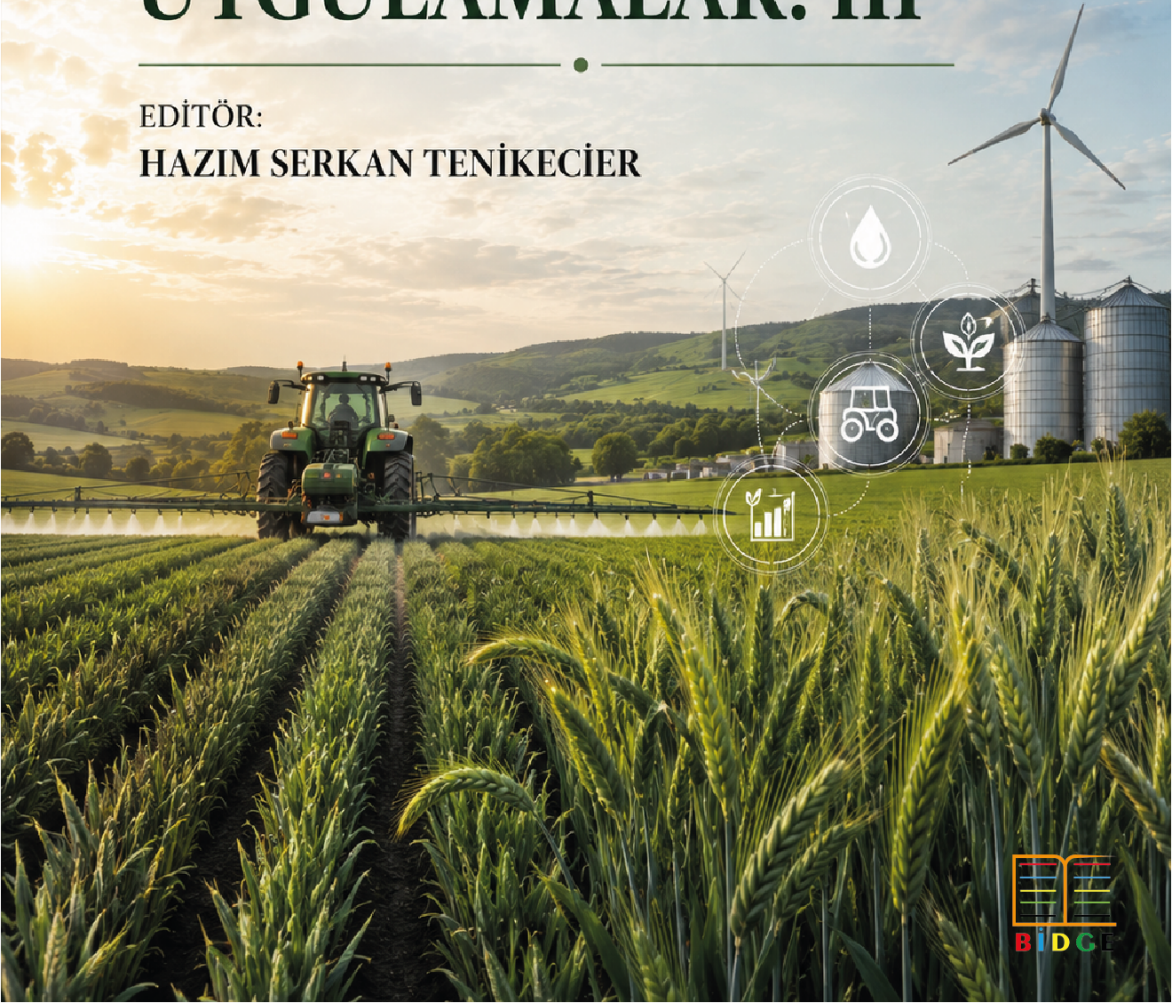




TARLA BİTKİLERİNDE VE DİĞER TARIMSAL KONULARDA SÜRDÜRÜLEBİLİR UYGULAMALAR: III

EDİTÖR:

HAZIM SERKAN TENİKECİER



BİDGE Yayınları

**Tarla Bitkilerinde ve Diğer Tarımsal Konularda Sürdürülebilir
Uygulamalar: III**

Editör: HAZIM SERKAN TENİKECİER

ISBN: 978-625-8989-97-7

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-06-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Tarım sektörü, insanlık tarihinin en eski ve en temel faaliyet alanlarından biri olmasının yanı sıra, günümüzde gıda arzının güvence altına alınması ve doğal kaynakların sürdürülebilir biçimde yönetilmesi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Dünya nüfusundaki hızlı artış, iklim değişikliği ve çevresel baskılar, tarımsal üretim sistemlerinin verimlilik ile sürdürülebilirlik arasında dengeli bir yapıya kavuşturulmasını zorunlu hâle getirmektedir.

Bu kapsamda tarla bitkileri üretimi, yalnızca bitkisel ürün elde etmeyi amaçlayan bir faaliyet olmaktan öte; gıda güvenliği, kırsal kalkınma, ekonomik istikrar ve çevresel koruma hedeflerinin kesişim noktasında yer alan çok yönlü bir üretim alanıdır. Toprak, su, bitki, genetik kaynaklar, mekanizasyon, enerji kullanımı ve ekonomik yönetim gibi birçok unsurun bir arada değerlendirilmesini gerektiren bu alan, sürdürülebilir tarımsal kalkınmanın temel dayanaklarından biridir.

Günümüzde tarımsal üretim; azalan su kaynakları, toprak verimliliğinin düşmesi, biyolojik çeşitlilik kayıpları ve değişen iklim koşulları gibi önemli sorunlarla karşı karşıyadır. Bu nedenle tarla bitkileri alanında faaliyet gösteren araştırmacıların, öğrencilerin, teknik personelin ve üreticilerin; bitki yetiştirme tekniklerinden tohumculuğa, bitki ıslahından ürün muhafazasına, doğal kaynak yönetiminden pazarlama süreçlerine kadar geniş bir bilgi birikimine sahip olmaları gerekmektedir. Disiplinler arası yaklaşımlar ve bilimsel gelişmeler, bu sorunların çözümünde önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

Elinizdeki eser, tarla bitkileri üretimini sürdürülebilirlik perspektifiyle ele alarak güncel bilgi ve uygulamaları bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın; okuyuculara yalnızca teorik bilgi sunmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları birlikte değerlendiren bir bakış açısı kazandırması hedeflenmiştir.

Doç. Dr. HAZIM SERKAN TENİKECİER
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

TARIMSAL ÜRETİMDE NANO-GÜBRELER	1
<i>HATİCE ÇOKKIZGIN, ALİHAN ÇOKKIZGIN</i>	
AYÇİÇEĞİ TARIMINDA AZOT YÖNETİMİ VE SÜRDÜREBİLİRLİK	30
<i>TURGAY BAŞDİNÇ</i>	
CURRENT STATUS AND FUTURE OF SAGE (SALVIA SPP.) CULTIVATION IN TÜRKİYE	74
<i>BELGİN COŞGE ŞENKAL</i>	
MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND ESSENTIAL OIL PROFILE INVESTIGATION OF SALVIA VERTICILLATA L.	88
<i>BELGİN COŞGE ŞENKAL</i>	
KÜRESEL ISINMA VE BUĞDAY TARIMANDA RİSKLER	100
<i>BURHAN KARA</i>	

BÖLÜM 1

TARIMSAL ÜRETİMDE NANO-GÜBRELER

HATİCE ÇOKKIZGIN¹
ALİHAN ÇOKKIZGIN²

1- Giriş

Dünya nüfusunun hızla artması, birim alandan elde edilecek verimin ve ürün kalitesinin optimize edilmesini zorunlu kılarak geleneksel gübreleme stratejilerinin ötesine geçilmesini gerektirmektedir (Dağhan, 2017; Saurabh, ve diğerleri, 2024). Geleneksel gübrelerin düşük kullanım etkinliği ve çevresel kayıplara yol açan yapısı, modern tarımda kaynak kısıtlamalarını derinleştirerek çiftçiler üzerindeki ekonomik yükü artırmaktadır (Raliya, Saharaç, Dimkpa, & Biswas, 2017). Bu noktada, nanoteknoloji tabanlı besin maddesi verilme sistemleri, besinlerin toprakta kontrollü salınımını sağlayarak hem kayıpları azaltmakta hem de geleneksel yöntemlere kıyasla daha uygun maliyetli ve verimli bir çözüm sunmaktadır (Verma, ve diğerleri, 2022; Yadav, Yadav, & Abd–Elsalam, 2023). Özellikle nanokil ve zeolit gibi taşıyıcı yapılar, besin maddelerinin bitki kök sistemlerine daha hızlı

¹Dr.Öğr.Üyesi Gaziantep Üniversitesi, Nurdağı Meslek Yüksekokulu, Nurdağı/Gaziantep/Türkiye hcokkizgin@gantep.edu.tr - 0000-0003-1356-5839

²Prof.Dr. Gaziantep Üniversitesi, Nurdağı Meslek Yüksekokulu, Nurdağı/Gaziantep/Türkiye acokkizgin@gantep.edu.tr - 0000-0001-5066-0531

ve hedefe yönelik ulaşmasını sağlayarak gübreleme kaynaklı ekotoksisiteyi minimize etmektedir (Channab, ve diğerleri, 2024). Ayrıca, bu özelleştirilmiş nano-gübreler, topraktaki besinlerin hareketle ve/veya amonyak uçuculaşması gibi süreçler sonucu kaybını engelleyerek sürdürülebilir tarım uygulamalarına önemli katkılar sağlamaktadır (Mousumi, 2020; Verma, ve diğerleri, 2023).

Diğer yandan, nano-NPK, nano-demir ve hidroksiapatit modifiyeli üre nanopartikülleri gibi farklı formülasyonların buğday, mısır ve patates gibi temel ürünlerde sağladığı %20 ile %55 arasındaki verim artışı, bu teknolojinin tarımsal üretkenlik üzerindeki dönüştürücü potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır (Goyal, ve diğerleri, 2025; Zhang, Zheng, Wang, Li, & Chi, 2024). Ayrıca, bu yenilikçi gübreleme materyalleri, toprağın fizikokimyasal özelliklerini iyileştirerek bitkilerin besin alım mekanizmalarını güçlendirmekte ve mikrobiyal faaliyetler üzerinde olumlu etkiler oluşturmaktadır. Bununla birlikte, makine öğrenimi modellerinin besin döngüsü ve bitki verimliliği süreçlerine entegrasyonu, nano-gübrelerin toprak yapısına ve mikrobiyal çeşitliliğe göre optimize edilerek hedeflenmiş bir şekilde uygulanmasına olanak tanımaktadır (Zhang, ve diğerleri, 2021).

Nano-gübrelerin tarımsal ölçekte yaygınlaştırılması; düzenleyici engellerin aşılması, standart üretim prosedürlerinin geliştirilmesi ve olası toksikolojik etkilerin uzun vadeli izlenmesi gibi zorlukları da beraberinde getirmektedir (Mittal, Kaur, Singh, Yadav, & Ali, 2020). Özellikle nanomateriyallerin üretimi için gereken özelliklerdeki depolama tesislerinin yüksek maliyeti, bu teknolojinin geniş çaplı ticari uygulanabilirliği önünde önemli bir engel teşkil etmektedir (Yadav, Yadav, & Abd-Elsalam, 2023; An, ve diğerleri, 2022).

Nanoteknoloji uygulamalarının geleneksel gübrelere kıyasla daha düşük miktarda girdi gerektirmesi, uzun vadede üretim maliyetlerinin minimize edilmesine ve çevresel risk potansiyelinin azaltılmasına olanak tanımaktadır (Cinisli, Uçar, & Dikbaş, 2019).

