

Serin İklim Tahıllarında Karbon Ayak İzini Azaltmada Mikrobiyom, Nanoteknoloji ve İHA Yaklaşımları

Çağdaş Can TOPRAK¹  Zeki ERDEN¹ 

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, SİİRT-TÜRKİYE

Öz

Serin iklim tahıllarının, küresel gıda güvenliği açısından stratejik öneme sahip olduğu ve aynı zamanda tarımsal sera gazı emisyonlarının başlıca kaynakları arasında yer aldığı bilinmektedir. Bu bağlamda karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik yenilikçi ve bütüncül yaklaşımlara ihtiyaç duyulmuştur. Mikrobiyom temelli uygulamaların, özellikle rizosfer mikrobiyotasının nitrojen döngüsündeki işlevleri üzerinden azot kullanımı etkinliğini artırarak N₂O emisyonlarını sınırlama potansiyeli bulunmaktadır. Nanoteknoloji tabanlı gübre ve biyostimülantlar ise kontrollü salım mekanizmaları sayesinde besin kullanım verimliliğini yükseltmekte, girdi kaynaklı karbon yükünü azaltmaktadır. Öte yandan, insansız hava araçları (İHA) tarımda hassas izleme, stres tespiti ve değişken doz uygulamalarıyla emisyonların doğrudan takibini ve yönetimini kolaylaştırdığı bilinmektedir. Bu doğrultuda araştırmamızda, söz konusu üç yaklaşımı disiplinler arası bir çerçevede birleştirerek mevcut mekanizmaları, ölçüm yöntemlerini ve politika boyutları ele alınmış, serin iklim tahıllarında sürdürülebilir üretim için bilimsel bir yol haritası ortaya konulmuş ve gelecek araştırmalar için entegratif bir perspektif sunulmuştur.

Article Info

Received:12.09.2025

Accepted:30.09.2025

Anahtar Kelimeler

İHA
Karbon
Mikrobiyom
Nanoteknoloji
Tahıl

Microbiome, Nanotechnology, and UAV Approaches for Reducing the Carbon Footprint in Cool-Season Cereals

Abstract

Cool-season cereals hold strategic importance for global food security while simultaneously being among the primary sources of agricultural greenhouse gas emissions. In this context, innovative and holistic strategies are required to mitigate their carbon footprint. Microbiome-based applications, particularly the functions of rhizosphere microbiota in the nitrogen cycle, have the potential to enhance nitrogen use efficiency and limit N₂O emissions. Nanotechnology-driven fertilizers and biostimulants, through controlled release mechanisms, can improve nutrient use efficiency while reducing input-related carbon loads. Meanwhile, unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly recognized as valuable tools in precision agriculture, enabling targeted monitoring, stress detection, and variable-rate applications, thereby facilitating direct tracking and management of emissions. Building on this background, the present study integrates these three approaches within an interdisciplinary framework, addressing underlying mechanisms, measurement methodologies, and policy dimensions. A scientific roadmap is proposed to promote sustainable production of cool-season cereals, offering an integrative perspective for future research.

Keywords

Carbon
Cereals
Microbiome
Nanotechnology
UAVs



Corresponding Author
cagdascan.toprak@siirt.edu.tr

Giriş

Serin iklim tahılları, hem temel beslenme kaynağı sağlamaları hem de geniş ekim alanlarına sahip olmaları nedeniyle küresel gıda güvenliği açısından stratejik bir konumdadır (FAO, 2023a). Ancak bu ürünlerin üretim süreçleri, yoğun gübre ve enerji girdisine dayalı agronomi modelleri nedeniyle tarımsal sera gazı emisyonlarının başlıca kaynakları arasında yer aldığı belirtilmiştir (Tubiello vd., 2021; IPCC, 2022). Özellikle azotlu gübre kullanımı, nitroz oksit (N₂O) salınımı üzerinden karbon ayak izini artıran en kritik faktörlerden biri olduğu rapor edilmiştir (Smith vd., 2008). Türkiye ölçeğinde de benzer bir tablo kaydedilmiş ve tahıl üretiminde azot kullanım verimliliğinin düşük olmasının hem ekonomik kayıplara hem de çevresel baskıların artmasına neden olduğu bildirilmiştir (TOB, 2023a).

