



Karbon noktalarının farklı kil mineralleri üzerindeki etkisi

Kadir YILMAZ, Ömer Faruk DEMİR, Burak ÖZBEK*

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Kahramanmaraş

Öz

İklim değişimleri, artan insan sayısı ve azalan toprak kalitesi gibi nedenlerle dünya ölçeğinde gıda güvenliğinde zorluklar yaşanmaktadır. Geleneksel tarım yöntemleri sürdürülebilir tarımsal üretimi desteklemede yetersiz kaldığından, gıda güvensizliği sorununu etkili bir şekilde çözmek için yüksek performanslı ve sürdürülebilir bir tarım sistemini geliştirmek önem arz etmektedir. Son yıllarda tarımsal alanlarda girdi verimliliğini arttırarak gıda üretimini ve güvenliğini arttırmak, tarım ve çevresel sorunlara çözüm üretmek amacıyla tarımda nanoteknoloji kullanımında umut verici gelişmeler olmaktadır. Nanoteknolojinin bir ürünü olan nano partiküllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde çeşitli alanlardaki kullanımlarında hızlı artışlar gözlenmektedir. Son dönemlerde boyutları genellikle 0.1-20 nm arasında değişen ve yarı karbon bir malzeme olarak tanımlanan karbon noktaları (KN) oldukça popüler hale gelmiştir. Yapı ve özellikleri itibarıyla daha önce incelenmiş karbon formlarına göre belirgin farklılıklar gösteren karbon noktaları, çeşitli fizikokimyasal niteliklerin yanı sıra yüksek biyo-uyumluluk ve yüksek stabilite gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir. Toprak agregasyonu ve verimliliğini önemli ölçüde artıran ve bir kül bileşeni olan karbon noktaları hakkında yapılan araştırmalar bu çalışmada incelenmeye çalışılmıştır. Yapılan araştırmalarda karbon noktaları ile kil kompozitlerinin çevresel ve tarımsal uygulamalarda yenilikçi çözümler sunma potansiyeline sahip materyaller olduğu öne çıkmaktadır. Bu kapsamda karbon noktalarının farklı kil mineralleriyle olan etkileşimleri incelemekte; özellikle elektrostatik etkileşimler, van der Waals kuvvetleri ve yüzey fonksiyonelleştirme süreçleri detaylı bir şekilde ele alınmakta, bu etkileşimlerin verimlilik ve adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Karbon noktalar, nanoteknoloji, kil mineralleri, sürdürülebilir tarım.

The effects of carbon dots on different clay minerals

Abstract

Climate changes, increasing population, and decreasing soil quality create challenges in food security on a global scale. Traditional agricultural methods are insufficient to support sustainable agricultural production, making it essential to develop a high-performance and sustainable agricultural system to effectively address the issue of food insecurity. In recent years, there have been promising developments in the use of nanotechnology in agriculture to increase input efficiency in agricultural areas, enhance food production and safety, and address agricultural and environmental problems. Due to their chemical and physical properties, there is a rapid increase in the use of nanoparticles, a product of nanotechnology, in various fields. Carbon dots (CDs), defined as quasi-carbon materials with sizes typically ranging from 0.1 to 20 nm, have recently become quite popular. Carbon dots, which exhibit distinct differences from previously studied carbon forms in terms of structure and properties, attract attention with their various physicochemical qualities, including high biocompatibility and high stability. This study aims to examine research on carbon dots, which significantly enhance soil aggregation and productivity and are a component of ash. Research indicates that carbon dots and clay composites have the potential to provide innovative solutions for environmental and agricultural applications. In this context, the interactions between carbon dots and different clay minerals are examined in detail, focusing on electrostatic interactions, van der Waals forces, and surface functionalization processes, and evaluating the effects of these interactions on efficiency and adsorption capacity.

Keywords: Carbon dots, nanotechnology, clay minerals, sustainable agriculture.

