konusu nanomalzemeler fotosentez, su tutma ve reaktif oksijen türlerini temizleme gibi fizyolojik süreçleri düzenleyerek stres toleransını desteklerler (Van Nguyen ve ark., 2022; Singh ve ark., 2024).

7. Sonuçlar

Geleneksel tohum kaplama yöntemleri, besin maddelerinin iletimi ve tohumların korunmasında etkili olmakta; ancak, biyolojik olarak parçalanmayan malzemeler ve kimyasal katkı maddelerinin kullanımı nedeniyle çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Doğal polimerlerden, metal oksitlerden ve diğer çevre dostu kaynaklardan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilir nanomalzemeler, kontrollü besin salınımı, gelişmiş su tutma ve kuraklık, zararlılar ve patojenler gibi çevresel streslere karşı koruma sağlayarak sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Ancak, nanomalzeme birikiminin toprak ekosistemlerindeki uzun vadeli etkilerinin henüz tam olarak anlaşılmamış olması bu konudaki araştırmaların sürdürülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tohum kaplama teknolojileri, modern tarımın sürdürülebilirliği açısından önemli bir potansiyele

sahiptir. Bu teknolojiler, kimyasal girdi kullanımının azaltılması, çevresel kirlenmenin minimize edilmesi ve toprak sağlığının korunması yoluyla sürdürülebilir tarıma önemli katkılar sağlamaktadır. Tohum kaplama teknolojilerinin geniş çaplı uygulanması, disiplinler arası işbirliği, sürekli araştırma ve geliştirme çabaları ile mümkün olacaktır. Bu bağlamda tohum şirketleri ile akademisyenlerin işbirliği bu teknolojilerin gelişmesine ivme kazandıracak ve küresel gıda güvenliğinde önemli adımlar atılmış olacaktır.

Etik Beyanı

Yazar, bu çalışma için etik onay gerekmediğini beyan eder.

Finansman

Bu çalışma, hiçbir dış finansman almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Abrahimi, F., Taghvaei, M., Mastinu, A., 2023. Nano-organic coatings improve early vigor of *Brassica napus* L. seeds in water deficit. *Agronomy*, 13(2): 390-406.
- Accinelli, C., Abbas, H.K., Little, N.S., Kotowicz, J.K., Mencarelli, M., Shier, W.T., 2016. A liquid bioplastic formulation for film coating of agronomic seeds. *Crop Protection*, 89: 123-128.
- Adhikari, T., Kundu, S., Rao, A.S., 2016. Zinc delivery to plants through seed coating with nano-zinc oxide particles. *Journal of Plant Nutrition*, 39(1): 136-146.
- Afzal, I., Javed, T., Amirkhani, M., Taylor, A.G., 2020. Modern seed technology: seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance. *Agriculture*, 10(11): 526.
- Afzal, M., Khan, S., Iqbal, S., Mirza, M.S., Khan, Q.M., 2013. Inoculation method affects colonization and activity of Burkholderia phytofirmans PsJN during phytoremediation of diesel-contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85: 331-336.
- Anonymous, 2026. Seed Coating Market. (<https://www.marketsandmarkets.com>), (Erişim Tarihi: 01.01.2026).
- Badua, S.A., Sharda, A., Strasser, R., Cockerline, K., Ciampitti, I.A., 2019. Comparison of soy protein based and commercially available seed lubricants for seed flowability in row crop planters. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(4): 593-600.
- Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G.L., Kumar, A., 2022. Biopolymer: a sustainable material for food and medical applications. *Polymers*, 14(5): 983.
- Chakkalakal, N.D., Thomas, M., Chittillapilly, P.S., Sujith, A., Anjali, P., 2022. Electrospun polymer nanocomposite membrane as a promising seed coat for controlled release of agrichemicals and improved germination: Towards a better agricultural prospect. *Journal of Cleaner Production*, 377: 134479.
- Duman, İ., 2005. Tohumlarda Kaliteyi İyileştirici Uygulamalar. Ege Üniversitesi, Tohum Teknolojisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (TOTEM), Yayın No: 3, Cilt 2, İzmir.
- Durgadevi, P., Girigoswami, K., Girigoswami, A., 2025. Biodegradable nanomaterials in boosting seed vigor and germination: seed coating towards sustainability. *Discover Applied Science*, 7(7): 695.
- Ellis, R.H., 2004. Seed and seedling vigor in relation to crop growth and yield. *Plant Growth Regulation*, 11(3): 249-255.
- Gong, M., He, J., Kong, M., Huo, Q., Jiang, Y., Song, J., Lv, G., 2023. A microencapsulation approach to design microbial seed coatings to boost wheat seed germination and seedling growth under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1283590.
- Guardiola-Márquez, C.E., López-Mena, E.R., Segura-Jiménez, M.E., Gutierrez-Marmolejo, I., Flores-Matzumiya, M.A., Mora-Godínez, S., 2023. Development and evaluation of zinc and iron nanoparticles functionalized with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and microalgae for their application as bio-nanofertilizers. *Plants*, 12(20): 3657.
- Halmer, P., 2000. Commercial seed treatment technology. In: M. Black and J.D. Bewley (Eds.), *Seed Technology and Its Biological Basis*, Sheffield Academic Press: Sheffield, UK, pp. 257-286.
- Javed, T., Afzal, I., 2020. Impact of seed pelleting on germination potential, seedling growth and storage of tomato seed. *Acta Horticulturae*, 1273: 417-424.
- Jacob, S.R., Kumar, M.A., Varghese, E., Sinha, S.N., 2016. Hydrophilic polymer film coat as a micro-container of individual seed facilitates safe storage of tomato seeds. *Scientia Horticulturae*, 204: 116-122.
- Kangsopa, J., Hynes, R.K., Siri, B., 2018. Lettuce seeds pelleting: A new bilayer matrix for lettuce (*Lactuca sativa*) seeds. *Seed Science and Technology*, 46(3): 521-531.
- Kaur, P., Sharma, N., Agrawal, R., 2024. "Seed treatment with biopolymers for alleviation of abiotic stresses in plants," in nanotechnology for abiotic stress tolerance and management in crop plants. *Academic Press*, 21: 327-334.
- Kimmelshue, C., Goggi, A.S., Cademartiri, R., 2019. The use of biological seed coatings based on bacteriophages and polymers against *Clavibacter michiganensis* subsp. *nebraskensis* in maize seeds. *Scientific Reports*, 9(1): 17950.
- Krishnamoorthy, V., Rajiv, S., 2017. An eco-friendly top down approach to nutrient incorporated electrospun seed coating for superior germination potential. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(1): 146-152.
- Krishnamoorthy, V., Rajiv, S., 2018. Tailoring electrospun polymer blend carriers for nutrient