Son yıllarda karbon ayak izini azaltmaya yönelik yaklaşımlar, klasik yöntemlerin ötesine geçerek biyoteknoloji, nanoteknoloji ve dijital tarım entegrasyonunu içeren disiplinler arası bir çerçeveye yönelmiştir. Rizosfer mikrobiyotasının işlevsel çeşitliliği, azot döngüsünde yer alan enzimatik süreçler aracılığıyla sera gazı emisyonlarını sınırlama potansiyeli taşımaktadır (Bender vd., 2016). Nanoteknoloji tabanlı gübreler ve biyostimülantların ise kontrollü salım mekanizmaları sayesinde besin kullanım verimliliğini artırdığı ve çevresel kayıpları azalttığı kaydedilmiştir (Wang vd., 2016; Lowry vd., 2019). Öte yandan, insansız hava araçları (İHA) ile hassas tarım uygulamaları; stres faktörlerinin erken teşhisi, değişken doz gübre uygulamaları ve karbon salınımına ilişkin doğrudan gözlem olanakları sunarak emisyon yönetiminde yeni ufuklar açmaktadır (Khose ve Mailapalli, 2024; Zhang vd., 2024).

Bu doğrultuda, serin iklim tahıllarında karbon ayak izinin azaltılması yalnızca teknolojik bir yenilik meselesi değil, aynı zamanda stratejik destekle güçlendirilmesi gereken bütüncül bir dönüşüm alanıdır. Ulusal ölçekte sürdürülebilir tarım politikaları ile uluslararası iklim eylem planlarının uyumu, söz konusu stratejilerin uygulanabilirliği artıracağı beklenmektedir (IPCC, 2022; FAO, 2023b). Araştırmamızda, mikrobiyom, nanoteknoloji ve İHA tabanlı yaklaşımları disiplinler arası bir bakış açısıyla ele alarak serin iklim tahıllarında sürdürülebilir ve iklim dostu üretim için bilimsel bir yol haritası sunmak amaçlanmıştır.

Serin İklim Tahıllarında Karbon Ayak İzinin Kaynakları

Serin iklim tahılları, özellikle buğday (*Triticum aestivum* L.) ve arpa (*Hordeum vulgare* L.) geniş ekim alanları ve yüksek üretim hacimleri ile küresel gıda güvenliğinde stratejik bir konuma sahiptir. Küresel ölçekte, tarımsal arazi kullanım değişikliklerinin toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %22'sinden sorumlu olduğu ve bu payın önemli bir bölümünün azotlu gübre kullanımına bağlı olduğu bildirilmiştir (IPCC, 2022; Tubiello vd., 2021). Azotlu gübrelerin kullanımında düşük etkinlik oranının, yalnızca ekonomik kayıplara değil, aynı zamanda nitröz oksit (N_2O) salınımının artmasına yol açarak karbon ayak izini yükselttiği belirtilmiştir. N_2O 'nun küresel ısınma potansiyeli, karbondioksit ile kıyasla yaklaşık 300 kat daha yüksek olup (Smith vd., 2008), tahıl üretiminde kullanılan gübrelerin etkinliğinin artırılması kritik bir zorunluluk haline gelmiştir.

