

## Biyokömür ve Elektrostatik Kaplama Yönteminin Tohum Performansına Etkisi

Sefa ALTİKAT<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Iğdir University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Iğdir, Türkiye

### Sorumlu Yazar

<sup>1</sup>Iğdir University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Iğdir, Türkiye

Sefa ALTİKAT, e-mail: [sefa.altikat@igdir.edu.tr](mailto:sefa.altikat@igdir.edu.tr)

**Özet:** Biyokömür kaplama teknolojisi, tohum performansını artırmak ve sürdürülebilir tarıma katkı sağlamak amacıyla inovatif yöntemler sunmaktadır. Biyokömür, organik biyokütlenin düşük oksijen koşullarında pirolizi sonucu elde edilen karbon zengin bir malzeme olup, su tutma kapasitesi, besin iletimi ve toprak düzenleme özellikleri ile dikkat çeker. Bu özellikler, tarımda verimliliği artırırken çevresel etkileri minimize etmek için önemli avantajlar sunar. Tohum kaplama teknolojisi, tohumları koruyucu veya işlevsel katmanlarla kaplayarak çimlenme, fide gelişimi ve stres koşullarına dayanıklılığı artırır. Elektrostatik kaplama, kaplama partiküllerini elektrik yükleri ile tohum yüzeyine homojen bir şekilde yapıştırarak malzeme israfını önler ve etkinliği artırır. Bu yöntemle, biyokömürün tohum etrafında bir mikro ortam oluşturması sağlanır, böylece nem tutma ve havalandırma gibi faydalar elde edilir. Kaplamanın sağladığı besinlerin kontrollü salınımı, bitki gelişimini destekler ve abiyotik streslere karşı dayanıklılığı artırır. Biyokömür kaplı tohumlar, düşük kaliteli topraklardan hidroponik sistemlere kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Hidroponik sistemlerde biyokömür, mikroorganizmalar için uygun bir ortam sağlayarak bitki kök gelişimini teşvik ederken, tuzluluk ve kuraklık gibi zorlu koşullarda tohumların çimlenme oranını artırır. Ayrıca, biyokömür kaplamalar, pestisit ve ağır metallerin adsorpsiyonu sayesinde çevresel kirliliği azaltır ve toprak sağlığını iyileştirir. Elektrostatik kaplama yönteminde, biyokömür partikül boyutu, bağlayıcı seçimi ve kaplama kalınlığı gibi faktörlerin optimize edilmesi, tohum performansını artırmada kritik öneme sahiptir. Gelecekte bu süreç, yapay zeka ve nanoteknolojinin entegrasyonu ile daha da geliştirilebilir. Biyokömür kaplı tohumlar, özellikle çölleşme ve arazi bozulması ile mücadelede önemli bir potansiyel taşımakta ve çevre dostu tarım uygulamalarında temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, biyokömür kaplama teknolojisi, su kıtlığı, kimyasal kullanım ve çevresel bozulma gibi tarımsal zorlukları ele alırken, küresel gıda güvenliği ve çevre koruma hedeflerine katkıda bulunan sürdürülebilir ve yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Biyokömür, Elektrostatik kaplama, Tohum çimlenmesi, Sürdürülebilir tarım, Abiyotik stres, Toprak iyileştirme

## Effect of Biochar and Electrostatic Coating on Seed Performance

**Abstract:** Biochar coating technology offers innovative ways to improve seed performance and contribute to sustainable agriculture. Biochar is a carbon-rich material derived from the pyrolysis of organic biomass under low oxygen conditions and is characterized by water retention capacity, nutrient delivery and soil regulation. These properties offer significant advantages to minimize environmental impacts while increasing agricultural productivity. Seed coating technology coats seeds with protective or functional layers to improve germination, seedling development and resilience to stress conditions. Electrostatic coating prevents material waste and increases efficiency by uniformly adhering coating particles to the seed surface with electrical charges. This allows the biochar to create a microenvironment around the seed, thus providing benefits such as moisture retention and aeration. The controlled release of nutrients provided by the coating promotes plant growth and increases resilience to abiotic stresses. Biochar-coated seeds have a wide range of applications, from low-quality soils to hydroponic systems. In hydroponic systems, biochar promotes plant root development by providing a favorable environment for microorganisms, while increasing the germination rate of seeds in harsh conditions such as salinity and drought. Furthermore, biochar coatings reduce environmental pollution and improve soil health through pesticides and heavy metals adsorption. In the electrostatic coating method, optimizing factors such as biochar particle size, binder selection and coating thickness are critical to improve seed performance. In the future, this process can be further enhanced by integrating artificial intelligence and nanotechnology. Biochar-coated seeds have significant potential, especially in the fight against desertification and land degradation, and have emerged as a key component in environmentally friendly agricultural practices. In conclusion, biochar coating technology offers a sustainable and innovative solution that contributes to global food security and environmental protection goals while addressing agricultural challenges such as water scarcity, chemical use and environmental degradation.