Öte yandan, nano-çinko ve nano-kükürt kaplı üre gibi ileri teknoloji ürünü gübrelerin, azot ve kükürt salınımını optimize ederek bitkiler tarafından besin alımını maksimize ettiği bilinmektedir (zatay & Kaya, 2025). Benzer şekilde, üre-hidroksiapatit nanohibritleri azot salınım hızını düşürerek geleneksel gübrelerin yarısı kadar dozajla eşdeğer, hatta daha yüksek etkinlik sergilemektedir (Le, ve diğerleri, 2021). Ayrıca, bu yenilikçi nanohibrit yapıların kullanımı, konvansiyonel gübre uygulamalarında karşılaşılan azot kaybını ve toprak mikrobiyotasındaki olumsuz etkileri önemli ölçüde sınırlandırmaktadır (Bratovi, ve diğerleri, 2023).

Bu çalışmada, nano-gübrelerin tarımsal üretimdeki rolü, geleneksel gübrelerle karşılaştırıldığındaki avantajları, bitki besleme dinamiğindeki etki mekanizmaları ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki olası etkileri bütüncül bir perspektifle ele alınarak mevcut literatürün sistematik bir derlemesi sunulmaktadır. Bu kapsamda, nano-NPK, nano-demir, hidroksiapatit modifiyeli üre nanohibritleri ve nano-zeolit kompozit gübreler gibi farklı formülasyonların fizikokimyasal özellikleri, üretim yöntemleri ve sınıflandırma ilkeleri detaylandırılarak bu ürünlerin temel kültür bitkilerindeki agronomik performansı irdelenmektedir.

Çalışmanın bir diğer amacı, nano-gübre uygulamalarının yavaş ve kontrollü salınım mekanizmaları aracılığıyla besin kullanım etkinliğini nasıl artırdığını, yüzey akışı, süzülme ve buharlaşma kayıplarını ne ölçüde azalttığını ve bu sayede toprak mikrobiyotası ile su ekosistemleri üzerindeki ekolojik ayak izini nasıl minimize ettiğini ortaya koymaktır. Bununla birlikte, nanomateriyallerin doz aşımında sergileyebildiği nano-toksisite, hedef dışı organizmalar üzerindeki potansiyel riskler ve uzun vadeli çevresel birikim sorunları gibi sınırlılıklar da tarafsız bir şekilde tartışılarak sorumlu bir nano-gübre kullanımı için gerekli olan standartlaştırma ve düzenleyici çerçevenin önemi vurgulanmaktadır.

Ayrıca tarım uygulamalarıyla nano-gübrelerin entegrasyonu, maliyet etkin üretim ve gelecekteki araştırma ihtiyaçlarına yönelik

bir yol haritası ortaya konularak çalışmanın disiplinlerarası literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2- Nano-Gübre Kavramı ve Özellikleri

Nano-gübreler, geleneksel gübrelerin aksine, besin maddelerini nanometre boyutlu partiküller (genellikle 1–100 nm aralığında) halinde içeren veya bunlarla kaplayarak bitkilere kontrollü biçimde ulaştıran yenilikçi tarımsal formülasyonlar olarak tanımlanmaktadır (Dağhan, 2017; Yadav, Yadav, & Abd-Elsalam, 2023). Bu yapılar, yüksek spesifik yüzey alanı–hacim oranı, ayarlanabilir yüzey yükü, üstün çözünürlük ve kök ile yaprak por çaplarından daha küçük partikül boyutları gibi fizikokimyasal özellikleri sayesinde bitki dokularına daha etkin nüfuz ederek besin alım verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Channab, ve diğerleri, 2024; Saurabh, ve diğerleri, 2024). Söz konusu fiziksel ve kimyasal üstünlükler, nano-gübrelerin toprak–bitki etkileşiminde yüzey aktif bölgelerinin çoğalmasına, besin–partikül temas süresinin uzamasına ve kontrollü salınım mekanizmalarının daha hassas bir şekilde işletilmesine olanak tanımaktadır (Goyal, ve diğerleri, 2025; Zhang, Zheng, Wang, Li, & Chi, 2024). Nano-gübrelerin üretiminde başlıca üç yöntem kategorisi öne çıkmaktadır: fiziksel yöntemler (yukarıdan aşağıya yaklaşım kapsamında öğütme, buhar biriktirme ve lazer ablasyonu gibi mekanik süreçlerle makro ölçekli materyallerin nano boyuta indirgenmesi), kimyasal yöntemler (aşağıdan yukarıya yaklaşım çerçevesinde sol-jel, kimyasal çöktürme, hidrotermal sentez ve poliol prosesleri gibi atom/molekül düzeyinde kontrollü büyütme teknikleri) ve biyolojik/yeşil sentez yöntemleri (bitki ekstraktları, funguslar, bakteriler ve algler gibi biyolojik ajanların indirgeyici ve stabilize edici rol üstlenmesiyle çevre dostu nanopartikül eldesi) (Alkhader, 2023; Ayenew, Satheesh, Zegeye, & Kassie, 2024). Fiziksel yöntemler düşük saflık ve sınırlı boyut homojenliği gibi dezavantajlar barındırırken, kimyasal sentez yaklaşımları boyut ve şekil üzerinde daha üstün kontrol sunmakta ancak toksik öncül kimyasalların kullanımı

nedeniyle çevresel kaygıları artırmaktadır (Magnabosco, Masi, Shukla, Bansal, & Carletti, 2023). Buna karşın, biyolojik/yeşil sentez stratejileri düşük enerji tüketimi, biyoyumluluk ve yüksek ölçeklenebilirlik gibi avantajlarıyla öne çıkarak nano-gübre üretiminde sürdürülebilir bir alternatif oluşturmaktadır (Zoubi, ve diğerleri, 2023). Üretim yönteminin seçimi, nano-gübrelerin morfolojik yapısını, yüzey fonksiyonelliğini ve dolayısıyla tarla koşullarındaki agronomik performansını doğrudan belirleyen temel bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir (Alkhader, 2023; Kumar, 2021).

3- Nano-Gübre Sınıflandırması

Nano-gübreler, temel içeriklerine ve hedefledikleri işlevlere göre başlıca makro besin bazlı, mikro besin bazlı, karbon bazlı ve polimer kaplı, organik, kontrollü salınımlı, kompozit ve nano-geliştirilmiş formülasyonlar olmak üzere farklı kategorilerde sınıflandırılmaktadır (Alkhader, 2023; Avşar, 2022).

Bu sınıflandırmanın ilk grubunu oluşturan makro besin elementi içeren nano-gübreler, bitkilerin yüksek miktarlarda gereksinim duyduğu azot (N), fosfor (P), potasyum (K), magnezyum (Mg), kükürt (S) ve kalsiyum gibi birincil elementlerin nanometre boyutlu partiküller halinde ya da nanotaşıyıcı yapılar içerisinde kontrollü biçimde bitkiye ulaştırılmasını amaçlamaktadır (Madanayake, Hossain, & Adassooriya, 2021; Omara, ve diğerleri, 2019). Azot temelli nano-gübreler kapsamında, üre-hidroksiapatit nanohibritleri, nanoporöz zeolit-üre kompozitleri ve nano-NPK formülasyonları, klasik ürenin salınım süresini birkaç günden 48 güne kadar uzatarak azot kullanım etkinliğini belirgin biçimde artırmakta; özellikle kitosan ya da sepiolit gibi biyopolimerlerle kaplanmış kaplama-üre nanohibritleri, salınımı 25 güne kadar yayarak buharlaşma ve yıkanma kayıplarını minimize etmektedir (Khan, ve diğerleri, 2021; Mohammadi, Shariatmadari, Khademi, & Bazarganipour, 2019). Fosfor temelli nano-gübreler, özellikle nano-hidroksiapatit (nHAP) formülasyonları, topraktaki fosfor

mobilizasyonunu artırarak bitki kökleri tarafından alınabilirliği yükseltmekte ve geleneksel triple süperfosfata kıyasla daha düşük dozlarda eşdeğer ya da daha yüksek agronomik performans sergileyebilmektedir (Goyal, ve diğerleri, 2025; Le, ve diğerleri, 2021). Potasyum bazlı nano-gübreler ise nano-zeolit taşıyıcılara yüklenmiş K formülasyonları sayesinde toprağın potasyum dengesini uzun süre koruyarak bitkilerin kritik büyüme dönemlerinde yeterli K alımını garanti altına almakta ve aynı zamanda toprak yapısını da olumlu yönde iyileştirmektedir (An, ve diğerleri, 2022; Khan, ve diğerleri, 2021).

İkinci önemli kategoriye oluşturan mikro besin elementi içeren nano-gübreler ise bitkilerin iz düzeyinde ihtiyaç duyduğu ancak metabolik süreçlerin sürdürülebilmesi için hayati önem taşıyan çinko, demir, bakır, mangan, bor (B) ve molibden gibi iz elementleri nano ölçekli formülasyonlar halinde bitkiye sunmaktadır (Alkhader, 2023; Avşar, 2022). Konvansiyonel tarım uygulamalarında bu elementler genellikle NPK gübrelerine düşük dozlarda eklenen suda çözünür tuzlar şeklinde uygulanmakta ve önemli bir bölümü toprak kolloidleri tarafından immobilize edilerek bitki alımına sunulamamaktadır; nano-gübreler ise yüksek spesifik yüzey alanları ve küçük partikül boyutları sayesinde bu iz elementlerin bitki dokularına daha etkin bir şekilde taşınmasını mümkün kılmaktadır (Avşar, 2022; Omara, ve diğerleri, 2019). Nano-ZnO, nano-Fe₂O₃ ve nano-CuO gibi metal oksit nanopartiküllerin yaprak ya da toprak uygulamaları yoluyla bitkilere kazandırılması, klorofil sentezi, fotosentetik aktivite ve pek çok enzim fonksiyonunda kritik rol oynayan bu elementlerin eksikliklerini gidermede geleneksel sülfat tuzlarına kıyasla çok daha düşük dozajlarda başarılı sonuçlar vermektedir (Le, ve diğerleri, 2021; Saurabh, ve diğerleri, 2024).

Karbon bazlı ve polimer kaplı nano-gübreler kategorisi ise karbon nanotüpler, grafen oksit, fullerenler ve nano-karbon gibi karbon allotropları ile kitosan, selüloz, aljinat, sepiolit ve üre-

formaldehit gibi doğal ya da sentetik polimerik kaplama malzemelerinin tarımsal amaçlı taşıyıcı veya salınım düzenleyici olarak kullanılmasıyla geliştirilmiş yenilikçi formülasyonları kapsamaktadır (Jiang, ve diğerleri, 2021; Mohammadi, Shariatmadari, Khademi, & Bazarganipour, 2019; Safdar, ve diğerleri, 2022). Karbon nanotüpler, bitki hücre duvarlarını aşma kapasiteleri ve geniş yüzey alanları sayesinde hem yavaş salınımlı bir gübre platformu hem de bitki gelişim düzenleyicisi işlevi üstlenmekte; nano-karbon ise amonyaktan azot adsorbe ederek bitkilerin N, P ve K alımını artırmakta ve yavaş salınımlı gübrelerde kaplama materyali olarak yüzey akışı ve süzülme kaynaklı su kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (An, ve diğerleri, 2022; Safdar, ve diğerleri, 2022). Polimer kaplı nano-gübreler tarafında ise kitosan-sepiolit nanokompozitleri, kitosan-zeolit karışımları ve aljinat bazlı kaplama sistemleri, nanopartiküllerin yüzeyinde kontrollü difüzyon bariyerleri oluşturarak besin maddelerinin bitkinin talep ettiği fenolojik döneme uygun bir hızda salınmasını sağlamak ve bu sayede yıkanma, buharlaşma ve yüzey akışı kayıplarını minimize ederek besin kullanım etkinliğini önemli ölçüde yükseltmektedir (Haydar, Ghosh, & Roy, 2024; Mohammadi, Shariatmadari, Khademi, & Bazarganipour, 2019).