Türkiye'de TÜİK verilerine göre tarım sektörü toplam ulusal emisyonların yaklaşık %14'ünü oluşturmakta ve bu emisyonların önemli bir bölümü azotlu gübre kullanımına dayanmaktadır (TÜİK, 2023). Bunun yanında, enerji yoğun toprak işleme, sulama faaliyetleri ve hasat sonrası işlemler de karbon ayak izine katkı yapan diğer önemli faktörler arasında yer almaktadır. Fosil yakıt tüketimine dayalı sulama ve mekanizasyon uygulamalarının, üretim süreçlerinin toplam karbon yükünü belirgin şekilde artırdığı bildirilmiştir (Lal, 2020a). Dolayısıyla, serin iklim tahıllarının sürdürülebilir yönetiminin hem üretim verimliliğinin korunması hem de karbon ayak izinin azaltılması bakımından kritik bir öneme sahip olduğu düşünülmüştür.

Mikrobiyom Temelli Yaklaşımlar ve Azot Kullanım Verimliliği

Rizosfer mikrobiyotası, serin iklim tahıllarında besin döngülerini düzenleyen temel biyolojik bileşenlerden biri olup, özellikle azot metabolizmasındaki işlevi nedeniyle karbon ayak izinin azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Azot döngüsünde görev alan nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçleri, mikroorganizma topluluklarının enzimatik aktiviteleri tarafından yönlendirilmekte ve bu süreçler tarımsal kaynaklı nitröz oksit (N_2O) emisyonlarının miktarını doğrudan etkilemektedir (Butterbach-Bahl vd., 2013). Yürütülen bazı araştırmalarda çeşitli bakteriyel grupların (*Azospirillum*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*) ve mikorizal mantarların rizosferdeki etkileşimleri, bitkilerin azot kullanım verimliliğini (NUE) artırmakta ve aşırı gübre kullanımına olan bağımlılığı azalttığı kaydedilmiştir. (Bender vd., 2016; Smith ve de Smet, 2018).

Yakın geçmişte yapılan çalışmalar, mikrobiyom temelli uygulamaların yalnızca N_2O emisyonlarını sınırlamakla kalmayıp aynı zamanda bitki stres toleransını da güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Öyle ki arbusküler mikoriza mantarları (AMF) inokülasyonu, denitrifikasyon ve nitrifikasyonla ilişkili mikrobiyal grupları baskılayarak N_2O emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken, bitkinin azot kullanımını ve gelişimini de desteklemektedir (Li vd., 2023). Benzer şekilde, yabani pirinç rizosferinden elde edilen mikrobiyom

inokülasyonlarının, azot bağlanmasını teşvik ettiği, evcilleştirilmiş çeşitlerde gözlenen yüksek N_2O salımlarını sınırladığı ve bitki performansını iyileştirdiği rapor edilmiştir (Chang vd., 2025). Ayrıca, bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve mikrobiyal biyostimülanların, kuraklık, tuzluluk ve yüksek sıcaklık gibi abiyotik stres koşullarında oksidatif stresi azaltarak, kök gelişimini destekleyerek ve su kullanım verimliliğini artırarak bitki stres toleransını belirgin şekilde güçlendirdiği gösterilmiştir (Fadiji vd., 2021; Benmrid vd., 2023). Nitekim bazı rizobakterilerin kök sisteminde hormon benzeri bileşikler sentezleyerek besin alımını düzenlediği ve azot gübreleme verimliliğini %15–30 oranında artırdığı de bildirilmiştir (Wang vd., 2020). Türkiye’de yürütülen çalışmalar ise bu bulguları desteklemekte; buğday üretiminde mikrobiyal gübre uygulamalarının azot kullanımını optimize ederek hem verim artışı sağladığını hem de çevresel baskıları azalttığını ortaya koymuştur (Öztüfekçi, 2015). Dolayısıyla, mikrobiyom temelli yaklaşımlar serin iklim tahıllarında sürdürülebilir üretim stratejilerinin merkezinde yer almakta ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik biyolojik çözümler için kritik bir araştırma alanı oluşturduğu düşünülmüştür.