**Key words:** Biochar, Electrostatic coating, Seed germination, Sustainable agriculture, Abiotic stress, Soil improvement

## GİRİŞ

Düşük oksijen koşulları altında organik biyokütlenin pirolizi yoluyla üretilen ve karbon açısından zengin bir malzeme olan biyokömür, son zamanlarda sürdürülebilir tarım uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır (Pandao et al., 2023). Yüksek gözeneklilik, gelişmiş katyon değişim kapasitesi ve genişletilmiş toprak stabilitesi gibi ayırt edici özellikleri, biyokömürü toprak kalitesini ve verimliliğini artırmak amacıyla kullanılmasını sağlamaktadır (Rizwan et al., 2023). Biyokömür, bulunduğu ortamın su tutma özelliğini geliştirerek, besin kullanılabilirliğini artırarak ve karbon tutma yoluyla sera gazı emisyonlarını azaltarak sürdürülebilir tarım uygulamalarına önemli katkılar sunar (Evizal & Prasmatiwi, 2023). Ayrıca, bozulmuş toprakları rehabilite etme kapasitesi, gıda güvenliği ve çevrenin korunmasını sağlamayı amaçlayan çağdaş tarım uygulamalarının hayati bir bileşeni haline gelmiştir (Yeboah et al., 2023). Biyokömürün çeşitli tarım sistemlerine dahil edilmesi ile, tarımda olumsuz ekolojik etkileri en aza indirirken kaynakların verimli kullanımında önemli bir rol oynar (Rex et al., 2023).

Tohum kaplama teknolojileri, tohum performansını ve ürün verimliliğini artıran çok sayıda fayda sağlayarak tohumların ekime hazırlanmasını sağlayan bir teknolojidir (Vlajkov et al., 2023). Tohumların ince bir koruyucu veya işlevsel bir katman ile kaplanması; çimlenme oranını, erken fide canlılığını ve hastalıklara karşı dayanıklılığı artırır (Murtaza et al., 2023). Bu kaplamalar, fide gelişimi için en uygun mikro ortamı oluşturmak üzere besinler, biyoaktif bileşikler veya mikrobiyal aşılama ajanlarıyla zenginleştirilebilir (Garcia et al., 2022). Bu hassas yöntem, aşırı kimyasal girdilere olan bağımlılığı en aza indirerek üretim maliyetlerini ve çevresel kirlenmeyi azaltır (Rex et al., 2023). Günümüzde tohum kaplama teknolojileri, değişen çevre ve iklim koşullarında ürün verimliliğini güvence altına almak için temel uygulamalardan biri haline gelmiştir (Pandao et al., 2023).

Elektrostatik kaplama, çeşitli tohum kaplama teknikleri arasında yenilikçi ve etkili bir yöntemlerden biridir (Rizwan et al., 2023). Bu yaklaşımda, tohum yüzeyinde homojen ve hassas bir kaplama elde etmek için yüklü partiküller kullanılır (Murtaza et al., 2023). Genellikle düzensiz kaplamalara ve malzeme israfına yol açan geleneksel yöntemlerin aksine, elektrostatik kaplama daha iyi yapışmayı sağlayarak sürecin işlevselliğini ve maliyet etkinliğini artırır (Evizal & Prasmatiwi, 2023). Ayrıca bu teknik, biyoaktif bileşiklerin entegrasyonuna olanak tanıyarak çimlenme ve bitki gelişimini teşvik ederken sentetik gübre ve pestisitlere olan bağımlılığı da azaltmaktadır (Garcia et al., 2022).

### Biyokömür: Tanım ve Özellikler

Biyokömür, piroliz adı verilen bir süreçte organik biyokütlenin sınırlı oksijen koşulları altında termokimyasal dönüşümü yoluyla üretilen karbon açısından zengin bir maddedir. Kendine özgü fiziksel ve kimyasal özellikleriyle tanınan biyokömür, hem tarımsal hem de çevresel kullanımlar için son derece uyarlanabilir bir malzeme olarak hizmet vermektedir. Yüksek gözenekliliği, geniş yüzey alanı ve kimyasal esnekliği, toprak iyileştirme ve karbon tutma uygulamalarında etkinliğini artıran önemli özelliklerdir (Bolan et al., 2021).

Biyokömür, yüzey alanını büyük ölçüde genişleten ve bitki besin elementleri ile suyun tutulması için çok sayıda alan yaratan oldukça gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu gözeneklilik, uçucu organik bileşikler ortadan kaldıran ve geride birbirine bağlı gözeneklere sahip bir karbon çerçeve bırakan piroliz işleminden kaynaklanmaktadır (Yargicoglu & Reddy, 2015). Ayrıca, biyokömürün yüksek katyon değişim kapasitesi, potasyum, kalsiyum ve magnezyum gibi temel besin maddelerini yakalamasına ve tutmasına olanak tanır, böylece bitkiler için kullanılabilirliklerini artırır (Xie et al., 2015). Kimyasal açıdan bakıldığında, biyokömür tipik olarak alkalidir ve pH seviyesi hammaddeye ve piroliz koşullarına bağlı olarak değişir, bu özelliği sayesinde asidik toprakları nötralize etmede etkili bir araç olarak kullanılır (Aller, 2016). Esas olarak yıllar boyunca yavaşça ayrıışan kararlı karbon formlarından oluşan

biyokömür, uzun vadeli karbon tutumu için güvenilir bir kaynak olarak tanımlanmaktadır (Igalavithana et al., 2017).