© 2025 Türkiye Toprak Bilimi Derneği. Her Hakkı Saklıdır

* Sorumlu yazar:

Tel. : 0 (553) 238 5298

E-posta : burak_ozbek@outlook.com.tr

Makale Türü: DERLEME MAKALE

Geliş Tarihi : 22 Mart 2025

Kabul Tarihi : 6 Mayıs 2025

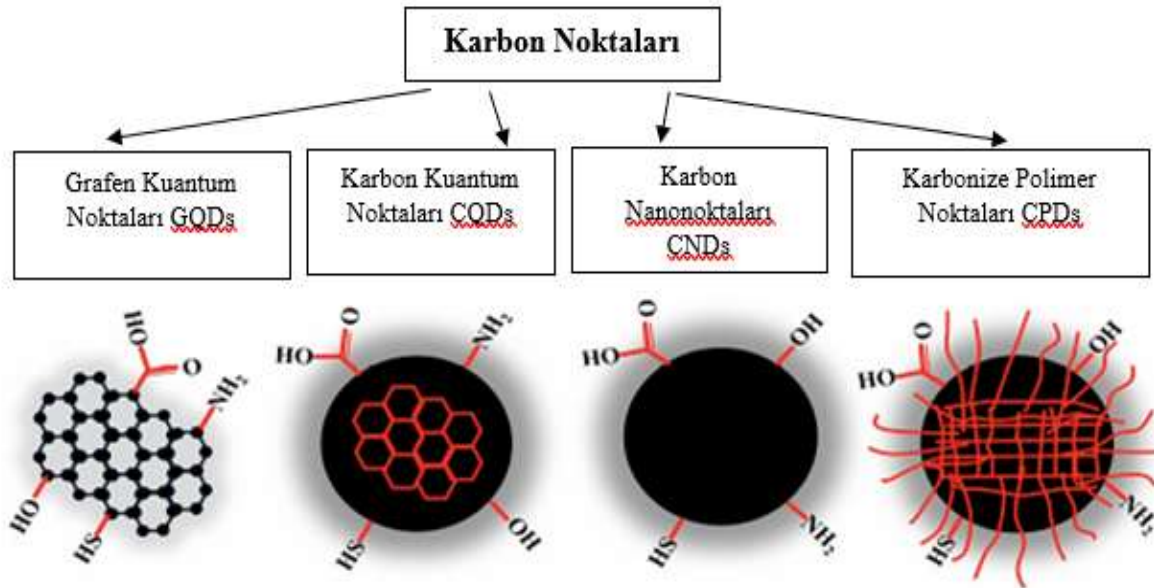
e-ISSN : 2146-8141

DOI : 10.33409/tbbbd.1663198

Giriş

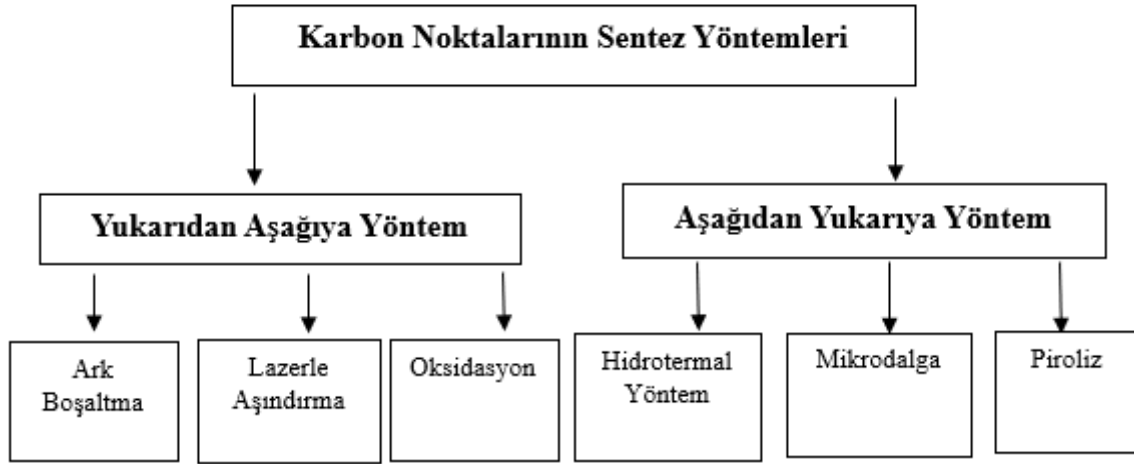
İklim değişimleri, artan insan sayısı ve azalan toprak kalitesi dünya çapında gıda güvenliği açısından zorluklar yaratmaktadır (Willett ve ark., 2019). Geleneksel tarım yöntemleri sürdürülebilir tarımsal üretimi desteklemede yetersiz kalmaktadır (Lowry ve ark., 2019). Gıda güvensizliği sorununu etkili bir şekilde çözmek için yüksek performanslı ve sürdürülebilir bir tarım sistemi geliştirmek önem arz etmektedir. Karbon noktaları (KN), tarımsal uygulamaları iyileştirmede büyük potansiyele sahip olan nispeten yeni karbon nano malzemelerdir (Maholiya ve ark., 2023; Tripathi ve Sarkar, 2022).