Nanoteknoloji Tabanlı Gübreler ve Biyostimülanlar

Günümüzde nanoteknoloji tabanlı tarımsal girdiler, serin iklim tahıllarında karbon ayak izini azaltmaya yönelik yenilikçi araçlar arasında öne çıkmaktadır. Özellikle nanogübrelerin, makro ve mikro besin elementlerinin kontrollü salımını sağlayarak hem bitki beslenme etkinliğini artırmakta hem de aşırı gübre kullanımına bağlı çevresel kayıpları sınırlandırdığı belirtilmiştir (Lowry vd., 2019). Nanopartikül taşıyıcı sistemler sayesinde besin elementleri kök yüzeyinde daha uzun süre tutulabilmekte, bu da azot ve fosfor gibi kritik elementlerin toprakta yıkanmasını engelleyerek verimliliği artırmaktadır (Wang vd., 2016). Son yıllarda yapılan araştırmalar, biyostimülanlarla entegre edilen nanoteknoloji uygulamalarının sürdürülebilir tarımda önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Bitki kök bölgesine uygulanan nanoformülasyonlu biyostimülanların, stres toleransını artırarak azot kullanım verimliliğini yükselttiği ve buğday ile arpa üretiminde verim artışına katkı sunduğu rapor edilmiştir (Fraceto vd., 2016; Chen ve Yada, 2011).

Türkiye’de de yürütülen bazı saha çalışmalarında, nano-gübrelerin geleneksel gübrelerle kıyasla daha düşük dozlarla aynı verim artışını sağladığı, dolayısıyla girdi kaynaklı karbon yükünü azalttığı ortaya konmuştur (Dağhan, 2017). Bu kapsamda, nanoteknoloji tabanlı gübre ve biyostimülanların entegrasyonu, serin iklim tahıllarında hem verimlilik hem de sürdürülebilirlik bakımından stratejik bir yenilik olarak değerlendirilmekte; çevresel etkilerin azaltılması için gelecek tarımsal stratejilerde önemli bir yere sahip olacağı öngörülmektedir.

İHA Tabanlı Hassas Tarım ve Emisyon Yönetimi

İnsansız hava araçları (İHA), buğday ve arpa gibi başlıca serin iklim tahıllarında mekânsal ve zamansal değişkenliğin yüksek olduğu üretim sistemlerinde bitki gelişiminin ve çevresel faktörlerin yüksek çözünürlüklü izlenmesine olanak tanıyarak hassas tarım uygulamalarında kritik bir araç hâline gelmiştir. Yürütülen araştırmalarda hiperspektral, termal ve RGB sensörlerle elde edilen veriler; klorofil durumu, azot beslenme düzeyi, su stresi ve fenolojik ilerleme gibi parametrelerin haritalanmasını mümkün kılmakta ve değişken doz gübreleme ile sulama yönetimine doğrudan katkı sağlandığı rapor edilmiştir (Zhang ve Kovacs, 2012; Aasen vd., 2018; Sishodia vd., 2020).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, İHA temelli spektral indekslerin (NDVI, NDRE, LAI türevleri) serin iklim tahıllarında azot durumunu güvenilir biçimde tahmin edebildiğini ve bu yolla gübre kararlarını iyileştirdiğini göstermektedir (Gracia-Romero vd., 2019). Türkiye’de de sınırlı sayıda saha denemesi, İHA’ların fenotipleme ve stres izleme süreçlerinde kullanılmaya başlandığını ortaya koymaktadır; ancak bu alanda kapsamlı çalışmalar henüz gelişme aşamasındadır.

İHA’ların emisyon yönetimine olumlu etkilerinin dolaylı ve doğrudan olmak üzere iki boyutta değerlendirilmesinin yararlı olacağı düşünülmüştür. Dolaylı olarak, veri güdümlü değişken doz azot yönetimi sayesinde aşırı gübre kullanımını azaltarak N_2O kayıplarını sınırlama etkisi; doğrudan olarak ise, taşınabilir sensörlerin entegrasyonu ile metan (CH_4) ve nitröz oksit (N_2O) gibi sera gazlarının sahada

izlenmesini kolaylaştırmak gibi bir etkisinin olduğu kaydedilmiştir. Meta-analitik bulgular, değişken doz azot uygulamalarının N_2O emisyonlarını anlamlı ölçüde düşürdüğünü ortaya koyarken (Ingrisch vd., 2020; Maaz vd., 2021), son çalışmalar İHA tabanlı sensörlerin emisyon kaynaklarının mekânsal dağılımını haritalamada kullanılabileceğini göstermiştir (Kumar vd., 2024; Santos vd., 2024).