Biyokömür, toprak sağlığını ve verimliliğini iyileştirmek için toprak düzenleyici olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uygulama, özellikle kumlu veya bozulmuş topraklarda su tutma kapasitesini, havalandırmayı ve besin kullanılabilirliğini artırır. Besin sızıntısını en aza indirerek, gübrelerin verimliliğini artırır ve böylece tarımsal uygulamaların çevreye olan olumsuz etkilerini azaltır (Wang et al., 2017). Toprak kalitesinin iyileştirilmesindeki rolünün ötesinde biyokömür, pestisitleri adsorbe etme kabiliyetiyle de önem kazanmaktadır. Geniş yüzey alanı ve aktif fonksiyonel grupları sayesinde biyokömür, topraktaki pestisit kalıntılarını etkili bir şekilde bağlayarak hareketliliklerini ve toksisitelerini sınırlandırır (Enaime et al., 2020). Bu özellik, aşırı pestisit kullanımının zararlı etkilerine karşı koymada özellikle değerlidir ve yeraltı suyu kalitesinin ve genel ekosistem sağlığının korunmasına katkıda bulunur (Vijayaraghavan, 2019).

Biyokömürün tarım topraklarına entegre edilmesi, hem bitki büyümesini hem de toprak özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Toprak yapısını iyileştirerek ve su tutma kapasitesini artırarak, özellikle kurak veya kuraklıktan etkilenen bölgelerde bitkiler için tutarlı bir nem kaynağı sağlar (Sajjadi et al., 2019). Ayrıca, besin döngüsü ve hastalık kontrolü için çok önemli olan faydalı mikroorganizmalar için ideal bir ortam oluşturur. Biyokömür ilave edilen topraklar genellikle daha yüksek organik madde içeriği, gelişmiş besin kullanılabilirliği ve daha iyi kök gelişimi gösterir ve sonuçta ürün verimliliğinin artmasına neden olur (Xiao et al., 2018). Ayrıca biyokömür, toprak pH'sının dengelenmesine yardımcı olur ve ağır metallerin biyoyararlanımını azaltarak daha sağlıklı ve daha sağlam tarım sistemlerine katkıda bulunur (Daful et al., 2021).

### **Elektrostatik Kaplama Yöntemi**

Elektrostatik kaplama yöntemi, zıt yüklere sahip malzemelerin doğal olarak birbirine çekildiği elektrostatik prensiplerinden yararlanır. Bu süreçte, kaplama partikülleri özel ekipman kullanılarak elektrikle yüklenirken, tohumlar ya topraklanır ya da karşıt bir yük verilir. Bu yük farkı, güçlü bir elektrostatik çekim oluşturarak kaplama partiküllerinin tohum yüzeyine düzgün bir şekilde yapışmasını sağlar (Andriessen et al., 2015). Optimum sonuçların elde edilmesi, partikül boyutu, yük yoğunluğu ve uygulama koşulları gibi faktörler üzerinde hassas kontrol gerektirir. Uygulama sırasında, yüklü partiküller dikkatle kontrol edilen bir ortamda dağıtılarak tohumlar üzerinde tutarlı bir katman oluşturmaları sağlanır (Rodrigues et al., 2019). Bu teknik, topraklanma riskini azaltır ve kaplama malzemesinin eşit bir şekilde dağılmasını sağlayarak genel etkinliğini artırır. Ayrıca, kaplama kalınlığı üzerinde daha fazla kontrol sağlayarak tohumların çimlenmeyi olumsuz etkileyebilecek aşırı kaplama olmadan uygun miktarda malzeme almasını sağlar (Pendar & Páscoa, 2021).

Elektrostatik tohum kaplama, geleneksel yöntemlere kıyasla çok sayıda avantaj sağlamakta ve kendisini son derece verimli ve sürdürülebilir bir teknoloji olarak kabul ettirmektedir. Yöntemin avantajlarından biri kaplama malzemesinin israf edilmemesidir. Yüklü partiküllerin tohumları doğrudan çekmesi, aşırı püskürtme ve malzeme kaybını en aza indirerek maliyet tasarrufu ve daha düşük çevresel ayak izi sağlar (Andriessen et al., 2015). Bu teknik aynı zamanda biyokömür, besinler veya koruyucu maddeler gibi aktif bileşenlerin hassas bir şekilde verilmesi için gerekli olan tek tip ve tutarlı bir kaplama sağlar (Rodrigues et al., 2019). Kaplama malzemesinin tohum yüzeyine daha iyi yapışması, dayanıklılığını artırarak ekime kadar depolama ve kullanım boyunca bozulmadan kalmasını sağlar. Ayrıca elektrostatik proses, ister ince tozlar ister sıvılar olsun çok çeşitli kaplama malzemelerine uyum sağlayarak tohum işleme formülasyonlarında daha fazla esneklik sunar (Pendar & Páscoa, 2021).