Karbon noktaları (KN), floresan özellikleri barındıran bir tür karbon tabanlı nano malzemelerdir ve 10 nm'den daha küçük boyutlarda, yarı küresel dizilimlerle karbon nanopartiküllerinden meydana gelir (Maholiya ve ark., 2023). KN'ları, bir dizi nanosize floresan karbon bileşiğinin genel adı olup, grafen kuantum noktaları, karbon kuantum noktaları, karbon nano noktaları ve karbonize polimer noktaları gibi belirli karbon çekirdek yapıları ile yüzey grupları ve özelliklere göre ayrıştırılan malzemeleri kapsar (Şekil 1) (Xia ve ark., 2019; Singh ve ark., 2023). KN'ları genellikle yüzeylerinde amino ($-NH_2$), karboksil ($-COOH$) ve hidroksil ($-OH$) gibi su çözünürlüğünü artıran ve muhtemelen H bağı oluşumundan kaynaklanan O/N barındıran işlevsel gruplara sahiptir (Singh ve ark., 2023). KN'ları, yüzey grupları açısından zengin olduğundan işlevsel ligandlar, iyonlar, organik moleküller, polimerler, DNA ve proteinlerle bağlanabilir, bu da KN'larının yüzey özelliklerini ve etkileşimlerini değiştirerek çeşitli alanlarda belirli taleplere uygun hale gelmelerini sağlar.



Şekil 1. Karbon Noktalarının Sınıflandırılması (Xia ve ark., 2019; Singh ve ark., 2023)

Karbon noktalarının üretilmesinde yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya olmak üzere iki farklı yaklaşım mevcuttur (Dinç ve Kara, 2018). Sentez yöntemi Şekil 2' de şematik bir şekilde gösterilmektedir. Lazer ablasyonu, asidik aşındırma ve elektrokimyasal aşındırma tekniklerinin uygulandığı yukarıdan aşağıya üretim metodu ile kaliteli ve saf karbon noktaları elde edilebilmektedir (Kang ve Lee, 2019). Ancak bu yöntem, fazla enerji tüketimi, yüksek atık madde oluşumu, karmaşık sentez süreci ve maliyetinin yüksekliği gibi sebeplerden dolayı pek tercih edilmemektedir. Bunun yerine hidrotermal, mikrodalga, piroliz gibi yöntemlerin kullanıldığı aşağıdan yukarıya üretim yöntemi tercih edilmektedir (Şekil 2) (Kang ve Lee., 2019; Dinç ve Kara., 2018). Bu teknikte karbon noktaları, karbonhidratlar, organik asitler ve polimerler gibi organik bileşenlerden yüksek ısıda çözücü olarak su veya etanol kullanılarak kolaylıkla sentezlenmektedir (Li ve ark., 2021; Dinç ve Kara., 2018).



Şekil 2. Karbon noktaların sentez yöntemleri (Li ve ark., 2021; Dinç ve Kara., 2018).

Kil, esasen alüminosilikatlardan oluşan ince taneli doğal bir toprak malzemesi sınıfıdır. Bazen farklı kristal yapıları içerisinde değişken miktarlarda demir, magnezyum, alkali metaller, toprak alkali metaller ve diğer katyonlar da bulunabilmektedir. Kil mineralleri, toprak sistemlerinin önemli bir bileşeni olarak, bu sistemlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Montmorillonit, kaolinit ve illit gibi farklı kil türleri iyon değişim kapasitesi, yüzey yükü ve gözeneklilik gibi niteliklerine bağlı olarak karbon noktalarının çevresel davranışlarını değiştirebilmektedir (Sposito, 1989). Bu bağlamda, karbon noktalarının kil mineralleriyle etkileşimlerinin anlaşılması, bu nanomalzemelerin tarımsal alanlarda daha etkin ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir (Chen ve ark., 2021).