4- Etki Mekanizmaları ve Bitki Besleme Dinamikleri

Bu nüfuz sürecinde nanopartiküller yaprak yüzeyinde öncelikle mumsu kütikula tabakasıyla karşılaşmakta; geometrik çapı yaklaşık 4,8 nm'den küçük hidrofilik partiküller kütikulanın hidrofilik kanallarından, lipofilik partiküller ise lipofilik kanallar aracılığıyla difüze olurken daha büyük boyutlu ($\approx 4-100$ nm) partiküller stomalar, trikomlar ve hidatodlar gibi alternatif giriş noktalarından bitki iç dokularına ulaşmakta ve ardından sümplastik ile apoplastik yollar boyunca ilerleyerek ksilem aracılığıyla köklerden sürgün ve yapraklara taşınabilmektedir (Mittal, Kaur, Singh, Yadav, & Ali, 2020; Sanzari, Leone, & Ambrosone, 2019; Singh, ve diğerleri, 2024). Kök tarafında ise nanopartiküller kök

tüyleri ve uç meristemlerindeki mikropörlerden geçerek kök korteksine nüfuz etmekte, hücreler arası 50–60 nm çapındaki plazmodezmata kanalları ile hücreden hücreye aktif translokasyon gerçekleştirilmekte ve bu süreçte kök eksudatları (organik asitler, sideroforlar) nanopartiküllerin çözünme ve dönüşüm kinetiğini modüle ederek alım verimliliğini artırmaktadır (Lowry, ve diğerleri, 2024; Mirza, 2019). Yavaş ve kontrollü salınım sistemleri açısından değerlendirildiğinde, nano-gübrelerde besin elementleri nanotaşıyıcılar içinde enkapsüle edilmekte, polimerik ya da ince film kaplamalarla çevrelenmekte ve pH, sıcaklık, nem veya mikrobiyal aktivite gibi çevresel uyaranlara duyarlı olarak bitkinin fenolojik talebine uyumlu bir sigmoidal salınım profili sergilemekte; bu sistemlerde suyun kütikula/kaplama içine nüfuz etmesi, granül içinde katı gübrenin kısmi çözünmesi ve osmotik basınç artışına bağlı olarak lineer difüzyon ya da yapısal bozunma (parçalanma) mekanizmalarıyla kontrol edilemeyen ani salınımın önüne geçilmektedir (Ehis-Eriakha, Chikere, & Onyewuchi, 2021; Haydar, Ghosh, & Roy, 2024; Jampilek & Král'ová, 2015; Shaviv, Raban, & Zaidel, 2003). Tüm bu mekanizmalar bir arada değerlendirildiğinde, nano-gübrelerin besin kullanım etkinliğini geleneksel gübrelere kıyasla %30'a kadar artırması; bitkinin talep ettiği zamanda ve bölgede hassas salınım yapılması, yıkanma ve buharlaşma kayıplarının minimize edilmesi, plazmodezmata boyutlu nanopartiküllerle hücre içi taşıma kapasitesinin yükseltilmesi ve fotosentez ile enzim aktivitesi gibi metabolik süreçlerin doğrudan hızlandırılması gibi çok yönlü etmenlerin birleşik katkısıyla açıklanmaktadır (Jayara, ve diğerleri, 2023; Mittal, Kaur, Singh, Yadav, & Ali, 2020; Saurabh, ve diğerleri, 2024).

5- Geleneksel Gübreler ile Nano-Gübrelerin Karşılaştırılması

Geleneksel gübreler, toprağa uygulandıklarında hızlı çözünme ve kimyasal bozunma nedeniyle besin elementlerinin büyük bir kısmının bitki tarafından alınamadan yıkanma veya gaz haline geçme, yoluyla kaybedilmesine yol açarken, nano-gübreler

spesifik yüzey özelliklerini kullanarak çevresel kayıpları minimize eder. Dozaj açısından değerlendirildiğinde geleneksel NPK uygulamalarında hektarda 100–200 kg N sağlanması gerekirken nano-üre formülasyonları 4 mL/L'lik sprey konsantrasyonuyla ve geleneksel dozun yaklaşık %50'si oranında tamamlayıcı bir program ile eşdeğer beslenme etkisi oluşturabilmekte; çok sayıda saha denemesinde geleneksel dozun yarısıyla birlikte uygulanan iki nano-üre spreyinin buğday, mısır ve darı verimini istatistiksel olarak %7–8 düzeyinde artırdığı rapor edilmiştir (Dabhi, Patel, Vihol, Patel, & Patel, 2025; Kumar, 2021). Uygulama yöntemleri yönünden nano-gübreler başlıca yapraktan sprey, topraktan uygulamalar ve tohum kaplama/nano-priming stratejileriyle bitkiye kazandırılabilen; yapraktan uygulama yaprak yüzeyindeki stomalar, hidatodlar ve 50–60 nm çapındaki plazmodezmata kanalları aracılığıyla doğrudan simplastik ve apoplastik yollara geçişi mümkün kıldığı için en hızlı ve en yüksek biyoyararlanım gösteren alım yolu olarak öne çıkmakta, topraktan uygulamada ise nano-hidroksiapatit, nano-zeolit ve polimer kaplı formülasyonlar rizosferde yavaş salınım göstererek besin elementlerinin geleneksel triple süperfosfat ve üreye kıyasla daha uzun süre bitkiye yarayışlı kalmasını sağlamakta ve soya fasulyesinde biyokütle ile tohum verimini sırasıyla %17 ve %23 oranında artırdığı bildirilmektedir (Liu & Lal, 2014; Nile, ve diğerleri, 2022; Verma, ve diğerleri, 2022). Tohum nano-priming yönteminde ise tohumlar metal oksit veya karbon bazlı nanopartikül süspansiyonlarıyla ön-işleme tabi tutularak çimlenme oranı, fide vigoru ve erken dönem kök-sürgün gelişimi güçlendirilmekte; demir nanopartikülleriyle karpuzda, çinko oksit temelli formülasyonlarla arpada, nano-pyrit kaplamayla pirinçte ve nano-ZnO ile nohutta verim ve kalite parametrelerinde anlamlı iyileşmeler elde edilmektedir (Acharya, Jayaprakasha, Crosby, Jifon, & Patil, 2020; Nile, ve diğerleri, 2022; Shelar, ve diğerleri, 2023). Verim ve ürün kalitesi perspektifinden değerlendirildiğinde, nano-gübre uygulamalarının buğdayda %20–55, patatesten %20–35, mısırdan

%20–40 ve pirinçte %13–25 oranlarında tane verimi artışı sağladığı, yaprakтан spray ve nano-üre kombinasyonlarının %75 RDN koşullarında 5,86 t/ha tane verimi ve 8,19 t/ha saman verimi gibi konvansiyonel gübre performansına eşdeğer sonuçlar ürettiği ve arpa, nohut gibi türlerde klorofil içeriği, başak uzunluğu, tane sayısı ve hasat indeksi gibi bileşen verim parametrelerini önemli ölçüde yükselttiği belirlenmiştir (Janmohammadi, AMANZADEH, Sabaghnia, & Dashti, 2016; Priyanshi, ve diğerleri, 2025; Upadhyay, ve diğerleri, 2023). Ürün kalitesi açısından ise nano-ZnO ve nano-Fe₂O₃ yaprak uygulamalarının nohut tanelerinde Zn içeriğini 42,29 mg/kg'a ve Fe içeriğini 86,51 mg/kg'a çıkararak biyolojik zenginleştirme sağladığı, nano-üre önlemiyle buğdayda protein oranının %11,44'e, gluten içeriğinin %27,43'e ve hektolitre ağırlığının 83,30 kg/hL'ye yükseldiği ve yaprak kalitesi ile antioksidan enzim aktivitesi, toplam fenolik madde birikimi ve sekonder metabolit üretimi gibi kalite parametrelerinde geleneksel gübre uygulamalarına kıyasla anlamlı iyileşmeler elde edildiği çok sayıda denemede ortaya konulmuştur (Dabhi, Patel, Vihol, Patel, & Patel, 2025; Dhaliwal, ve diğerleri, 2021; Kekeli, Wang, & Rui, 2025).

6- Çevresel Boyut ve Sürdürülebilirlik

Nanoteknolojik gübreler, geleneksel gübreleme yöntemlerinde yaygın olarak gözlenen yıkanma, buharlaşma ve yüzey akışı kayıplarını nanotaşıyıcıların spesifik yüzey özellikleri, yavaş-kontrollü salınım profilleri ve çevresel uyaranlara duyarlı polimerik kaplamalar aracılığıyla minimize ederek sürdürülebilir tarım uygulamalarına çok yönlü katkı sağlamaktadır. Konvansiyonel üre uygulamalarının toplam azot kayıplarının yaklaşık %30–50'sinin nitrat formunda yıkanma, %10–30'unun denitrifikasyonla N₂ olarak gazlaşma ve %2–30'unun amonyak buharlaşması yoluyla gerçekleştiği dikkate alındığında, nano-üre formülasyonlarının amonyak volatilizasyonunu %40–60, nitröz oksit emisyonlarını %30–50 ve nitrat yıkanmasını %50–70 oranında azaltarak azot

kullanım etkinliğini geleneksel ürenin %30–40 düzeyinden %60–80'e çıkardığı raporlanmıştır (An, ve diğerleri, 2022; Ghule, Rawat, Johar, Raut, & Jadhav, 2025). Potasyum nitrat yüklü nano-niyozomlar, yedi haftalık marul yetiştiriciliğinde konvansiyonel gübreye kıyasla nitrat yıkanmasını %32 azaltırken, nanozeolit ve polimer kaplı kompozitler de nitrat salınımını 8 güne karşılık 45 günün üzerine uzatarak yeraltı suyu ötrofikasyonu riskini belirgin biçimde düşürmektedir (Hafshejani, Barani, Rahdar, & Tishehzan, 2026; Kumar, 2021; Rojas-Velázquez, ve diğerleri, 2023). Öte yandan nano-gübre uygulamalarının toprak florası ve mikrobiyolojisi üzerindeki etkileri nanopartikül türüne, dozuna, kaplama bileşimine ve toprak mikrobiyomunun yapısına göre karmaşık ve çift yönlü bir tablo ortaya koymaktadır; metal oksit ve gümüş nanopartikülleri, doğaya bağlı doza bağımlı biçimde azot fiksasyonu yapan *Azotobacter chroococcum*, *Sinorhizobium meliloti*, *Bradyrhizobium* ve *Rhizobiales* üyeleri ile metan oksidasyonu gerçekleştiren *Methylobacteriaceae* gibi işlevsel bakteri taksonlarının göreceli bolluğunu azaltırken, üreaz ve denitrifikasyon enzim aktivitelerini baskılayarak azot döngüsünü doğrudan sekteye uğratabilmekte ve toplam mikrobiyal biyokütle ile çeşitlilik indekslerinde ölçülebilir düşüslere yol açabilmektedir (Ahmed, ve diğerleri, 2020; Ameén, Alsamhary, Alabdullatif, & AlNadhari, 2021; Ge, Schimel, & Holden, Evidence for Negative Effects of TiO₂ and ZnO Nanoparticles on Soil Bacterial Communities, 2011; Ge, Schimel, & Holden, Identification of Soil Bacteria Susceptible to TiO₂ and ZnO Nanoparticles, 2012; Khan, ve diğerleri, 2021; Shelar, ve diğerleri, 2023). Buna karşılık düşük dozlarda uygulanan CuO, TiO₂ ve FeO bazlı nanopartiküllerin *Sphingomonadaceae* ve *Streptomyetaceae* gibi ayrışmaya dirençli organik kirleticileri parçalayan taksonları artırarak mikrobiyal komüniteyi yeniden şekillendirebildiği, CuO nanopartiküllerinin kök eksudatlarıyla etkileşime girerek rizosferde mineralizasyon ve demir metabolizması yollarını uyarabildiği ve düşük