Elektrostatik kaplama yöntemi, çimlenme oranlarını iyileştirerek ve erken bitki gelişimine katkıda bulunarak tohum performansını önemli ölçüde artırır (Rodrigues et al., 2019). Bu teknikle elde edilen homojen kaplama, her tohumun eşit miktarda besin ve koruyucu madde almasını sağlayarak çimlenme için tutarlı ve elverişli bir ortamı teşvik eder (Pendar & Páscoa, 2021). Bu tutarlılık, tohum-toprak etkileşimlerini güçlendiren ve su ve besin emilimini artıran biyokömürün faydalarını optimize etmek için özellikle hayati önem taşımaktadır (Andriessen et al., 2015). Ayrıca, kaplama malzemesinin daha iyi yapışması, nakliye veya ekim sırasında yerinden çıkma olasılığını azaltarak tohumların amaçlanan avantajlarını korumasını sağlar (Rodrigues et al., 2019). Bu yöntemle sağlanan aktif bileşenlerin kontrollü salınımı, fide canlılığını daha da artırır ve kuraklık, zararlılar ve hastalıklar gibi çevresel zorluklara karşı dayanıklılığı artırır (Pendar & Páscoa, 2021). Özetle, elektrostatik kaplama yöntemi, sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklerken tohum performansını iyileştirmek için güvenilir ve etkili bir yaklaşımdır (Andriessen et al., 2015).

### Tohumları Biyokömür ile Kaplamanın Avantajları

Biyokömürün tohum kaplama materyali olarak uygulanmasının çimlenme oranlarını büyük ölçüde artırdığı ve erken fide gelişimini kolaylaştırdığı kanıtlanmıştır. Biyokömürün gözenekli yapısı, tohumun etrafında nemi tutan ve havalandırmayı artıran bir mikro ortam yaratır (Adelabu & Franke, 2022). Kaplama malzemesi olarak biyokömür kullanımı, aynı zamanda sabit ve güvenilir bir hayati besin kaynağı sağlayarak tohumların farklı toprak koşullarında daha etkili bir şekilde yerleşmesine yardımcı olur (Hussain et al., 2023). Ayrıca, toprak pH'sını nötralize etme ve potansiyel kimyasal stresleri azaltma kapasitesi, erken fide büyümesini daha da destekleyerek daha sağlıklı, daha sağlam bitkilerle sonuçlanır (Rogovska et al., 2012).

Biyokömür kaplı tohumlar, tuzluluk ve kuraklık gibi abiyotik streslere karşı daha fazla dayanıklılık göstermektedir. Biyokömür tabakası koruyucu bir kalkan görevi görerek fazla tuzları adsorbe edip hareketsiz hale getirerek tuzlu toprakların zararlı etkisini azaltır ve böylece tohuma ulaşmalarını sınırlar (Imran et al., 2022). Bu tamponlama etkisi, çimlenmekte olan tohumun etrafında istikrarlı bir iyonik dengenin korunmasına yardımcı olur (Campobenedetto et al., 2020). Kuraklık koşullarında, biyokömürün üstün su tutma kapasitesi, su kıtlığı olan ortamlarda bile tohumlara dengeli bir nem kaynağı sağlar (Karpunina et al., 2022). Bu su mevcudiyetini düzenleme yeteneği sadece çimlenme oranlarını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda fidelere zorlu koşullarda erken büyüme aşamalarında önemli bir avantaj sağlar (Adelabu & Franke, 2022).

Biyokömür kaplı tohumlar, kontrollü besin salınımı avantajı sunarak çimlenme ve erken büyüme aşamaları boyunca temel elementlerin tutarlı bir şekilde tedarik edilmesini sağlar (Rogovska et al., 2012). Biyokömürün yüksek katyon değişim kapasitesi, potasyum, kalsiyum ve magnezyum gibi besin maddelerini emmesini ve kademeli olarak serbest bırakmasını sağlayarak besin sızıntısını ve israfını en aza indirir (Hussain et al., 2023). Bu yavaş salınım süreci dengeli bitki büyümesini teşvik eder ve besin eksikliği olasılığını azaltır (Karpunina et al., 2022). Ek olarak, biyokömürün suyu tohumun yakınında tutma kabiliyeti, toprağın nem kullanılabilirliğini artırarak sık sulama ihtiyacını azaltır ve verimli su kullanımını sağlar (Imran et al., 2022).