Bu derleme makale, karbon noktalarının farklı kil mineralleriyle etkileşimini incelemeyi amaçlamaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmaları değerlendirerek, bu etkileşimlerin mekanizmaları ve tarımsal uygulamalardaki olası etkileri tartışılacaktır. Ayrıca, konuya dair bilgi eksiklikleri vurgulanarak gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulacaktır.

Karbon noktalarının kimyasal yapıları ve kil mineralleri ile etkileşimleri üzerine yapılan araştırmalar

Tarım alanında karbon noktalarının çeşitli kil mineralleriyle etkileşimi, tarımsal uygulamaların etkinliğini artırmak, çevresel etkileri minimize etmek ve toprak sağlığını geliştirmek için önemli bir araştırma konusudur. Karbon noktaları, kil mineralleriyle birleştiğinde, bu birleşimlerin toprak ve bitki sağlığına olan etkileri olumlu sonuçlar verebilir. Karbon noktaları, farklı kil minerali gruplarıyla (Kaolinit, serpantin, mika, simektit, profilit ve talk, klorit, paligorskit, sepiyolit, vermikülit) etkileşimleri kimyasal bağlar, elektrostatik çekimler, hidrofobik etkileşimler ve van der Waals kuvvetleri gibi çeşitli mekanizmalar aracılığıyla şekillenir. Kil mineralleri genelde negatif yüklü yüzeylere sahip mikroskobik parçacıklardır. Karbon noktaları ise yüzeylerinde farklı fonksiyonel gruplar taşır (örneğin, $-COOH$, $-OH$, $-NH_2$). Bu onları elektrokimyasal olarak aktif kılar. Karbon noktalarının yüzeyindeki pozitif yüklü gruplar (örneğin, $-NH_2$ grupları) ile kil minerallerinin negatif yükleri arasındaki elektrostatik etkileşimler, bu iki malzemenin güçlü bir şekilde birleşmesine yol açar. Bu bağlar, karbon noktalarının kil mineralleriyle etkin bir şekilde etkileşimde bulunmasını ve toprakta uzun süre kalmasını sağlar. Bu etkileşimler, toprakta karbon noktalarının dağılımını kontrol ederek, besin maddelerinin ve gübrelerin hedeflenen bir şekilde taşınmasını sağlar (Li ve ark., 2020). Bazı karbon noktalarının yüzeylerinde hidrojen bağları veya hidrofobik gruplar mevcut olabilir. Bu tür gruplar, kil minerallerinin yüzeyindeki su ile etkileşime geçerek, hidrofobik etkileşimlerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu etkileşimler, karbon noktalarının kil minerallerinin yüzeyine tutunmasını ve daha stabil bir durumda kalmasını sağlar. Hidrofobik etkileşimler, karbon noktalarının toprakta su ile taşınmasını ya da besin maddelerinin taşınmasında rol oynayan taşıma hızını etkileyebilir (Yang ve ark., 2019). Kil mineralleri ve karbon noktaları arasındaki etkileşimlerin diğer önemli bir mekanizması, van der Waals kuvvetleridir. Bu kuvvetler, moleküller arasında yakın mesafelerde meydana gelir ve zayıf elektriksel etkileşimlerle oluşur. Karbon noktalarının yüzeyleri, bu kuvvetler aracılığıyla kil mineralleriyle etkileşimde bulunabilir. Dolayısıyla karbon noktalarının daha stabil ve uzun