konsantrasyonlardaki nano-gümüş uygulamalarının bazı bitki patojenlerini baskılayarak dolaylı bir hormonal stimülasyon etkisi oluşturduğu, kontrollü küçük ölçekli yapay ekosistemler ve sera denemelerinde belirlenmiştir (Dimkpa, 2014; Ge, Schimel, & Holden, Evidence for Negative Effects of TiO₂ and ZnO Nanoparticles on Soil Bacterial Communities, 2011; Guan, ve diğerleri, 2020; Sillen, ve diğerleri, 2020). Bu veriler bir arada değerlendirildiğinde, nano-gübrelerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki nihai etkisinin yalnızca yıkanma, buharlaşma ve yüzey akışı kayıplarının kontrolüyle değil, aynı zamanda nanopartikül tipi, kristal yapı, yüzey fonksiyonelleştirme, antagonist veya sinerjistik mikrobiyal etkileşimler ile uzun vadeli toprak birikim dinamiğinin birlikte ele alınmasıyla daha doğru biçimde değerlendirilebileceği ve bu nedenle sorumlu bir uygulama için doz-optimizasyonu, sera kontrollü aşamadan çok yıllık saha denemelerine geçiş ve toprak metagenomik izleme stratejilerinin entegre biçimde yürütülmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Guan, ve diğerleri, 2020; Khan, ve diğerleri, 2021; Parada, ve diğerleri, 2018; Shelar, ve diğerleri, 2023).

7- Sınırlılıklar ve Olası Riskler (Toksosite)

Nanomateriyallerin tarımsal sistemlere entegrasyonu, ekotoksikolojik risklerin yanı sıra toprak biyokimyasal döngülerindeki potansiyel aksamalar ve gıda zincirine olası transferleri nedeniyle kapsamlı bir güvenlik değerlendirmesini zorunlu kılmaktadır. Öncelikle, nano-gübre formülasyonlarının tavsiye edilen eşik dozların üzerinde uygulanması durumunda bitki hücrelerinde reaktif oksijen türlerinin aşırı üretimi, membran lipid peroksidasyonu, fotosistem II inhibisyonu, klorofil biyosentez genlerinin baskılanması ve DNA baz/şeker lezyonları ile geri dönüşümsüz genotoksik hasara yol açtığı; Ag, ZnO, CuO, NiO ve TiO₂ nanopartiküllerinin bu mekanizmalar aracılığıyla kloroplast ve mitokondri elektron taşıma zincirini bozarak oksidatif patlamaları tetiklediği, malondialdehit birikimini ve iyon sızıntısını

konsantrasyona bağımlı biçimde artırarak yüksek dozlarda fide büyümesini, kök uzamasını ve klorofil içeriğini azalttığı çok sayıda kontrollü çalışmada gösterilmiştir (Ahmed, ve diğerleri, 2017; López-Moreno, ve diğerleri, 2010; Marslin, Sheeba, & Franklin, 2017; Panda, ve diğerleri, 2017; Rastogi, ve diğerleri, 2017; Singh, ve diğerleri, 2023; Venkidasamy, Nayeem, Kuppuraj, Thiruvengadam, & Ramalingam, 2018). Konsantrasyona duyarlılığın bitki türüne, partikül boyutuna, kristal yapıya ve yüzey kaplamasına göre belirgin biçimde farklılaştığı; örneğin kübik CeO₂ nanopartiküllerinin (7 nm) daha büyük hegzagonal ZnO nanopartiküllerine (8 nm) kıyasla genetik stabiliteyi daha güçlü biçimde bozduğu, TiO₂ nanopartiküllerinin Allium cepa kök uçlarında komet analizi ve DNA merdivenleme tekniği ile doğrulanmış konsantrasyona bağımlı kromozomal aberasyonlar ve interfaz mikronükleus oluşumuna neden olduğu ve pişmiş toprakta olduğu kadar hidroponik sistemlerde de uygulanan farklı dozların ekotoksikolojik sonuçları büyük ölçüde değiştirebildiği raporlanmıştır (Gao, Chang, Wang, Zhang, & Wang, 2023; Rico, Majumdar, Duarte-Gardea, Peralta-Videa, & Gardea-Torresdey, 2011). İkincisi, tarımsal ekosisteme giren metal-bazlı nanopartiküllerin düşük biyobozunurlukları ve uzun süreli persistansları nedeniyle toprak katı fazında ve üst horizonlarda birikerek arıtma çamuru uygulamaları ve agro-kimyasal püskürtmeler yoluyla nano-fabrikasyon atıklarıyla birlikte çamur uygulanan topraklarda 2,3 µg/kg'a kadar AgNP ve 61 mg/kg'a kadar TiO₂NP derişimlerine ulaşabildiği; ABD EPA TNSSS envanterinden alınan kanalizasyon çamuru ürünlerinin taramalı elektron mikroskobu ve (taramalı) geçirimli elektron mikroskobu analizlerinde 40–300 nm boyutlarında rutil kristal yapısında TiO₂ nano- ve büyük partiküllerinin tekrar tekrar tanımlandığı, yüzey topraklarında Ag nanopartikülü içeren biyosolid uygulanan mezokozmlarda TiO₂ nanopartikül agregatlarının yüzeylerinde Ag elementiyle birlikte saptanarak TiO₂ nanopartiküllerinin toksik iz

metaller için bir taşıyıcı veya çekirdek işlevi görebildiği bildirilmiştir (Colman, ve diğerleri, 2013; Kim, Murayama, Colman, & Hochella, 2012; Larue, ve diğerleri, 2018; McKee & Filser, 2016; Wu, Sun, Bosker, Vijver, & Peijnenburg, 2023). Bu birikimin bitki köklerinden floem ve ksilem yoluyla yaprak, meyve ve tohum gibi yenilebilir dokulara taşınarak Zn, Cd, Ag, Ce ve Au elemental yükünü artırdığı, cucurbit türlerinin AgNP'lere tanksiyonel partiküllerden 4,7 kat daha yüksek Ag içeriğiyle yanıt verdiği ve beş farklı bitki türünün de Slurry+AgNP₃ uygulamasında kontrol ve sadece Slurry'ye kıyasla istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha yüksek dokusal Ag biriktirdiği kontrollü sera ve tarla denemelerinde kanıtlanmıştır (Colman, ve diğerleri, 2013; Stampoulis, Sinha, & White, 2009). Ayrıca toprak solucanı, salyangoz, balık ve diğer trofik organizmalarda biyokonsantrasyon ve biomagnifikasyon benzeri transfer dinamikleriyle insan diyet maruziyetini doğrudan şekillendirebildiği; 5–15 nm çaplı altın nanopartiküllerinin tütünden tütün boynuzlu kurduna birincil üreticiden birincil tüketiciye ortalama 6,2–11,6 biomagnifikasyon faktörleriyle transfer olduğu, nano-CeO₂ uygulanan yaprakları tüketen cırcır böceklerinde kontrole kıyasla iki kattan fazla Ce birikimi saptandığı ve bu böcekleri yiyen kurt örümceklerinde yalnızca nanopartikül formunda ölçülebilir Ce (5,49 ng/g) tespit edilirken eşdeğer kütle partikül uygulamalarında ölçülebilir düzeyin altında kaldığı çok sayıda besin ağı modelleme çalışmasında ortaya konulmuştur (Hawthorne, ve diğerleri, 2014; Judy, Unrine, & Bertsch, 2010; Majumdar, ve diğerleri, 2015). Elde edilen tüm bu veriler, nano-gübrelerin fitotoksik eşik değerlerinin, toprak birikim dinamiklerinin ve gıda zinciri boyunca trofik transfer faktörlerinin henüz yeterince standartlaştırılmamış olduğunu, bu nedenle sorumlu bir uygulama için nanopartikül tipi, boyut, yüzey fonksiyonelleştirme ve çok yıllık saha koşullarını birlikte ele alan entegre risk değerlendirme protokollerinin geliştirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır (McKee & Filser, 2016; Rico, Majumdar,

Duarte-Gardea, Peralta-Videa, & Gardea-Torresdey, 2011; Wu, Sun, Bosker, Vijver, & Peijnenburg, 2023).

8- Sonuç ve Öneriler

Nanoteknoloji temelli tarımsal uygulamaların kontrollü salınımlı nano-gübreler, hedefe yönelik nano-pestisitler ve nanotabanlı biyosensörler aracılığıyla besin kullanım etkinliğini artırma, abiyotik stres toleransını yükseltme ve hastalık yönetimini iyileştirme gibi önemli potansiyeller taşıdığını, ancak söz konusu potansiyelin çevresel güvenlik ve insan sağlığı üzerindeki belirsizliklerin giderilmesine yönelik bütüncül bir araştırma yaklaşımıyla desteklenmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Öncelikli olarak nano-gübre ve nano-pestisit formülasyonlarının agronomik performansı, kalıntı dinamiği ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin kısa süreli sera denemeleriyle sınırlı kalmayıp çok yıllık, çok lokasyonlu ve farklı toprak tekstürleri ile iklim senaryolarını kapsayan büyük ölçekli saha denemelerine taşınması ve agronomik etkinlik ile ekotoksikolojik risklerin eş zamanlı olarak izlenmesi gelecek araştırma programlarının temel önceliği olarak benimsenmelidir. Yeşil kimya ilkeleriyle sentezlenen, mikroorganizma, bitki özütü veya agro-endüstriyel biyokütle kaynaklı biyo-ilhamlı yollarla üretilen ve biyolojik olarak parçalanabilir polimerik kaplamalarla çevrelenen güvenli tasarım nanoformülasyonlarının geliştirilmesi, nanopartiküllerin topraktaki kalıcılığını en aza indirmesi, hedef dışı organizmalara ve rizosfer mikrobiyomuna yönelik riskleri azaltması ve biyolojik birikim dinamiklerini sınırlandırması bakımından sürdürülebilir tarım hedefleriyle uyumlu stratejik bir araştırma yönelimi olarak değerlendirilmelidir.

Metagenomik, metatranskriptomik ve yüksek çözünürlüklü kültürden-bağımsız moleküler yaklaşımların, nano-materyal maruziyeti altındaki topraklarda azot fiksasyonu, nitrifikasyon/denitrifikasyon, karbon mineralizasyonu ve fosfor çevrimi gibi kritik biyokimyasal süreçlerin fonksiyonel gen

dinamiklerinin ve mikrobiyal komünite kırılganlığının uzun vadeli olarak izlenmesinde etkin araçlar olarak kullanılması, sera koşullarında elde edilen bulguların gerçek ekosistem koşullarına ne ölçüde taşınabileceği ve hangi konsantrasyon aralıklarının gerçekçi risk eşikleri olarak benimsenmesi gerektiğinin disiplinlerarası bir çerçevede sorgulanması önerilmektedir.