Biyokömür kaplı tohumlar, tarım topraklardaki pestisitlerin ve ağır metallerin olumsuz etkilerini azaltarak çevresel sürdürülebilirlikte önemli bir rol oynamaktadır. Biyokömürün gözenekli yapısı ve geniş yüzey alanı, pestisit kalıntılarını adsorbe etmesini sağlayarak bu kimyasalların yeraltı sularını kirletmesini önler ve bitkiler için biyoyararlanımlarını azaltır (Campobenedetto et al., 2020). Benzer şekilde, biyokömür topraktaki ağır metallere bağlanarak onları hareketsiz hale getirir ve toksisitelerini azaltır (Adelabu & Franke, 2022). Bu adsorpsiyon yetenekleri sadece tohumları ve fideleri kimyasal

stresten korumakla kalmaz, aynı zamanda toprak ekosisteminin genel sağlığını da geliştirir (Imran et al., 2022).

### **Biyokömür Kaplı Tohumların Uygulama Alanları**

Biyokömür kaplı tohumlar, özellikle düşük toprak kalitesi ve sınırlı su mevcudiyeti gibi zorlukların devam ettiği geleneksel tarım sistemlerinde oldukça etkilidir. Bu tohumlar, konsantre bir besin kaynağı sağlayarak ve kök bölgesinde su tutma oranını artırarak çimlenme oranlarını ve fide oluşumunu önemli ölçüde artırır (Glodowska et al., 2017). Bu, özellikle biyokömürün toprak düzenleyici olarak hizmet ettiği, verimliliği geri kazandırdığı ve mahsul verimliliğini artırdığı bozulmuş topraklarda avantajlıdır (Vlajkov et al., 2023). Ayrıca, biyokömür kaplı tohumlar kimyasal gübrelere olan bağımlılığı azaltmaya yardımcı olarak üretim maliyetlerinin düşmesine ve çevre kirliliğinin azalmasına yol açar (Olszyk et al., 2018). Ek olarak, biyokömür toprak havalandırması ve gelişmiş mikrobiyal aktivite sayesinde geleneksel tarım uygulamalarında daha sağlıklı ürün elde edilmesine katkıda bulunur (Nazir & Batool, 2020).

Biyokömür kaplı tohumlar, optimum bitki büyümesi için hassas besin maddesi dağıtımının ve verimli su yönetiminin gerekli olduğu hidroponik sistemler için büyük bir potansiyele sahiptir (Maienza et al., 2015). Biyokömür kaplama, gelişimin erken aşamalarında fidelerin besin alımını artırarak besin açısından zengin çözeltilerde daha sonraki büyümeleri için sağlam bir temel oluşturur (Soares et al., 2019). Hidroponik ortamlarda biyokömür ayrıca mikrobiyal kolonizasyon için bir ortam görevi görerek bitki kökleri için daha dengeli ve destekleyici bir ekosistem oluşturmaya yardımcı olur (Kamal & Sudantha, 2016). Ayrıca, hidroponik üretim modellerinde biyokömür kaplı tohumların kullanımı, ek kimyasal girdilere olan ihtiyacı en aza indirerek ve dikkatle kontrol edilen koşullar altında optimum tohum performansı sağlayarak sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliğini optimum düzeye çıkarır (Safdar et al., 2022).

Biyokömürle kaplanmış tohumlar, optimum büyüme ve ikincil metabolitlerin üretimi için hassas koşullar gerektiren tıbbi ve aromatik bitkilerin yetiştirilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır (Rahman & Dutta, 2022). Biyokömür kaplama, düzenli bir besin ve nem kaynağı sağlayarak tek tip çimlenmeyi ve sağlam büyümeyi destekler (Soares et al., 2019). Ayrıca, biyokömürün ağır metalleri ve pestisitleri hareketsiz hale getirme kapasitesi, tıbbi ve aromatik bitkilerin kalitesini ve güvenliğini korumak için hayati önem taşıyan daha temiz bir yetiştirme ortamı yaratır (Nazir & Batool, 2020).

### **Elektrostatik Kaplama Sürecinde Dikkat Edilmesi Gerekenler**

Elektrostatik kaplama işleminin başarısı için ideal kaplama kalınlığının ve biyokömür oranının elde edilmesi esastır. Çok kalın kaplamalar, su emilimini ve oksijen değişimini yavaşlatan fiziksel bir bariyer oluşturarak tohum çimlenmesini engelleyebilir. Öte yandan, aşırı ince kaplamalar yeterli besin veya koruma sağlayamayarak biyokömür uygulamasının faydalarını azaltabilir. Biyokömür oranı, tohuma aşırı malzeme yüklemeyen, besin maddesi iletimi ve su tutma gibi avantajlarını en üst düzeye çıkarmak için hassas bir şekilde dengelenmelidir. Bu optimizasyon, elektrostatik yükün ve kaplama parametrelerinin hassas bir şekilde kalibre edilmesini gerektirir ve tohumun özel ihtiyaçlarına ve tarımsal amacına göre uyarlanmış tek tip ve etkili bir kaplama sağlar.