- delivery in seed coating for sustainable agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 177: 69-78.
- Pedriani, S., Balestrazzi, A., Madsen, M.D., Bhalsing, K., Hardegree, S.P., Dixon, K.W., Kildisheva, O.A., 2020. Seed enhancement: Getting seeds restoration-ready. *Restoration Ecology*, 28: 266-275.
- Pedriani, S., Merritt, D.J., Stevens, J., Dixon, K., 2017. Seed coating: Science or marketing spin? *Trends Plant Science*, 22(2): 106-116.
- Pemula, G., Anand, A.V., Karthick, H., Pragya P., Anbazhagan T., Koyeli G., 2023. Nanostructured proteins for delivering drugs to diseased tissues. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 12(3): 115-129.
- Qiu, J., Wang, R., Yan, J., Hu, J., 2005. Seed film coating with uniconazole improves rape seedling growth in relation to physiological changes under waterlogging stress. *Plant Growth Regulation*, 47(1): 75-81.
- Rajah, R.A., Raja, K., Johnson, I., Marimuthu, S., Subramanian, A., 2025. Electrospinning applications in sustainable agriculture: Enhancing soil health, seed coatings and post-harvest antimicrobial protection. *Plant Science Today*, 12(sp1): 1-13.
- Rocha, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Vosátka, M., Freitas, H., Oliveira, R.S., 2019. Seed coating: a tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1357.
- Rundlöf, M., Andersson, G.K., Bommarco, R., Fries, I., Hederström, V., Herbertsson, L., Smith, H.G., 2015. Seed coating with a neonicotinoid insecticide negatively affects wild bees. *Nature*, 521(7550): 77-80.
- Shelar, A., Nile, S.H., Singh, A.V., Rothenstein, D., Bill, J., Xiao, J., 2023. Recent advances in nano-enabled seed treatment strategies for sustainable agriculture: Challenges, risk assessment, and future perspectives. *Nano-Micro Letters*, 15(1): 54.
- Singh, S., Pathak, S., Singh, J., Kamboj, M., Singh, V., 2024. Nano-seed coating technologies for enhancing vegetable seed performance and stress tolerance. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 25(6): 278-295.
- Taylor, A.G., 2003. Seed treatments. In: B.D.J. Thomas and B.G. Murphy (Eds.), *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, Elsevier Academic Press: Cambridge, UK, pp. 1291-1298.
- Taylor, A.G., 2020. Seed storage, germination, quality and enhancements. In: H.C. Wien and H. Stutzel, (Eds.), *The Physiology of Vegetable Crops*, 2nd Edition, CAB International: Wallingford, UK, pp. 1-30.
- Taylor, A.G., Eckenrode, C.J., Straub, R.W., 2001. Seed coating technologies and treatments for onion: challenges and progress. *HortScience*, 36(2): 199-205.
- Taylor, A.G., Harman, G.E., 1990. Concepts and technologies of selected seed treatments. *Annual Review of Phytopathology*, 28: 321-339.
- Van Nguyen, D., Nguyen, H.M., Le, N.T., Nguyen, K.H., Nguyen, H.T., Le, H.M., 2022. Copper nanoparticle application enhances plant growth and grain yield in maize under drought stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(1): 364-375.
- Xu, T., Ma, C., Aytac, Z., Hu, X., Ng, K.W., White, J.C., Demokritou, P., 2020. Enhancing agrichemical delivery and seedling development with biodegradable, tunable, biopolymer-based nanofiber seed coatings. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(25): 9537-9548.
- Zaim, N.S.H.B.H., Tan, H.L., Rahman, S.M.A., Abu Bakar, N.F., Osman, M.S., Thakur, V.K., Radacsi, N., 2023. Recent advances in seed coating treatment using nanoparticles and nanofibers for enhanced seed germination and protection. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(12): 7374-7402.