Gelecek Perspektif Araştırma Yönelimleri

Serin iklim tahıllarında karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik teknolojik çözümlerin (mikrobiyom, nanoteknoloji ve İHA tabanlı uygulamalar) başarıya ulaşması, yalnızca saha ölçüğünde elde edilen verimlilik artışlarına değil, aynı zamanda güçlü bir stratejik politika desteğine bağlıdır. Uluslararası düzeyde, özellikle Paris Anlaşması sonrası dönemde, tarım sektörü sera gazı azaltım stratejilerinde merkezi bir alan olarak konumlandırılmıştır (IPCC, 2022). Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı ve Çiftlikten Sofraya Stratejisi, tahıl üretiminde girdi verimliliğini artırmayı ve karbon yoğunluğunu azaltmayı hedefleyen somut düzenlemeler getirmiştir (EC, 2020). Türkiye'de de 2023–2027 Ulusal Tarım Strateji Belgesi, dijital tarım, hassas gübreleme ve iklim dostu üretim uygulamalarını destekleyici politikalar içermektedir (TOB, 2023b).

Mevcut literatür, mikrobiyom, nanoteknoloji ve İHA tabanlı uygulamaların entegrasyonunun henüz erken aşamada olduğunu ve bu alanda disiplinler arası araştırma iş birliklerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Lowry vd., 2019; Wang vd., 2016). Özellikle rizosfer mikrobiyotasının nanoteknoloji destekli biyostimülantlarla birlikte kullanımı ve İHA tabanlı emisyon ölçümleriyle eş zamanlı değerlendirilmesi, gelecek çalışmalar için kritik bir araştırma yönelimi olarak öne çıkmaktadır (Aasen vd., 2018; Santos vd., 2024). Ayrıca, karbon ayak izinin izlenmesi ve azaltılması için geliştirilecek politika araçlarının, saha verileriyle uyumlu karar destek sistemleriyle bütünleştirilmesi gerekmektedir (LaI, 2020b).

Sonuç ve Öneriler

Serin iklim tahıllarında karbon ayak izinin azaltılması, küresel gıda güvenliği ve iklim değişikliği ile mücadele açısından stratejik bir gerekliliktir. Araştırmamızda ele alınan üç temel yaklaşım mikrobiyom temelli biyolojik çözümler, nanoteknoloji tabanlı gübre ve biyostimülantlar ile İHA destekli hassas tarım uygulamaları birlikte değerlendirildiğinde, hem üretim verimliliğini arttırabileceği hem de çevresel baskıları azaltabileceği güçlü bir entegrasyon modeli olduğu literatür tarafından güçlü biçimde desteklenmektedir.

Mikrobiyom uygulamaları, özellikle rizosferdeki mikroorganizmaların azot döngüsündeki rolleri sayesinde gübre kullanım verimliliğini artırarak N_2O emisyonlarını sınırlandırma potansiyeline sahiptir (Butterbach-Bahl vd., 2013). Nanoteknoloji tabanlı gübre ve biyostimülantların kontrollü salım mekanizmaları, besin kayıplarını önlerken düşük dozlarla yüksek verim elde edilmesine olanak tanımaktadır (Lowry vd., 2019; Wang vd., 2016). İHA tabanlı hassas tarım uygulamaları ise, stres teşhisi, değişken doz yönetimi ve emisyonların izlenmesi ile zararlılar açısından karar destek sistemlerini güçlendirmektedir (Aasen vd., 2018; Ellenburg vd., 2021). Ancak bu teknolojilerin etkinliği, yalnızca saha ölçüğünde değil, aynı zamanda ulusal ve uluslararası politikaların yönlendirmesi ile mümkündür. Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'nin 2023–2027 Ulusal Tarım Stratejisi, bu tür yenilikçi uygulamaların yaygınlaşması için politika düzeyinde güçlü çerçeveler sunmaktadır (EC, 2020; TOB, 2023b).