Son olarak, ulusal ve uluslararası düzenleyici kurumların nano-pestisitleri ve nano-gübreleri kapsayacak biçimde güncellenen yasal çerçeveler oluşturması, nano-spesifik güvenlik eşik değerleri ve sorumluluk zincirlerinin açık biçimde tanımlanması, ticarileşme öncesinde saha düzeyinde uzun süreli çevresel izleme programlarının zorunlu kılınması ve paydaşlar ile toplum temsilcilerinin karar süreçlerine aktif katılımının sağlanması, bu teknolojinin sorumlu biçimde pazara entegrasyonu ve toplumsal meşruiyetinin güvence altına alınması için atılması gereken en temel adımları oluşturacaktır. Böylece çevresel sürdürülebilirlik, gıda güvenliği ve teknolojik yenilik arasındaki dengenin sağlanması, nano-tarım uygulamalarının uzun vadeli başarısının ve toplumsal kabulünün de teminatı olacaktır.

Kaynakça

Acharya, P., Jayaprakasha, G. K., Crosby, K. M., Jifon, J. L., & Patil, B. S. (2020). Nanoparticle-Mediated Seed Priming Improves Germination, Growth, Yield, and Quality of Watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, 10(1), s. 5037-5037. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61696-7>

Ahmed, B., Ameén, F., Rizvi, A., Ali, K., Sonbol, H., Zaidi, A., . . . Musarrat, J. (2020). Destruction of Cell Topography, Morphology, Membrane, Inhibition of Respiration, Biofilm Formation, and Bioactive Molecule Production by Nanoparticles of Ag, ZnO, CuO, TiO₂, and Al₂O₃ toward Beneficial Soil Bacteria. *ACS Omega*, 5(14), s. 7861-7876. doi:<https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04084>

Ahmed, B., Dwivedi, S., Abdin, M. Z., Azam, A., Al-Shaeri, M., Khan, R. A., . . . Musarrat, J. (2017). Mitochondrial and Chromosomal Damage Induced by Oxidative Stress in Zn²⁺ Ions, ZnO-Bulk and ZnO-NPs treated *Allium cepa* roots. *Scientific Reports*, 7(1), s. 40685-40685. doi:<https://doi.org/10.1038/srep40685>

Alkhader, A. (2023). Nanofertilizers as an alternative to inorganic fertilizers: A review. *African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development*, 23(122), s. 23956-23974. doi:<https://doi.org/10.18697/ajfand.122.23145>

Ameén, F., Alsamhary, K., Alabdullatif, J. A., & AlNadhari, S. (2021). A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213, s. 112027-112027. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112027>

An, C., Sun, C., Li, N., Huang, B., Jiang, J., Shen, Y., . . . Wang, Y. (2022). Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), s. 11-11. doi:<https://doi.org/10.1186/s12951-021-01214-7>

Avşar, C. (2022). A Novel Assessment Strategy for Nanotechnology in Agriculture: Evaluation of Nanohydroxyapatite as an Alternative Phosphorus Fertiliser. *Kem. Ind*, 71(5-6), s. 5-6. doi:<https://doi.org/10.15255/kui.2021.057>

Ayenew, B. M., Satheesh, N., Zegeye, Z. B., & Kassie, D. A. (2024). A review on the production of nanofertilizers and its application in agriculture. *PubMed Central*, 11(1), s. 1-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41243>

Bratovčić, A., Hikal, W. M., Mehdizadeh, M., Ahl, H. A., Omidi, A., Adetunji, C. O., . . . Bera, A. (2023). Application of Nanotechnology in Agroecosystems: Nanoparticles for Improving Agricultural Production. *Reviews in Agricultural Science*, 11(0), s. 291-309. doi:https://doi.org/10.7831/ras.11.0_291

Channab, B., Idrissi, A. E., Ammar, A., Dardari, O., Marrane, S. E., Gharrak, A. e., . . . Zahouily, M. (2024). Recent advances in nano-fertilizers: synthesis, crop yield impact, and economic analysis. *Nanoscale*, 16(9), s. 4484-4513. doi:<https://doi.org/10.1039/d3nr05012b>

Cinisli, K. T., Uçar, S., & Dikbaş, N. (2019). Nanomateriyallerin Tarımda Kullanımı. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 29(4), s. 817-831. doi:<https://doi.org/10.29133/yyutbd.595658>

Colman, B. P., Arnaout, C. L., Anciaux, S., Gunsch, C. K., Hochella, M. F., Kim, B., . . . Bernhardt, E. S. (2013). Low Concentrations of Silver Nanoparticles in Biosolids Cause Adverse

Ecosystem Responses under Realistic Field Scenario. *PLoS ONE*, 8(2). doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057189>

Dabhi, M. S., Patel, A., Vihol, K. J., Patel, V. S., & Patel, M. (2025). Effect of nano urea on increasing nitrogen use efficiency and productivity of wheat under irrigated condition. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 9(1), s. 874-877. doi:<https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i1sk.3623>

Dağhan, H. (2017). Nano Gübreler. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 4(2), s. 197-203. doi:<https://doi.org/10.19159/tutad.294991>

Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Verma, V., Behera, S. K., Singh, P., . . . Hossain, A. (2021). Comparative Efficiency of Mineral, Chelated and Nano Forms of Zinc and Iron for Improvement of Zinc and Iron in Chickpea (*Cicer arietinum* L.) through Biofortification. *Agronomy*, 11(12), s. 2436-2436. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy11122436>

Dimkpa, C. O. (2014). Can nanotechnology deliver the promised benefits without negatively impacting soil microbial life? *Journal of Basic Microbiology*, 54(9), 889–904. doi:<https://doi.org/10.1002/jobm.201400298>

Ehis-Eriakha, C. B., Chikere, C. B., & Onyewuchi, A. (2021). Sustained nutrient delivery system: A new perspective in bioremediation. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 12(4), s. 173-182. doi:<https://doi.org/10.5897/jssem2015.0526>

Gao, M., Chang, J., Wang, Z., Zhang, H., & Wang, T. (2023). Advances in transport and toxicity of nanoparticles in plants. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(1), s. 75-75. doi:<https://doi.org/10.1186/s12951-023-01830-5>

Ge, Y., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2011). Evidence for Negative Effects of TiO₂ and ZnO Nanoparticles on Soil Bacterial Communities. *Environmental Science & Technology*, 45(4), s. 1659-1664. doi:<https://doi.org/10.1021/es103040t>

Ge, Y., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2012). Identification of Soil Bacteria Susceptible to TiO₂ and ZnO Nanoparticles. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(18), s. 6749-6758. doi:<https://doi.org/10.1128/aem.00941-12>

Ghule, A. L., Rawat, V. S., Johar, V., Raut, R. N., & Jadhav, A. (2025). Nano Urea: Predictive Insights and Real-World Implications for Sustainable Agriculture. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(4), s. 546-558. doi:<https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i42213>

Goyal, A., Chavan, S., Mohite, R. A., Shaikh, I. A., Chendake, Y., & Mohite, D. D. (2025). Emerging trends and perspectives on nano-fertilizers for sustainable agriculture. *Discover Nano*, 20(1), s. 97-97. doi:<https://doi.org/10.1186/s11671-025-04286-8>

Guan, X., Gao, X., Avellan, A., Spielman-Sun, E., Xu, J., Laughton, S., . . . Lowry, G. V. (2020). CuO Nanoparticles Alter the Rhizospheric Bacterial Community and Local Nitrogen Cycling for Wheat Grown in a Calcareous Soil. *Environmental Science & Technology*, 54(14), s. 8699-8709. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00036>

Hafshejani, L. D., Barani, M., Rahdar, A., & Tishehzan, P. (2026). A novel nano-niosomal delivery system for nitrate: Toward reduced leaching and sustainable nitrogen use. *Environmental Technology & Innovation*, 41, s. 104806-104806. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2026.104806>

Hawthorne, J., Roche, R. D., Xing, B., Newman, L. A., Ma, X., Majumdar, S., . . . White, J. C. (2014). Particle-Size Dependent Accumulation and Trophic Transfer of Cerium Oxide through a Terrestrial Food Chain. *Environmental Science & Technology*, 48(22), s. 13102-13109. doi:<https://doi.org/10.1021/es503792f>

Haydar, M. S., Ghosh, D., & Roy, S. (2024). Slow and controlled release nanofertilizers as an efficient tool for sustainable agriculture: Recent understanding and concerns. *Plant Nano Biology*, 7, s. 100058-100058. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100058>

Jampilek, J., & Kráľová, K. (2015). Application Of Nanotechnology In Agriculture And Food Industry, Its Prospects And Risks. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 22(3), s. 321-361. doi:<https://doi.org/10.1515/eces-2015-0018>

Janmohammadi, M., AMANZADEH, T., Sabaghnia, N., & Dashti, S. (2016). Impact of foliar application of nano micronutrient fertilizers and titanium dioxide nanoparticles on the growth and yield components of barley under supplemental irrigation. *Acta Agriculturae Slovenica*, 107(2), s. 265-276. doi:<https://doi.org/10.14720/aas.2016.107.2.01>

Jayara, A. S., Kumar, R., Pandey, P., Singh, S., Shukla, A., SINGH, A. P., . . . Reddy, K. I. (2023). Boosting Nutrient Use Efficiency Through Fertilizer Use Management. *Applied Ecology and Environmental Research*, 21(4), s. 2931-2952. doi:https://doi.org/10.15666/aer/2104_29312952

Jiang, M., Song, Y., Kanwar, M. K., Ahammed, G. J., Shao, S., & Zhou, J. (2021). Phytonanotechnology applications in modern agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1), s. 430-430. doi:<https://doi.org/10.1186/s12951-021-01176-w>

Judy, J. D., Unrine, J. M., & Bertsch, P. M. (2010). Evidence for Biomagnification of Gold Nanoparticles within a Terrestrial Food Chain. *Environmental Science & Technology*, 45(2), s. 776-781. doi:<https://doi.org/10.1021/es103031a>

Kekeli, M. A., Wang, Q., & Rui, Y. (2025). The Role of Nano-Fertilizers in Sustainable Agriculture: Boosting Crop Yields and Enhancing Quality. *Plants*, 14(4), s. 554-554. doi:<https://doi.org/10.3390/plants14040554>

Khan, M. Z., Khan, M. Z., Islam, M. R., Nahar, N., Al-Mamun, M. R., Khan, A. S., . . . Matin, M. A. (2021). Synthesis and characterization of nanozeolite based composite fertilizer for sustainable release and use efficiency of nutrients. *Heliyon*, 7(1). doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06091>

Khan, S. T., Adil, S. F., Shaik, M. R., Alkathlan, H. Z., Khan, M., Khan, M., . . . Khan, M. (2021). Engineered Nanomaterials in Soil: Their Impact on Soil Microbiome and Plant Health. *Plants*, 11(1), s. 109-109. doi:<https://doi.org/10.3390/plants11010109>

Kim, B., Murayama, M., Colman, B. P., & Hochella, M. F. (2012). Characterization and environmental implications of nano- and larger TiO₂ particles in sewage sludge, and soils amended with sewage sludge. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(4), s. 1129-1129. doi:<https://doi.org/10.1039/c2em10809g>

Kumar, Y. (2021). Nanofertilizers and their role in sustainable agriculture. *Annals of Plant and Soil Research*, 23(3), s. 238-255. doi:<https://doi.org/10.47815/apsr.2021.10067>

Larue, C., Baratange, C., Vantelon, D., Khodja, H., Surblé, S., Elger, A., & Carrière, M. (2018). Influence of soil type on TiO₂ nanoparticle fate in an agro-ecosystem. *The Science of The Total*