Bağlayıcıların seçimi, depolama, taşıma ve ekim sırasında biyokömür kaplamalarının yapışmasını ve dayanıklılığını sağlamak için önemli bir parametredir. Melas, doğal bileşimi, yüksek viskozitesi ve biyokömür partikülleri ile uyumluluğu nedeniyle bağlayıcı olarak popüler bir seçimdir. Tohum yüzeyine sıkıca yapışan güçlü bir tabaka oluşturarak mekanik stres altında kaplamanın bütünlüğünü korur. Ayrıca melas, topraktaki mikrobiyal aktiviteyi destekleyen organik bir karbon kaynağı sağlayarak kaplamanın besin içeriğini artırır. Nişasta veya doğal sakızlar gibi alternatif bağlayıcılar, elektrostatik kaplama

işlemiyle uyumluluklarına ve amaçlanan uygulamanın çevresel koşullarına bağlı olarak kullanılabilir. Bağlayıcı, kaplamanın tohum performansını etkili bir şekilde artırmasını sağlarken çevresel etkiyi en aza indirmek için güçlü yapışma ile biyolojik olarak parçalanabilirlik arasında denge kurulmalıdır.

Biyokömürün partikül boyutu ve kaplanan tohumun türü, elektrostatik kaplama işleminin verimliliğini ve başarısını etkileyen önemli faktörlerdir. Daha ince biyokömür partikülleri daha iyi yapışma ve daha düzgün kaplamalar üretme eğilimindedir, ancak uygulama sırasında toz oluşumu ve malzeme kaybı riskini de artırabilirler. Buna karşılık, daha iri partiküller kayba daha az eğilimlidir ancak düzensiz kaplamalara ve tohum yüzeyi ile temasın azalmasına neden olabilir. Uygun partikül boyutunun seçilmesi, boyut, şekil ve yüzey dokusu dahil olmak üzere tohum türünün özel ihtiyaçlarının dikkate alınmasını gerektirir.

Yüzey özellikleri ve çimlenme gereksinimlerindeki farklılıklar sonuçları etkileyebileceğinden, tohum türü de kaplama sürecinde önemli bir rol oynar. Pürüzsüz tohumların homojen bir şekilde kaplanması genellikle daha kolayken, pürüzlü veya düzensiz yüzeylere sahip tohumlar, tutarlı bir kaplama elde etmek için bağlayıcı viskozitesinde ve uygulama tekniklerinde ayarlamalar gerektirebilir. Bu etkileşimleri anlamak, kaplanmış tohumların çimlenme potansiyellerini ve tarladaki performanslarını korumalarını sağlarken biyokömürün faydalarını en üst düzeye çıkarmak için kaplama sürecini özelleştirmenin anahtarıdır. Bu faktörlerin ele alınmasıyla, elektrostatik kaplama süreci, tarımsal sistemlerin ve çevresel koşulların çeşitli ihtiyaçlarını karşılayabilen yüksek kaliteli biyokömür kaplı tohumlar üretmek için rafine edilebilir (Zhang et al., 2022).

### Gelecek Perspektifleri ve Öneriler

Elektrostatik kaplama teknolojisinin geleceği, hassasiyeti, verimliliği ve genel etkinliği artırmak için gelişmiş yeniliklerin bir araya getirilmesinde yatmaktadır (Zhang et al., 2022). Makine öğrenimi ve yapay zeka (AI) gibi gelişmekte olan araçlar, partikül boyutu, yük yoğunluğu ve tohum yüzey özellikleri gibi değişkenleri gerçek zamanlı olarak sürekli analiz ederek kaplama sürecini optimize edebilir (Sharma et al., 2023). Entegre sensörlere sahip akıllı kaplama sistemlerinin oluşturulması, uygulama sırasında dinamik ayarlamalar yapılmasını sağlayarak tutarlı ve yüksek kaliteli kaplamalar elde edilmesini sağlayabilir (Wani & Kothari, 2018). Ayrıca, nanoteknolojinin biyokömür kaplamalarına entegre edilmesi, besin sağlama verimliliğini, antimikrobiyal özelliklerini ve stres direncini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir ve tarımsal üretkenlikte yeni gelişmelerin önünü açabilir (Pereira et al., 2021).

Biyokömür kaplı tohumlar, geleneksel ve hidroponik tarım sistemlerinde başarı göstermiş olsa da, uygulamaları dikey tarım, ağaçlandırma projeleri ve kentsel tarım gibi diğer alanlara da genişletilebilir (Nazir & Batool, 2020). Dikey ve kentsel tarımda, biyokömür kaplı tohumlar, sürdürülebilirliği korurken alan kısıtlı ortamlarda verimi en üst düzeye çıkarmak için kullanılabilir (Lira-Saldívar et al., 2018). Yeniden ağaçlandırma çalışmalarında bu kaplamalar, bozulmuş veya kurak arazilerde çimlenme oranlarını ve fide oluşumunu artırarak ekosistem restorasyonunu hızlandırabilir (Zvinavashe et al., 2019). Ayrıca, biyokömür kaplamalar belirli ürünler veya bölgeler için özelleştirilebilir ve yerel tarımsal zorlukları ve iklim koşullarını ele alan özel çözümlere olanak tanır (Nazir & Batool, 2020).