Gelecekteki araştırmaların, mikrobiyom–nanoteknoloji–İHA entegrasyonunu ortak deneme sistemlerinde test etmesi, karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik somut veriler sağlayacağı öngörülmüştür. Ayrıca, emisyon ölçümlerinin doğrudan sahadan toplanarak karar destek sistemlerine entegre edilmesi, tarımsal sera gazı yönetiminde önemli bir dönüm noktası olacağı düşünülmüştür. Disiplinler arası iş birlikleri ve politika desteğiyle güçlendirilmiş bu teknolojiler, serin iklim tahıllarında sürdürülebilir üretim için kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır. İHA teknolojileri yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik stratejilerin de önemli bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, serin iklim tahıllarında karbon ayak izini azaltmaya yönelik stratejiler, yalnızca teknolojik yenilikler değil, aynı zamanda ulusal ve uluslararası düzeyde uyumlu politika çerçeveleri ve disiplinler arası bilimsel iş birlikleri ile desteklenmelidir.

Yazar Katkı Oranları

Yazarlar bu makalenin hazırlanmasına eşit düzeyde katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çıkar çatışması beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir etik kurul onay bilgileri beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Kaynaklar

- Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., & Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing*, 10(7), 1091. <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
- Benmrid, B., Hafidi, M., Allaoui, A., Borden, K. A., & Duponnois, R. (2023). Bioinoculants as a means of increasing crop tolerance to drought and phosphorus deficiency in legume–cereal intercropping systems. *Communications Biology*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05399-5>
- Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2013). Nitrous oxide emissions from soils: How well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130122. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>
- Chang, Y., Wang, Y., Shen, J., Liu, X., Zhang, F. (2025). Domesticated rice alters the rhizosphere microbiome, reducing nitrogen fixation and increasing nitrous oxide emissions. *Nature Communications*, 16(1), 57213. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57213-x>
- Chen, H., & Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: New tools for sustainable development. *Trends in Food Science & Technology*, 22(11), 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.004>
- Dağhan, H. (2017). Nano Gübreler. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 197–203. <https://doi.org/10.19159/tutad.294991>
- Ellenburg, W. L., Mishra, V., Roberts, J. B., Limaye, A. S., Case, J. L., Blankenship, C. B., & Cressman, K. (2021). Detecting desert locust breeding grounds: A satellite-assisted modeling approach. *Remote Sensing*, 13(7), 1276.
- European Commission (EU), (2020). A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Brussels: European Commission. Erişim address https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- Fadiji, A. E., Babalola, O. O., & Santoyo, G. (2021). The potential role of microbial biostimulants in the amelioration of climate change-associated abiotic stresses on crops. *Frontiers in Microbiology*, 12, 829099. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.829099>
- Food and Agriculture Organization (FAO), (2023)a. The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Erişim address <https://openknowledge.fao.org/items/1516eb79-8b43-400e-b3cb-130fd70853b0>
- Food and Agriculture Organization (FAO), (2023b). Crops and environmental indicators. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Erişim address <https://www.fao.org/faostat>
- Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Environmental Science: Nano*, 3(4), 646–659. <https://doi.org/10.1039/C5EN00227B>
- Gracia-Romero, A., Kefauver, S. C., Fernandez-Gallart, E., Vergara-Diaz, O., Nieto-Taladriz, M. T., & Araus, J. L. (2019). UAV and ground image-based phenotyping: A proof of concept in durum wheat under variable conditions. *Remote Sensing*, 11(10), 1244. <https://doi.org/10.3390/rs11101244>
- Ingrisch, J., Karlowsky, S., Hasibeder, R., Gleixner, G., & Bahn, M. (2020). Drought and recovery effects on belowground respiration dynamics and the partitioning of recent carbon in managed and abandoned grassland. *Global Change Biology*, 26(8), 4366–4378.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2022). Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. Erişim address