Environment, 630, s. 609-617.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.264>

Le, T. N., Tran, N. N., Escribà-Gelonch, M., Serra, C. A., Fisk, I. D., McClements, D. J., & Hessel, V. (2021). Microfluidic encapsulation for controlled release and its potential for nanofertilisers. *Chemical Society Reviews*, 50(21), s. 11979-12012. doi:<https://doi.org/10.1039/d1cs00465d>

Liu, R., & Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports*, 4(1), s. 5686-5686. doi:<https://doi.org/10.1038/srep05686>

López-Moreno, M. L., Rosa, G. d., Hernández-Viezcas, J. Á., Castillo-Michel, H., Botez, C. E., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2010). Evidence of the Differential Biotransformation and Genotoxicity of ZnO and CeO₂ Nanoparticles on Soybean (*Glycine max*) Plants. *Environmental Science & Technology*, 44(19), s. 7315-7320. doi:<https://doi.org/10.1021/es903891g>

Lowry, G. V., Giraldo, J. P., Steinmetz, N. F., Avellan, A., Demirer, G. S., Ristroph, K. D., . . . White, J. C. (2024). Towards realizing nano-enabled precision delivery in plants. *Nature Nanotechnology*, 19, s. 1255-1269. doi:<https://doi.org/10.1038/s41565-024-01667-5>

Madanayake, N. H., Hossain, A., & Adassooriya, N. M. (2021). Nanobiotechnology for agricultural sustainability, and food and environmental safety. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(1), s. 20-36. doi:<https://doi.org/10.15586/qas.v13i1.838>

Magnabosco, P., Masi, A., Shukla, R., Bansal, V., & Carletti, P. (2023). Advancing the impact of plant biostimulants to sustainable agriculture through nanotechnologies. *Chemical and Biological*

Technologies in Agriculture, 10(1), s. 1-25.
doi:<https://doi.org/10.1186/s40538-023-00491-8>

Majumdar, S., Trujillo-Reyes, J., Hernández-Viezcas, J. Á., White, J. C., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2015). Cerium Biomagnification in a Terrestrial Food Chain: Influence of Particle Size and Growth Stage. *Environmental Science & Technology*, 50(13), s. 6782-6792.
doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04784>

Marslin, G., Sheeba, C. J., & Franklin, G. (2017). Nanoparticles Alter Secondary Metabolism in Plants via ROS Burst. *Frontiers in Plant Science*, 8, s. 832-832.
doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00832>

McKee, M. S., & Filser, J. (2016). Impacts of metal-based engineered nanomaterials on soil communities. *Environmental Science Nano*, 3(3), s. 506-533.
doi:<https://doi.org/10.1039/c6en00007j>

Mirza, H. (2019). Sustainable Crop Production. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen, 978, s. 978-1.
doi:<https://doi.org/10.5772/intechopen.83521>

Mittal, D., Kaur, G., Singh, P., Yadav, K., & Ali, S. A. (2020). Nanoparticle-Based Sustainable Agriculture and Food Science: Recent Advances and Future Outlook. *Frontiers in Nanotechnology*, 2, s. 1-38. doi:<https://doi.org/10.3389/fnano.2020.579954>

Mohammadi, N., Shariatmadari, H., Khademi, H., & Bazarganipour, M. (2019). Coating of sepiolite-chitosan nanocomposites onto urea increases nitrogen availability and its use efficiency in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(7), s. 884-896. doi:<https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1643842>

Mousumi, S. (2020). Nanotechnology and the Environment. *In IntechOpen eBooks. IntechOpen. ISBN, 978, s. 978-1.* doi:<https://doi.org/10.5772/intechopen.87903>

Nile, S. H., Thiruvengadam, M., Wang, Y., Samynathan, R., Shariati, M. A., Peбезов, M., . . . Kai, G. (2022). Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), s. 254-254. doi:<https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>

Omara, A. E.-D., Elsakhawy, T., Alshaal, T., El-Ramady, H., Kovács, Z., & Fári, M. (2019). Nanoparticles: a Novel Approach for Sustainable Agro-productivity. *Environment*, 3, s. 30-40. doi:<https://doi.org/10.21608/jenvbs.2019.7478.1050>

Özatay, Ş., & Kaya, Ç. (2025). Tarım ve Gıda Sanayinde Yeni Yaklaşımlar: Nanopartiküller ve Potansiyel Kullanımları. *Bilim-Teknoloji-Yenilik Ekosistemi Dergisi*, 6(1), s. 61-73. doi:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/bityed/issue/91940/1710123>

Panda, K. K., Golari, D., Venugopal, A., Achary, V. M., Phaomei, G., Parinandi, N. L., . . . Panda, B. B. (2017). Green Synthesized Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Induce Oxidative Stress and DNA Damage in Lathyrus sativus L. *Root Bioassay System. Antioxidants*, 6(2), s. 35-35. doi:<https://doi.org/10.3390/antiox6020035>

Parada, J., Rubilar, O., Fernández-Baldo, M. A., Bertolino, F. A., Durán, N., Seabra, A. B., & Tortella, G. (2018). The nanotechnology among US: are metal and metal oxides nanoparticles a nano or mega risk for soil microbial communities? *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(2), 157–172. doi:<https://doi.org/10.1080/07388551.2018.1523865>

Priyanshi, H., K., S., M., S., V. K., N., N., S., S., S., & A. (2025). Effect of nano fertilizer on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Research in Agronomy*, 8(4), s. 687-690. doi:<https://doi.org/10.33545/2618060x.2025.v8.i4i.2846>

Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C. O., & Biswas, P. (2017). Nanofertilizer for Precision and Sustainable Agriculture: Current State and Future Perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), s. 6487-6503. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178>

Rastogi, A., Živčák, M., Sytar, O., Kalaji, H. M., He, X., Mbarki, S., & Brestič, M. (2017). Impact of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Plant: A Critical Review. *Frontiers in Chemistry*, 5, s. 78-78. doi:<https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00078>

Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), s. 3485-3498. doi:<https://doi.org/10.1021/jf104517j>

Rojas-Velázquez, Á. N., Guillén-Castillo, O. I., Jáuregui, J. A., Loredó-Ostí, C., Ramírez-Tobías, H. M., Romero-Méndez, M. J., . . . Hernández-Montoya, A. (2023). Effect of a nitrogenous nanocomposite on leaching and N content in lettuce in soil columns. *Discover Nano*, 18(1), s. 98-98. doi:<https://doi.org/10.1186/s11671-023-03874-w>

Safdar, M., Kim, W., Park, S., Gwon, Y., Kim, Y., & Kim, J. (2022). Engineering plants with carbon nanotubes: a sustainable agriculture approach. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), s. 275-275. doi:<https://doi.org/10.1186/s12951-022-01483-w>

Sanzari, I., Leone, A., & Ambrosone, A. (2019). Nanotechnology in Plant Science: To Make a Long Story Short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, s. 120-120. doi:<https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00120>

Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, A., Ghosh, S., Kumari, A., Sundaram, P., . . . Singh, R. R. (2024). Enhancing sustainability in agriculture with nanofertilizers. *Discover Applied Sciences*, 6(11). doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-024-06267-5>

Shaviv, A., Raban, S., & Zaidel, E. (2003). Modeling Controlled Nutrient Release from Polymer Coated Fertilizers: Diffusion Release from Single Granules. *Environmental Science & Technology*, 37(10), s. 2251-2256. doi:<https://doi.org/10.1021/es011462v>

Shelar, A., Nile, S. H., Singh, A. V., Rothenstein, D., Bill, J., Xiao, J., . . . Patil, R. (2023). Recent Advances in Nano-Enabled Seed Treatment Strategies for Sustainable Agriculture: Challenges, Risk Assessment, and Future Perspectives. *Nano-Micro Letters*, 15(1), s. 54-54. doi:<https://doi.org/10.1007/s40820-023-01025-5>

Sillen, W., Thijs, S., Abbamondi, G. R., Roche, R. D., Weyens, N., White, J. C., & Vangronsveld, J. (2020). Nanoparticle treatment of maize analyzed through the metatranscriptome: compromised nitrogen cycling, possible phytopathogen selection, and plant hormesis. *Microbiome*, 8(1), s. 127-127. doi:<https://doi.org/10.1186/s40168-020-00904-y>

Singh, A., Agrawal, S., Rajput, V. D., Ghazaryan, K., Yesayan, A., Minkina, T., . . . Αλεξίου, A. (2024). Nanoparticles in revolutionizing crop production and agriculture to address salinity stress challenges for a sustainable future. *Discover Applied Sciences*, 6(6). doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-024-06009-7>

Singh, A., Rajput, V. D., Varshney, A., Sharma, R., Ghazaryan, K., Minkina, T., . . . El-Ramady, H. (2023). Revolutionizing Crop Production: Nanoscale Wonders - Current Applications, Advances, and Future Frontiers. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(1). doi:<https://doi.org/10.21608/ejss.2023.246354.1684>

Stampoulis, D., Sinha, S., & White, J. C. (2009). Assay-Dependent Phytotoxicity of Nanoparticles to Plants. *Environmental Science & Technology*, 43(24), s. 9473-9479. doi:<https://doi.org/10.1021/es901695c>

Upadhyay, P. K., Singh, V. K., Rajanna, G. A., Dwivedi, B. S., Dey, A., Singh, R. K., . . . Rawat, S. (2023). Unveiling the combined effect of nano fertilizers and conventional fertilizers on crop productivity, profitability, and soil well-being. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, s. 1-15. doi:<https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1260178>

Venkidasamy, B., Nayeem, S., Kuppuraj, S. P., Thiruvengadam, M., & Ramalingam, S. (2018). Assessment of the effects of metal oxide nanoparticles on the growth, physiology and metabolic responses in in vitro grown eggplant (*Solanum melongena*). *Biotech*, 8(8), 362–362. doi:<https://doi.org/10.1007/s13205-018-1386-9>

Verma, K. K., Song, X., Degu, H. D., Guo, D.-J., Joshi, A., Huang, H., . . . Li, Y. (2023). Recent advances in nitrogen and nano-nitrogen fertilizers for sustainable crop production: a mini-review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s40538-023-00488-3>

Verma, K. K., Song, X., Joshi, A., Rajput, V. D., Singh, M., Sharma, A., . . . Li, Y. (2022). Nanofertilizer Possibilities for Healthy Soil, Water, and Food in Future: An Overview. *Frontiers in Plant*

Science, 13, s. 865048-865048.
doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.865048>

Wu, J., Sun, J., Bosker, T., Vijver, M. G., & Peijnenburg, W. J. (2023). Toxicokinetics and Particle Number-Based Trophic Transfer of a Metallic Nanoparticle Mixture in a Terrestrial Food Chain. *Environmental Science & Technology (Leiden University)*, 57(7), s. 2792-2803. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07660>

Yadav, A., Yadav, K., & Abd–Elsalam, K. A. (2023). Nanofertilizers: Types, Delivery and Advantages in Agricultural Sustainability. *Agrochemicals*, 2(2), s. 296-336. doi:<https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020019>

Zhang, H., Zheng, T., Wang, Y., Li, T., & Chi, Q. (2024). Multifaceted impacts of nanoparticles on plant nutrient absorption and soil microbial communities. *Frontiers in Plant Science*, 1, s. 1-15. doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1497006>

Zhang, P., Guo, Z., Ullah, S., Melagraki, G., Afantitis, A., & Lynch, I. (2021). Nanotechnology and artificial intelligence to enable sustainable and precision agriculture. *Nature Plants*, 7(7), s. 864-876. doi:<https://doi.org/10.1038/s41477-021-00946-6>