sürekli etkileşimler gerçekleştirmesini mümkün kılar. Van der Waals kuvvetlerinin etkisi özellikle suyun ve bitki köklerinin etkileşimi sırasında belirgin olabilir. Bu da karbon noktalarının toprakta daha etkin bir şekilde dağılmasını ve bitkilerle etkileşim kurmasını sağlar (Zhao ve ark., 2017). Kil mineralleri, özellikle alüminyum ve silisyum bazlı mineraller, çeşitli metal iyonlarını adsorbe edebilir ve bu iyonlarla kimyasal bağlar oluşturabilirler. Karbon noktalarının yüzeyindeki fonksiyonel gruplar (örneğin, karboksil grupları, amino grupları), bu metal iyonlarıyla koordinasyon bağları kurarak kil mineralleriyle etkileşebilir. Bu kimyasal bağlar, karbon noktalarının kil mineralleriyle birleşmesini ve toprak ortamında daha güçlü bir şekilde tutunmasını sağlar. Ayrıca, bu etkileşimler, besin maddelerinin ve ilaçların taşınmasını daha kontrollü hale getirebilir. Bu mekanizma, karbon noktalarının kil mineralleri ile etkileşime girerken çevresel kirleticilerin adsorpsiyonunu da artırır (Chen ve ark., 2020). Kil mineralleri, yüksek yüzey alanına sahip oldukları için fiziksel adsorpsiyon açısından oldukça etkilidir. Karbon noktalarının kil mineralleriyle etkileşimi, bu minerallerin yüzeylerinde fiziksel olarak adsorbe olma yoluyla da gerçekleşebilir. Fiziksel adsorpsiyon, elektrostatik çekimlerin ve van der Waals kuvvetlerinin etkisiyle karbon noktalarının kil mineralleri üzerinde birikmesine neden olur. Bu tür etkileşimler, karbon noktalarının daha geniş alanlara yayılmasını ve tarımsal ürünlerde etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar (Bai ve ark., 2019).

Özellikle, kil mineralleriyle etkileşen karbon noktaları, toprağa yerleştirilen gübre ve pestisitlerin kontrollü salınımını sağlama potansiyeline sahiptir (Li ve ark., 2020). Karbon noktaları farklı kil minerali gruplarının yüzeyine bağlanarak kompozitin reaktivitesini ve işlevselliğini artırabilir. Bu birleşim sayesinde organik moleküllerin adsorpsiyonu ve katalitik süreçlerde yüksek verimlilik sağlar (Zhao ve ark., 2019). Bu tür etkileşimler, karbon noktalarının daha geniş alanlara yayılmasını ve tarımsal ürünlerde etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar (Bai ve ark., 2019). Karbon noktalarının yüzeyindeki fonksiyonel gruplar (örneğin, karboksil grupları, amino grupları), metal iyonlarıyla koordinasyon bağları kurarak kil mineralleriyle etkileşebilir. Bu kimyasal bağlar, karbon noktalarının kil mineralleriyle birleşmesini ve toprak ortamında daha güçlü bir şekilde tutunmasını sağlar. Ayrıca, karbon noktalarının yüzey reaktivitesinin yüksek olması, kilin aktif yüzey alanını artırarak, katalitik reaksiyonlar için uygun bir ortam oluşturur. Karbon noktaları ve farklı kil mineralleri arasındaki etkileşimler, toprak yapısında değişikliklere yol açabilir ve bu değişiklikler bitki büyümesini olumlu yönde etkileyebilir.

Karbon noktaları üzerine yapılan araştırmalar

Karbon noktaları hakkında hakemli dergi makaleleri, SpringerLink (<http://rd.springer.com/>), Preprints (www.preprints.org), Elsevier (www.elsevier.com/locate/scitotenv), MDPI Open Access Journals (<https://www.mdpi.com/>) ve Dergi Park Akademik (<https://dergipark.org.tr>) veri tabanlarında yayınlanmış makaleler aranmıştır. Arama terimleri olarak "carbon dots" × "clay minerals", "carbon dots" × "agricultural", "carbon dots" × "effect of different clay minerals", "carbon dots" × "interaction of different clay minerals", "carbon dots" × "soil" dahil olmak üzere farklı anahtar kelime kombinasyonları kullanılmıştır. İlk olarak 750 yayın belirlenmiş ve bu yayınlar tek tek taranarak bunların içerisinden toplamda 5 makale seçilmiştir. Konuya ilişkin seçilen makaleler ile ilgili ayrıntılı bilgiler makale başlıkları altında verilmiştir.

Literatür araştırmasına dahil edilen makaleler şu kriterleri karşılamıştır: Karbon noktalarıyla yapılan çalışmalar, kil mineralleriyle yapılan çalışmalar, karbon noktaları ve farklı kil mineralleri üzerinde yapılan çalışmalar, karbon noktalarının tarımsal üretimde kullanılmasıyla ilgili çalışmalar, karbon noktaların fizyolojik fonksiyonları ve tarımda uygulamalarıyla ilgili çalışmalar, doymuş toprakta yüzey aktif madde aracılı karbon noktalarının hareketliliği anyonik ve katyonik yüzey aktif maddelerin karşılaştırmasıyla ilgili çalışmalar, karbon noktalarının tarımda potansiyelini veri odaklı yaklaşımlarla ortaya çıkarmakla ilgili çalışmalar, karbon nanomalzeme kil nanokompozitlerinin çeşitli uygulamalar için ilerlemesiyle ilgili çalışmalar, İngilizce dilinde yazılmış ve açık erişime ulaşılabilen makaleler.