- <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/2929481A59B59C57C743A79420A2F9FF>
- Khose, S. B., & Mailapalli, D. R. (2024). UAV-based multispectral image analytics and machine learning for predicting crop nitrogen in rice. *Geocarto international*, 39(1), 2373867.
- Kumar, R., Singh, A., & Sharma, P. (2024). UAV-based monitoring of methane and nitrous oxide emissions in agricultural fields. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2), 145. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11873-5>
- Lal, R. (2020a). Managing soils for negative carbon budgets and climate change mitigation. *Soil & Tillage Research*, 204, 104731. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>
- Lal, R. (2020b). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(5), 123A-124A.
- Li, H., Chen, J., Chen, Y., Sun, J., & Li, T. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi reduce N₂O emissions from decomposing crop residues via altered microbial communities. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1224849. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1224849>
- Lowry, G. V., Avellan, A., & Gilbertson, L. M. (2019). Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nature nanotechnology*, 14(6), 517-522.
- Maaz, T. M., Sapkota, T. B., Eagle, A. J., Kantar, M. B., Bruulsema, T. W., & Majumdar, K. (2021). Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. *Global Change Biology*, 27(11), 2343-2360.
- Öztüfekçi, S. (2015). Mikrobiyolojik gübre olarak *Bacillus subtilis*'in buğday bitkisinin verim ve besin elementi alımına etkisi (Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Santos, W. M. D., Martins, L. D. C. D. S., Bezerra, A. C., Souza, L. S. B. D., Jardim, A. M. D. R. F., Silva, M. V. D., Souza, C.A.A.D., & Silva, T. G. F. D. (2024). Use of Unmanned Aerial Vehicles for Monitoring Pastures and Forages in Agricultural Sciences: A Systematic Review. *Drones*, 8(10), 585.
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., ... & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789-813. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>
- Smith, S., & de Smet, I. (2018). Root system architecture: Insights from Arabidopsis and cereal crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1739), 20170264. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0264>
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı (2023a), Türkiye Tarımsal Üretim ve Sera Gazı Emisyon Raporu. Ankara: Tarım ve Orman Bakanlığı Yayınları. Erişim address <https://www.tarimorman.gov.tr/>
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı (2023b). Ulusal Tarım Strateji Belgesi 2023-2027. Ankara: T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. Erişim address <https://www.tarimorman.gov.tr/Duyuru/Ulusal-Tarim-Stratejisi-2023-2027>
- Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl, K., Gütschow, J., Xueyao, P., ... & Sandalow, D. (2021). Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. *Environmental Research Letters*, 16(6), 065007.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), (2023). Greenhouse Gas Emissions Statistics, 1990-2021. Erişim address <https://data.tuik.gov.tr>
- Wang, P., Lombi, E., Zhao, F. J., & Kopittke, P. M. (2016). Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends in plant science*, 21(8), 699-712.
- Wang, W., Luo, X., Ye, X., Chen, Y., Wang, H., Wang, L., ... & Cui, Z. (2020). Predatory Myxococcales are widely distributed in and closely correlated with the bacterial community structure of agricultural land. *Applied Soil Ecology*, 146, 103365.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhang, L., Wang, A., Zhang, H., Zhu, Q., Zhang, H., Sun, W., & Niu, Y. (2024). Estimating leaf chlorophyll content of winter wheat from UAV multispectral images using machine learning algorithms under different species, growth stages, and nitrogen stress conditions. *Agriculture*, 14(7), 1064.