Zoubi, O. M., Singh, A., Rajput, V. D., Varshney, A., Agrawal, S., Ghazaryan, K., . . . Lysenko, D. (2023). Green Nanofertilizers: the Need for Modern Agriculture, Intelligent, and Environmentally-Friendly Approaches. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(1), s. 1-21. doi:<https://doi.org/10.12912/27197050/172946>

BÖLÜM 2

AYÇİÇEĞİ TARIMINDA AZOT YÖNETİMİ ve SÜRDÜREBİLİRLİK

TAMER ERYİĞİT¹
TURGAY BAŞDİNÇ²
ALİ UÇAR³

Giriş

Gerek endüstriyel hammadde gerekse temel gıda kaynağı olarak küresel ve ulusal ölçekte kritik bir öneme sahip olan ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.), stratejik yağ bitkileri listesinin başında yer almaktadır (Kaya et al., 2020). Güncel istatistiklere göre dünya genelinde 30 milyon hektarı aşkın bir alanda 59 milyon tonu geçen bir üretim hacmi yakalanmış, Türkiye ise 2023 yılındaki 2,1 milyon tonluk rekoltesiyle Avrupa pazarındaki güçlü konumunu pekiştirmiştir (F.A.O., 2024; T.Ü.İ.K., 2024). Bitkinin geniş adaptasyon kabiliyeti, zengin yağ ve protein kompozisyonu ile sağladığı yüksek katma değer dikkat çekse de sürdürülebilir yüksek

¹ Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Gevaş Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Orcid: 0000-0001-5069-8206

² Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, Orcid: 0000-0002-3654-3096

³ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, Orcid: 0009-0002-9060-5080

verim ve kalite hedeflerine ulaşmada rasyonel azot yönetimi en temel belirleyici faktör olarak değerlendirilmektedir (İnce Yıldız & Öztürk, 2023).

Küresel nüfus artışı ve iklimsel değişimlerin yarattığı çevresel zorluklar, ayçiçeği tarımında hem yüksek rekolteye odaklanan hem de ekolojik ayak izini düşüren yenilikçi besleme programlarının uygulanmasını kaçınılmaz hale getirmiştir (Pehlivan et al., 2022) Ayçiçeğinde vejetatif gelişimden klorofil sentezine, tohumun yağ kompozisyonundan protein birikimine kadar birçok fizyolojik süreçte kilit rol oynayan azot; yetersiz uygulandığında verim kaybına, gereğinden fazla kullanıldığında ise yer altı sularının kirlenmesi ve üretim maliyetlerinin yükselmesi gibi ciddi problemlere neden olmaktadır (İnce Yıldız & Öztürk, 2023; Taşdelen & Candoğan, 2025).

Bu derleme çalışmasının temel amacı, ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) tarımında azotun moleküler, fizyolojik ve agronomik düzeylerdeki rolünü disiplinler arası bir bakış açısıyla ele alarak; azot kullanım etkinliği, çevresel etkiler ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda güncel bilimsel literatürü bütüncül biçimde sentezlemektir. Çalışmada, azot alım ve taşınım mekanizmalarından fotosentez ve yağ sentezine, genotip-çevre-besleme etkileşimlerinden kontrollü salınımlı gübreler ve hassas tarım teknolojilerine kadar uzanan geniş bir çerçeve sunularak, ayçiçeği üretim sistemleri için bilimsel temelli ve uygulanabilir bir azot yönetimi modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1. Fizyolojik ve Moleküler Mekanizmalar: Azot Alımı ve Taşınması

Ayçiçeği, azotu amonyum ve nitrat formlarında kullanır; bu formlar toprakta amonifikasyon ve nitrifikasyon süreçleriyle oluşur (Wang ve ark., 2020). Moleküler araştırmalar, NRT (Nitrate Transport) ve AMT (Amonium Transport) taşıyıcı genlerinin

ekspresyonunun azotun köklerden alımı ve bitki içinde taşınmasında merkezi rol oynadığını ortaya koymuştur (Choi et al., 2023). Genotipler arasında gözlenen farklılıklar, bu genlerin çevresel koşullara verdiği yanıtlarla ilişkilidir (Haliloğlu & Aydogdu, 2024; Yasir & Abed, 2025). Bitki bünyesinde azotun fotosentetik, yapısal ve depo formları arasında dağılımı ise verim ve kaliteyi doğrudan etkilemektedir (Ren et al., 2025). Biyoçar ve kontrollü salınımlı gübrelerin birlikte uygulanması, bu dağılımı optimize ederek fotosentez kapasitesini ve tohum kalitesini artırmaktadır (G.K.M.M. et al., 2020). Bu nedenle hem moleküler mekanizmaların anlaşılması hem de uygun gübreleme stratejilerinin geliştirilmesi, ayçiçeğinde azot kullanım etkinliğini artırmaya yönelik ıslah çalışmalarında öncelikli olmalıdır.

Bu konuda atıfta bulunulan çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, ayçiçeğinde azot alımı ve taşınımının yalnızca topraktaki azot formlarına bağlı olmadığı; aynı zamanda NRT ve AMT taşıyıcı genlerinin ekspresyon düzeyleri, kök mimarisi ve çevresel koşullarla güçlü biçimde etkileşim halinde olduğu görülmektedir. Moleküler düzeydeki bu düzenleyici mekanizmalar, genotipler arası azot kullanım etkinliği farklılıklarının temelini oluşturmakta ve bitkinin fizyolojik performansını doğrudan şekillendirmektedir. Dolayısıyla, azot yönetiminin yalnızca agronomik uygulamalarla değil, moleküler ve genetik yaklaşımlarla da desteklenmesi, ayçiçeğinde sürdürülebilir verim artışı açısından stratejik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

2. Azotun Ayçiçeği Gelişimine Etkisi

Fenolojik Gelişim ve Morfolojik Özellikler

Ayçiçeği bitkisinin gelişiminde azotun rolü, çıkıştan olgunlaşmaya kadar tüm fenolojik evrelerde belirgindir (Haliloğlu & Aydogdu, 2024). Azot, hücre bölünmesi, protein ve nükleik asit sentezi, klorofil oluşumu ve karbonhidrat asimilasyonu gibi temel

fizyolojik süreçlerde anahtar rol oynar (Wang et al., 2020). Yetersiz azot, bitki boyunda kısılma, yaprak alanında azalma, kök gelişiminde zayıflama ve erken yaşlanma ile sonuçlanırken (Ren et al., 2025), Optimum azot dozları ise bitki boyu, gövde kalınlığı, yaprak sayısı ve tabla çapı gibi morfolojik parametreleri olumlu etkiler (Hajano et al., 2025). Azot, ayçiçeği bitkisinin çıkıştan olgunlaşmaya kadar tüm gelişim evrelerinde kritik bir besin elementidir (Haliloğlu & Aydogdu, 2024). Bu besin, hücre bölünmesi, protein ve nükleik asit üretimi, klorofil sentezi ve karbonhidratların bitki bünyesine kazandırılması gibi temel metabolik süreçlerde belirleyici rol üstlenir (Jarecki, 2022; Ren et al., 2025). Azot eksikliği; kısa boylu bitkiler, dar yaprak yüzeyi, zayıf kök sistemi ve erken yaşlanma gibi olumsuzluklara yol açarken (Allaf & Berahmandzadeh, 2020; Ren et al., 2025), uygun miktarlarda uygulandığında bitki boyu, gövde kalınlığı, yaprak sayısı ve tabla çapı gibi morfolojik özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlar (Haliloğlu & Aydogdu, 2024; Kurdali & Attar, 2025). Son yıllarda yapılan saha denemeleri, artan azot dozlarının bitki boyunu, yaprak alanını ve kök gelişimini anlamlı şekilde artırdığını göstermiştir. Örneğin, (Haliloğlu & Aydogdu, 2024) tarafından Şanlıurfa’da yürütülen bir çalışmada, 20 kg da-1 azot uygulaması ile en uzun bitki boyu ve en geniş tabla çapı elde edilmiştir. Benzer şekilde, (Mahameed et al., 2025) tarafından Irak’ta yapılan bir denemede, 300 kg/ha azot uygulaması, yaprak sayısı ve bireysel bitki veriminde maksimum artış sağlamıştır. Aşırı azot uygulamaları, ayçiçeğinde vejetatif büyümeyi aşırı derecede teşvik ederek generatif gelişimin gecikmesine, olgunlaşma süresinin uzamasına ve bitki dayanıklılığının azalmasına yol açabilmektedir (Jarecki, 2022; Ren et al., 2025). Bu nedenle, optimum azot dozunun belirlenmesi ve çeşit-çevre etkileşiminin dikkate alınması, sürdürülebilir verim ve kalite için kritik öneme sahiptir (Haliloğlu & Aydogdu, 2024; Kurdali & Attar, 2025).

Atıfta bulunulan bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, azotun ayçiçeğinde fenolojik gelişim ve morfolojik özellikler üzerinde belirleyici bir düzenleyici olduğu; ancak bu etkinin doğrusal değil, belirli bir optimum aralıktaki maksimuma ulaştığı anlaşılmaktadır. Yetersiz azot uygulamalarının bitki gelişimini sınırladığı, aşırı dozların ise vejetatif büyümeyi aşırı teşvik ederek generatif gelişimi baskıladığı görülmektedir. Bu durum, azotun yalnızca miktarının değil, eit özellikleri ve çevresel koşullarla uyumlu biçimde yönetilmesinin, sürdürülebilir verim hedefleri açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Genotip Azot Etkileşimleri

Ayçiçeği eitleri, azot alımı ve kullanım etkinliği bakımından belirgin farklılıklar sergilemektedir (Colho et al., 2022). Son yıllarda yapılan araştırmalar, hibrit eitlerin azot kullanımında daha yüksek verimlilik gösterdiğini, bazı yerel eitlerin ise düşük azot koşullarında daha iyi uyum sağladığını ortaya koymuştur (Jarecki, 2022; Kurdali & Attar, 2025). Shmoos genotipinin yüksek azot dozlarında en yüksek bireysel verim ve toplam yağ verimini sağladığını, yerel eitlerin ise daha yüksek yağ oranına sahip olduğunu bildirmiştir (Mahameed et al., 2025). Bu sonuçlar, azotlu gübreleme stratejilerinin eit bazında optimize edilmesi gerektiğini ve ışlah programlarında azot kullanım etkinliği yüksek genotiplerin nceliklendirilmesinin önemini vurgulamaktadır (Allaf & Berahmandzadeh, 2020; Ren et al., 2025). Ayçiçeği genotipleri arasında azot alımı, taşınması ve kullanım etkinliği bakımından dikkate değer farklılıklar bulunmaktadır (Haliloğlu & Aydogdu, 2024). Araştırmalar, hibrit eitlerin azot kullanımında daha yüksek verimlilik sağladığını, buna karşın bazı yerel eitlerin düşük azot koşullarında daha iyi uyum gösterdiğini ortaya koymuştur (Temme et al., 2024; Yasir & Abed, 2025). Bu konuda bildirimde bulunan bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, ayçiçeği genotipleri arasında azot alımı,

taşınımlı ve kullanım etkinliği bakımından belirgin fizyolojik ve biyokimyasal farklılıklar bulunduğu açıkça görülmektedir. Hibrit çeşitlerin yüksek azot koşullarında daha yüksek verim potansiyeli sergilediği, buna karşın bazı yerel genotiplerin düşük azot koşullarında daha stabil performans gösterdiği bildirilmektedir. Bu bulgular, azotlu gübreleme stratejilerinin tek tip uygulamalar yerine, çeşit bazlı ve çevreye özgü olarak optimize edilmesi gerektiğini ve azot kullanım etkinliği yüksek genotiplerin ıslah programlarında nceliklendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Ayeğinde Azot Etkileşimleri