Dışlanan makaleler şu kriterleri karşılamamıştır; Karbon noktalarıyla yapılmayan çalışmalar (Karbon kuantum noktaları, grafen kuantum noktaları, karbonize polimer noktaları), kil minerallerinin kullanılmadığı çalışmalar, polisakkaritlerle yapılan çalışmalar, karbon noktaların mineraller üzerindeki adsorpsiyon agregasyon ve birikim davranışlarıyla ilgili çalışmalardır. Son çalışmalar; Doğal ürünlerden elde edilen karbon noktaların geliştirilmesi sentez yöntemleri özellikleri ve uygulamaları hakkındaki çalışmalar, yorumlar, görüşler, röportajlar, editöre mektuplar, başyazılar, posterler, konferans özetleri, kitap bölümleri ve kitaplar, karbon noktalarının bitkiler üzerindeki etkileri çalışmalarıdır.

1- Lu ve ark. (2023) tarafından doymuş toprakta yüzey aktif madde aracılı karbon noktalarının hareketliliği üzerine yapılan bu çalışmada, anyonik ve katyonik yüzey aktif maddeler karşılaştırılmıştır. Çalışmada,

toprak örneği Çin'in Puyang bölgesinden alınmış ve pH değeri 7.56 olarak belirlenmiştir. Örnekler, ζ (zeta)-potansiyeli, FTIR, TEM ve TOC analizleriyle incelenmiştir. Ayrıca, karbon noktalarının süspansiyonları hazırlanmış ve dializ yöntemi ile saflaştırılmış, konsantrasyonu 132 mg/L^{-1} olarak belirlenmiştir. Bulgular, yeraltı sularında birlikte bulunan karbon nanomalzemeler ve çeşitli yüzey aktif maddelerin çevresel davranışlarını değerlendirmede ve karbon bazlı nanopartiküllerle ilgili potansiyel sorunlar ve riskleri tahmin etmede kullanılabileceğini göstermiştir. Araştırmada, doymuş toprak sütunlarında yüzey aktif madde aracılığıyla karbon noktalarının taşınmasının, yüzey aktif madde konsantrasyonlarına (örn. SDBS ve CTAB) ve su kimyasallarına (örn. çift değerli metal katyonlar ve pH) bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Her iki yüzey aktif madde, özellikle 10 mM NaCl arka plan elektrolitinde ve pH 7.0' deki çözeltilerde karbon noktalarının taşınmasını kolaylaştırdığı belirlenmiştir.

2- Li ve ark. (2023)'lerinin yayınlamış olduğu bir derlemede, karbon noktalarının (KN) tarımsal uygulamalar üzerindeki fizyolojik işlevleri araştırılmış, karbon noktalarının bitki büyümesi ve gelişimi, fotosentez süreci, su ve besin maddesi alımı, abiyotik stres direnci gibi fizyolojik süreçlere olan etkileri ele alınmıştır. Ayrıca, KN'lerin biyosensör olarak ekolojik çevreyi iyileştirme ve tarımsal uygulamaları geliştirme potansiyeli incelenmiş, tarımda gelecekteki uygulamalara yönelik beklentiler ve araştırma yönleri belirlenmiştir. Sonuçları, karbon noktalarının tarımdaki çeşitli uygulamalar açısından yüksek bir potansiyele sahip olduğunu, ancak hayvanlar ve bitkilerdeki biyoakümümlüm ve gıda zinciri üzerindeki etkileri hakkında hâlen yeterli bilgi bulunmadığını göstermiştir. Bu bağlamda, KN'lerinin ekolojik toksisitesini anlamaya yönelik sistematik ve derinlemesine yapılacak çalışmalar ile bu nanomalzemelerin tarımda güvenli bir şekilde kullanılmasına katkı da sağlayabileceği vurgulanmıştır.