Biyokömür kaplı tohumlar, sürdürülebilir ve çevre dostu tarım uygulamalarına yönelik artan taleple uyumludur (Sharma et al., 2023). Bu kaplamalar kimyasal gübre ve pestisitlere olan bağımlılığı azaltarak geleneksel tarım yöntemlerinin çevresel etkilerini hafifletmektedir (Pereira et al., 2021). Gelecekteki araştırmalar, karbon tutma, sera gazı emisyonlarını azaltma ve toprak sağlığını iyileştirme yeteneklerini geliştirmek için biyokömür kaplamalarının bileşimini optimize etmeye odaklanmalıdır (Wani & Kothari, 2018). Araştırmacılar ve tarım endüstrileri arasındaki ortaklıklar, biyokömür kaplı

tohumların kullanımına yönelik kılavuzlar ve standartlar geliştirmek ve bunların sürdürülebilir bir çözüm olarak yaygın bir şekilde benimsenmesini sağlamak için gereklidir (Sharma et al., 2023).

Biyokömürle kaplanmış tohumların tam potansiyeline ulaşabilmesi için kaplama sürecinin mekanize edilmesi ve büyük ölçekli tarımsal üretimin taleplerini karşılayacak şekilde ölçeklendirilebilir olması gerekir (Nazir & Batool, 2020). Yüksek hacimli tohumları verimli ve uygun maliyetli bir şekilde işleyebilen endüstriyel sınıf elektrostatik kaplama ekipmanı geliştirmek kritik önem taşımaktadır (Lira-Saldívar et al., 2018). Mekanize sistemler, kaplamada homojenliği ve hassasiyeti korurken çeşitli tohum türlerini ve boyutlarını barındıracak şekilde tasarlanmalıdır (Zvinavashe et al., 2019). Ayrıca, çiftçiler ve tarım sektöründe faaliyet gösteren firma çalışanları için ölçeklenebilir altyapı ve eğitim programlarına yatırım yapılması, bu teknolojinin farklı tarım sistemlerinde benimsenmesini kolaylaştıracak ve araştırma ile pratik uygulama arasındaki boşluğu dolduracaktır (Wani & Kothari, 2018). Sonuç olarak, biyokömür kaplı tohumların ve elektrostatik kaplama teknolojisinin geleceği, tarımı daha sürdürülebilir ve dirençli bir endüstriye dönüştürmek için büyük umut vaat etmektedir (Sharma et al., 2023).

## SONUÇ

Biyokömür kaplı tohumlar, sürdürülebilir tarımda önemli bir ilerlemeyi temsil etmekte ve çevresel zorlukları azaltırken ürün performansını artırmaya yönelik çok yönlü bir yaklaşım sunmaktadır. Bu kaplamalar, gelişmiş çimlenme oranları ile fide canlılığı ve tuzluluk- kuraklık gibi abiyotik streslere karşı artan tolerans dahil olmak üzere önemli faydalar sağlar. Biyokömür kaplı tohumlar, su tutma, besin maddesi iletimi ve toprak sağlığını geliştirerek toprağın bozulması, su kıtlığı ve tarım sistemlerinde aşırı kimyasal kullanımı ile ilgili kritik sorunları ele almaktadır. Pestisitleri ve ağır metalleri adsorbe etme yetenekleri, çevre dostu tarım uygulamalarını teşvik etmedeki rollerinin altını daha da çizmektedir.

Bu derleme, biyokömür kaplı tohumların dönüştürücü potansiyelini vurgulayarak, geleneksel tarımda, hidroponik sistemlerde ve arazi ıslahı çalışmalarında geniş uygulanabilirliğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, biyokömür kaplı tohumlar küresel tarımın artan taleplerine sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Biyokömürün önemli özelliklerini en son kaplama teknolojileriyle birleştirerek, gıda güvenliği, çevresel bozulma ve iklim değişikliği sorunlarını ele alabilen esnek tarım sistemlerinin önünü açmaktadırlar.

## TEŞEKKÜRLER

Makaleyi geliştirmek için yaptıkları katkılardan dolayı isimsiz hakemlere teşekkür ederiz.

## YAZAR KATKILARI

Yazarlar bu çalışmaya eşit oranda katkıda bulunmuşlardır.

## ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

## KAYNAKLAR

- Adelabu, D. B., & Franke, A. (2022). The beneficial effects of insect pollination and biochar seed coating on okra (*Abelmoschus esculentus*) seed quality at varying temperature conditions. *Agriculture*, 12(10), 1690. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101690>
- Aller, M. (2016). Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(6), 1–25. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1212368>
- Andriessen, R., Snetselaar, J., Suer, R., Osinga, A., Deschietere, J., Lyimo, I. N., et al. (2015). Electrostatic coating enhances bioavailability of insecticides and breaks pyrethroid resistance in mosquitoes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(39), 12081–12086. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510801112>

- Bolan, N., Hoang, S. A., Beiyuan, J., et al. (2021). Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Journal of Research*. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1922047>
- Campobenedetto, C., Mannino, G., Agliassa, C., et al. (2020). Transcriptome analyses and antioxidant activity profiling reveal the role of a lignin-derived biostimulant seed treatment in enhancing heat stress tolerance in soybean. *Plants*, 9(10), 1308. <https://doi.org/10.3390/plants9101308>
- Daful, A. G., Chandraratne, M., & Loridon, M. (2021). Recent perspectives in biochar production, characterization and applications. *IntechOpen Book Chapter*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99788>
- Enaïme, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lüübken, M. (2020). Biochar for wastewater treatment—Conversion technologies and applications. *Applied Sciences*, 10(10), 3492. <https://doi.org/10.3390/app10103492>
- Evizal, R., & Prasmatiwi, F. (2023). Biochar: Pemanfaatan dan aplikasi praktis. *Jurnal Agroteknologi*, 22(1), 1–12. <https://doi.org/10.23960/ja.v22i1.7151>
- Glodowska, M., Schwinghamer, T., Husk, B. R., & Smith, D. L. (2017). Biochar based inoculants improve soybean growth and nodulation. *Agricultural Sciences*, 8(9), 710–722. <https://doi.org/10.4236/AS.2017.89076>
- Hussain, A., Al-Taey, D., & Kadhum, H. (2023). Biochar application increases the amount of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1213(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012023>
- Igalavithana, A., Mandal, S., Niazi, N., et al. (2017). Advances and future directions of biochar characterization methods and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1421844>
- Imran, S., Sarker, P., Hoque, M. N., et al. (2022). Biochar actions for the mitigation of plant abiotic stress. *Crop & Pasture Science*, 73(2), 118–130. <https://doi.org/10.1071/CP21486>
- Karpunina, L. V., Kalmykov, N. V., Bychkova, V., et al. (2022). Effect of exopolysaccharide *Streptococcus thermophilus* on stress resistance of sorghum. *AgroJournal*, 5, 27–30. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i5pp27-30>
- Lira-Saldívar, R. H., Argüello, B. M., Villarreal, G. D. S., & Reyes, I. V. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Agro Productividad*, 11(2), 57–64. <https://doi.org/10.15174/AU.2018.1575>
- Maienza, A., Baronti, S., Puseddu, E., et al. (2015). The biochar - a solution to enhance processing tomato production. *Acta Horticulturae*, 1081, 231–236. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1081.26>
- Nazir, R., & Batool, M. (2020). Synthesis of biochar-based composites to evaluate morphology of wheat seedling. *LGU Journal of Life Sciences*, 4(4), 67–78. <https://doi.org/10.54692/lgujls.2020.0404123>
- Olszyk, D., Shiroyama, T., Novak, J., & Johnson, M. G. (2018). A rapid-test for screening biochar effects on seed germination. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(10), 1193–1203. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1495726>
- Pereira, A. E. S., Oliveira, H. C., Fraceto, L. F., & Santaella, C. (2021). Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 11(2), 267. <https://doi.org/10.3390/nano11020267>
- Rahman, M. M., & Dutta, H. (2022). Microbial seed coating: An emerging strategy towards organic vegetable production. *Agricultural Research*, 11(2), 231–242. <https://doi.org/10.18805/ag.r-2272>
- Rodrigues, L. A., Oliveira, I. C., Nogueira, G. A., Silva, T. R. D., Cândido, A., & Alves, C. Z. (2019). Coating seeds with silicon enhances the corn yield of the second crop. *Revista Ciência Agronômica*, 32(4), 897–905. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n405rc>
- Safdar, H., Jamil, M., Hussain, A., et al. (2022). The effect of different carrier materials on the growth and yield of spinach under pot and field experimental conditions. *Sustainability*, 14(19), 12255. <https://doi.org/10.3390/su141912255>
- Sharma, O. P., Singh, D., Kushwah, N., & Chauhan, A. P. S. (2023). Nano biochar for sustainable agriculture and environmental remediation: A comprehensive review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 3366. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113366>
- Zhang, K., Khan, Z., Yu, Q., Qu, Z., Liu, J., Luo, T., Zhu, K., Bi, J., Hu, L., & Luo, L. (2022). Biochar coating is a sustainable and economical approach to promote seed coating technology, seed germination, plant performance, and soil health. *Plants*, 11(21), 2864. <https://doi.org/10.3390/plants11212864>
- Zvinavashe, A. T., Lim, E. J., Sun, H., & Marelli, B. (2019). A bioinspired approach to engineer seed microenvironment to boost germination and mitigate soil salinity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(51), 25555–25562. <https://doi.org/10.1073/pnas.1915902116>