3- Yine Li ve ark., tarafından 2024 yılından önce Web of Science ve CNKI veri tabanlarında karbon noktaları ile ilgili yapılan kapsamlı bir çalışma sonucu yayınlanan bir makalede, toplam 1587 yayın taranmış ve bu tarama sonucunda 71 makale seçilmiştir. Makalelerde genel olarak, karbon noktalarının bitki büyümesini artırma potansiyeline sahip olduğu ve tarım alanında büyük ilgi gördüğü belirtilmiştir. Bununla birlikte, mevcut veriler arasında uyumsuzlukların olduğu ve KN'ları ile bitkiler arasındaki etkileşimlerin yönlendirilmesini belirlemede önemli boşluklar olduğu vurgulanmıştır. Gelecekte, farklı KN türlerinin bozulma mekanizmalarının yanı sıra katkı atomlarının salınımı gibi konularda derinlemesine araştırmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir.

4- Boruah ve Chowdhury (2023) tarafından yapılan bir araştırmada, karbon nanomalzemelerin kil ile birleştirilmesi sonucu oluşan nanokompozitlerin çeşitli uygulamalardaki ilerlemeleri gözden geçirilmiştir. Çalışmada, karbon nanomalzemelerin killer ile oluşturduğu nanokompozitlere ait bazı örnekler tanımlanmaktadır. Bulgular, kil malzemelerinin karbon nanomalzemelerle birleştğinde tüm uygulamalarda büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Sonuçta bu çalışmanın, araştırmacıların bilgilerini genişletmesine yardımcı olacağı ve karbon nanomalzeme bazlı nanokompozitler üzerine yapılan en son bulguları araştırmada önemli bir platform sağlayacağı vurgulanmıştır.

5- Baştürk ve ark.(2022), karbon noktalarının tarımsal üretimde kullanılması konulu yapılan bir makalede, yeni bir nanogöbrecek olarak tanımlanabilecek karbon noktalarının sentezi, tarımsal üretimde kullanımı ve bu kullanımın etkileri üzerine detaylı incelemeler yapılmıştır. Çalışmada, karbon noktalarının tarımsal üretimde bitki büyümesi, verim artışı, su ve besin emilimini arttırması, hastalık ve zararlılara karşı direncin yükseltilmesi gibi olumlu etkileri olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, karbon noktalarının biyotik ve abiyotik strese karşı toleransı artırma kapasitesi olduğu belirtilmiştir. Günümüzde tarımsal üretimde kuraklık, su kıtlığı ve kimyasal ilaç kullanımının yarattığı olumsuz etkilerin azaltılmasında karbon noktalarının çevre dostu, biyo uyumluluk özellikleri ve toksisite içermemesi nedeniyle önemli katkılar sağlayabileceği öne sürülmüştür. Ancak, karbon noktalarının tarla ve sera koşullarında verim ve kaliteyi artırma yönünde özellikle fizyolojik çalışmalar da dahil olmak üzere daha geniş kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Sonuç

Literatürde yapılan incelemeler, karbon noktalarının farklı kil grupları ile etkileşimi sonucunda yüzey modifikasyonları, iyon değişim kapasitesinin artırılması, adsorpsiyon davranışlarının iyileştirilmesi ve nano materyallerin suda stabil kalmasını sağlayarak çeşitli uygulamalarda etkinliklerini artıracak önemli değişimler meydana getirdiğini göstermektedir. Başlangıç malzemelerinin uygun fiyatlı ve kolayca temin edilebilir olması nedeniyle karbon noktalarının sentezinde çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Ancak, karbon noktalarının kil mineralleriyle olan sinerjik etkilerinin mekanizmaları henüz tam olarak aydınlatılmamıştır.

Standart boyut, şekil ve fonksiyonel gruplara sahip yüksek kaliteli ve saf karbon noktaları için sistematik ve ölçeklenebilir bir sentez yöntemi henüz mevcut değildir. Bu durum, daha kapsamlı moleküler düzeyde araştırmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yapılan çalışmalar sınırlı olmakta ve doğada bulunan her bir kil türü ile ilgili çalışmalar eksik kalmaktadır. Gelecek araştırmalar, karbon noktalarının kil mineralleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için gelişmiş karakterizasyon teknikleri ile deneysel ve teorik çalışmalarını birleştirmeyi gerektirmektedir.

Kaynaklar

- Arpita Kumar S, Kumar P, Kataria N, Bhankar V, Kumar K, Kumar R, Hsieh CT, Khoo KS, 2023. Assessment of biomass-derived carbon dots as highly sensitive and selective templates for the sensing of hazardous ions. *Nanoscale*.
- Bai Y, Cao X, Zhang X, Liang X, Wang H, 2019. Adsorption mechanism of carbon dots on clay minerals: Insights from experimental and theoretical studies. *J. Colloid Interface Sci.* 554:114–123.
- Baştürk MH, Arslanoğlu SF, Öztürk R, 2022. Karbon noktaların tarımsal üretimde kullanılması. *Int. J. Life Sci. Biotechnol.* 5(3):669–679.
- Boruah JS, Chowdhury D, 2023. Advances in carbon nanomaterial clay nanocomposites for diverse applications. *Minerals* 13(1):26.
- Chen J, Liang Z, Yang X, 2020. Toxicological evaluations of carbon dots in agricultural systems. *Environ. Toxicol. Chem.* 39(5):1311–1320.
- Chen S, Liu J, Zeng H, Zhang Z, Chen C, 2021. Interaction mechanisms between engineered nanoparticles and clay minerals: Implications for soil remediation. *Environ. Sci. Nano* 8(2):404–423.
- Diñç S, Kara M, 2018. Synthesis and applications of carbon dots from food and natural products. *J. Apitherapy Nat.* 1(1):33–37.
- Kang Z, Lee ST, 2019. Carbon dots: Advances in nanocarbon applications. *Nanoscale* 11(41):19214–19224.
- Li G, Xu J, Xu K, 2023. Physiological functions of carbon dots and their applications in agriculture production. *Preprints*.
- Li J, Li X, Kah M, Yue L, Cheng B, Wang C, Wang Z, Xing B, 2024. Unlocking the potential of carbon dots in agriculture using data-driven approaches. *Sci. Total Environ.*
- Li J, et al, 2020. Interaction between carbon nanodots and clay minerals for biomedical applications. *Mater. Sci. Eng. C* 114:111073.
- Li Y, et al, 2021. Magnesium-nitrogen co-doped carbon dots enhance plant growth through multifunctional regulation in photosynthesis. *Chem. Eng. J.* 422:130114.
- Li Z, Wang S, Wang X, 2020. Carbon dots as delivery carriers for controlled release of agrochemicals. *J. Agric. Food Chem.* 68(28):7563–7572.
- Lowry GV, Avellan A, Gilbertson LM, 2019. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nat. Nanotechnol.* 14:517–522.
- Lu T, Chen J, Zhang Q, Zhang M, Li Y, Q Z, 2023. Surfactant mediated mobility of carbon dots in saturated soil: Comparison between anionic and cationic surfactants. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30:37622–37633.
- Maholiya A, Ranjan P, Khan R, Murali S, Nainwal RC, Chauhan PS, et al, 2023. An insight into the role of carbon dots in the agriculture system: a review. *Environ. Sci. Nano* 10:959–995.
- Sposito G, 1989. *The chemistry of soils*. Oxford Univ. Press.
- Tripathi S, Sarkar S, 2022. Chapter 8 - Carbon dots in agricultural system. In: R Khan, S Murali, & S Gogoi (Eds.), *Carbon Dots in Agricultural Systems* (pp. 175–197). Academic Press.
- Willet W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, et al, 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet* 393:447–492.
- Xia C, Zhu S, Feng T, Yang M, Yang B, 2019. Evolution and synthesis of carbon dots: From carbon dots to carbonized polymer dots. *Adv. Sci.* 6:1901316.
- Yang X, Li C, Liu Y, 2019. Carbon dots enhance plant growth and photosynthesis. *J. Agric. Food Chem.* 67(15):4426–4434.
- Zhao J, Li Y, Liu Y, Wang X, Zhang X, 2019. Functionalization of carbon dots on beidellite clay for enhanced reactivity and functionality in environmental and catalytic applications. *Environ. Sci. Technol.* 53(12):6789–6798.
- Zhao X, Li W, Zhang Y, 2017. Carbon quantum dots as fluorescent probes for pesticide detection. *J. Agric. Food Chem.* 65(34):7395–7400.