Abiyotik Stres Koşullarında Azot Etkileşimi

- **Kuraklılık Stresi ve Azot Kullanımı:** Kuraklılık koşullarında toprakta azot mineralizasyonu, su filmlerinin kopması nedeniyle substrat difüzyonunun ve ekstraselüler enzim aktivitelerinin bozulmasıyla yavaşlamakta, inorganik azotun bitkiye sunula bilirliği sınırlanmaktadır (Donovan et al., 2024). Buna ek olarak, köklerin azot alımı, toprak nemindeki azalma sonucu kütle akışı ve difüzyonun kısıtlanmasıyla engellenmekte, kök bölgesinde nitrat birikimi oluşsa da bitki emilimi düşmektedir (Wang et al., 2021). Ayeği (*Helianthus annuus* L.) bitkilerinde bu etkileşim, fotosentez hızı, stomatal iletkenlik, transpirasyon ve yaprak alan indeksi gibi fizyolojik parametrelerde azalmaya yol açarak biyokütle birikimini, tahıl oluşumunu ve verimi önemli lde düşürmektedir (Chen et al., 2023). Damlama sulama deneylerinde düşük sulama ile yüksek azot uygulamasının kök bölgesinde (0-40 cm) azot birikimini artırırsa da bitki alımını iyileştirmediği ve fotosentez ile verim kayıplarına neden olduğu

gözlemlenmiştir (Wang et al., 2021). Yeterli azot beslemesi ise klorofil sentezi, protein metabolizması ve savunma mekanizmalarını destekleyerek kuraklık toleransını kısmen artırabilmektedir (Ahmad et al., 2013).

- **Azot Gübrelemesi ve Su Kullanım Etkinliği:** Abiyotik stres koşulları, özellikle kuraklık altında, azot gübrelemesi su kullanım etkinliği ve azot kullanım etkinliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Orta düzey azot uygulamaları kök proliferasyonunu teşvik ederek su ve besin alımını iyileştirir, fotosentez hızını, stomatal iletkenliği ve osmotik ayarı sürdürerek kuraklık toleransını güçlendirir ve bitki büyümesini optimize eder (Ahmad et al., 2013). Optimum sulama rejimleri ile birleştiğinde, bu yaklaşım verimi artırırken azot sızma kayıplarını ve gereksiz girdileri minimize etmekte, sürdürülebilir üretimi desteklemektedir (Chen et al., 2024; Wang et al., 2021). Ayçiçeği bitkisinde yapılan damlama sulama deneyleri, orta azot dozları (örneğin 232 kg N ha^{-1}) ile orta sulama seviyelerinin (300 mm) fotosentetik özellikleri, azot alımını ve tohum verimini maksimize ettiğini, kök bölgesinde nitrat birikimini önleyerek WUE ve NUE'yi önemli ölçüde yükselttiğini göstermektedir (Chen et al., 2024; Wang et al., 2021). Hafif su açığı altında yeterli azot beslemesi ise sulama su kullanım etkinliğini %15-18 oranında artırmakta, buna karşılık ağır su stresi altında azot alım etkinliği %48'e kadar düşerek verim ve biyokütle birikimini sınırlamaktadır (Karaşahin, 2014). Aşırı azot uygulamaları ise stomatal iletkenliği

ve transpirasyonu artırarak su kullanım etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilmekte, bu nedenle su stresi koşullarında azot dozunun dikkatle ayarlanması gerektiği vurgulanmaktadır.

- **Biyoçar ve Kontrollü Salınlı Gübreler:** Biyoçar (biochar), piroliz yoluyla organik atıklardan elde edilen stabil bir malzeme olup, toprağın su tutma kapasitesini artırarak kuraklık stresinde bitki su kullanım etkinliğini iyileştirir, azot tutulumunu güçlendirerek sızma ve gazsal kayıpları minimize eder. Kontrollü salınlı gübreler (Controlled-Release Fertilizers - CRF veya Slow-Release Nitrogen Fertilizers - SRNF) ise polimer kaplamalar veya neem/sülfür/bakteriyel kaplamalarla azotun yavaş ve bitki talebine uygun salınımını sağlayarak azot kullanım etkinliğini yükseltir. Bu iki teknolojinin eş zamanlı kullanımı, abiyotik stres koşullarında (özellikle kuraklık ve kurak iklimlerde) sinerjik etki göstererek toprak sağlığını, kök gelişimini, fotosentez hızını ve biyokimyasal süreçleri destekler, böylece verim, kalite ve sürdürülebilirliği artırır (Hussain et al., 2025; Waqar et al., 2022). Ayçiçeği bitkisinde yapılan saha denemelerinde, neem kaplı üre, sülfür kaplı üre, bakteriyel kaplı üre ve N yüklü biyoçar gibi SRNF'lerin %60-100 önerilen N dozlarında (89-148 kg N ha⁻¹) uygulanması, kurak iklim koşullarında yaprak alan indeksi (LAI: 2.12-5.97), kuru madde birikimi (604 g m⁻²'ye kadar) ve ürün verimini önemli ölçüde artırmış, NUE'yi optimize etmiştir (Waqar et al., 2022). Kuraklık stres altındaki ayçiçeği hibritlerinde biyoçar + SRNF kombinasyonu, büyüme, fizyoloji (stomatal iletkenlik, klorofil),

biyokimya (yağ asidi kompozisyonu) ve verimi geliştirerek sürdürülebilir üretim için umut vadetmektedir; örneğin çinko kaplı üre ile palmitik, stearik, oleik ve linoleik asit seviyeleri %15-25 oranında yükselmiştir (Hussain et al., 2025).

Biyotik Stres Koşullarında Azot Etkileşimleri

- **Hastalık ve Zararlılarla Etkileşim:** Biyotik stres koşullarında azot beslemesi, bitkinin savunma sistemlerini karmaşık bir şekilde etkiler; yeterli azot seviyeleri, protein sentezi, enzim aktiviteleri ve fenolik bileşikler gibi savunma metabolitlerinin üretimini destekleyerek hastalık ve zararlı toleransını güçlendirirken, aşırı azot uygulamaları doku sulanmasını artırarak C/N oranını düşürür, fenolik birikimini azaltır ve patojen ile zararlı duyarlılığını yükseltir (Martinez et al., 2021). Azot eksikliği ise fenolik bileşiklerin (örneğin lignin, klorojenik asit) akümüülasyonunu teşvik ederek konstitütif savunmayı güçlendirir, ancak bitki büyümesini sınırlayabilir (Zheng et al., 2021). Ayçiçeği bitkisinde mildiyö, pas ve kök çürüklüğü gibi fungal patojenlere karşı yüksek azot dozları (örneğin 150-250 kg N ha⁻¹), enfeksiyon seviyelerini %40-50 oranında artırarak *Diaporthe helianthi* yaprak/kök ve *Sclerotinia* disk enfeksiyonlarına yol açmakta, verim kayıplarını tetiklemektedir (Futó, 2019); buna karşılık dengeli azot yönetimi (80-100 kg N ha⁻¹) ile optimum direnç sağlanmakta, aşırı gübreleme ise zararlı istilalarını (örneğin yaprak bitleri) ve erken olgunlaşmayı teşvik etmektedir (Futó, 2019).

- **Azot ve Fitohormon Etkileşimi:** Biyotik stres koşullarında azot beslemesi, jasmonik asit (JA), salisilik asit ve etilen gibi fitohormon sinyal yollarını karmaşık şekilde modüle etmektedir; yeterli azot seviyeleri savunma enzimlerini ve protein sentezini desteklerken, aşırı azot JA sinyalizasyonunu baskılayarak böcekler (örneğin yaprakla beslenenler, tırtıllar) ve nekrotrofik patojenlere karşı direnci azaltmakta, C/N oranını düşürerek fenolik metabolit birikimini sınırlamaktadır (Martinez et al., 2021; Zheng et al., 2021). Düşük azot koşulları ise konstitütif savunmayı güçlendirerek JA ve fenolik asit seviyelerini artırır, bitki-patojen/herbivor etkileşimlerinde JA-SA antagonizmini etkileyerek sistemik direnci optimize eder (Zhao et al., 2024). Bu etkileşimler, domates ve pirinç gibi bitkilerde gözlemlenmiş olup, azot fazlalığı SA birikimini teşvik ederken JA'yı inhibe etmekte, biyotik stres toleransını patojen tipine göre değiştirmektedir (Fones & Gurr, 2017). Ayçiçeği bitkisinde azot eksikliği, kök büyümesinde auxin-JA etkileşimini düzenleyerek dolaylı olarak biyotik direnci etkilemekte; JA yaprak uygulaması ise fungal hastalıklar (mildiyö, pas) ve zararlılara karşı savunma metabolitlerini artırarak, dengeli azotla birleştğinde enfeksiyon seviyelerini %20-30 oranında azaltabilmekte, NUE'yi iyileştirmektedir (Ashraf & Siddiqi, 2024).

Ayçiçeği kuraklığa uyumlu bir türdür; ancak su stresi altında azot mineralizasyonu ve bitki tarafından alımı sınırlanmaktadır (Haliloğlu & Aydogdu, 2024). Denemeler, 150 kg ha⁻¹ düzeyinde azot uygulaması ile hafif su kısıtlamasının birlikte verim ve su/azot

kullanım etkinliğini artırdığını ortaya koymuştur (Kurdali & Attar, 2025). Buna ek olarak, Biyoçar ile kontrollü salınımlı gübrelerin eş zamanlı kullanımı kurak koşullarda hem verim ve kaliteyi yükseltmekte hem de azot kayıplarını azaltmaktadır (G.K.M.M. et al., 2020; Ren et al., 2025).

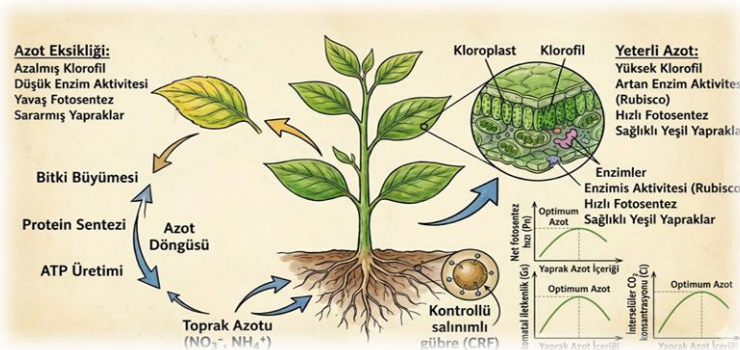
Azot ve Diğer Besin Elementleri Etkileşimi

Azot, fosfor, potasyum, kükürt ve mikroelementler arasında sinerjik etkileşimler bulunmakta ve bu etkileşimler bitki verim ve kalite parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir (Cao et al., 2025). Dengesiz gübre kullanımı antagonistik etki oluşturarak azot alım etkinliğini azaltmakta, büyüme dönemi başlarında potasyum eksikliği durumunda bu olumsuz etkinin daha da belirginleştiği bildirilmektedir (Karaşahin, 2014). Bu etkileşimler, besin elementlerinin birbirleri arasındaki oranlara ve konsantrasyon düzeylerine bağımlı olup, belli bir seviyeye kadar sinerjik etki gösterirken bir elementin miktarındaki artışla birlikte antagonistik etki başlayabilmektedir (Karaşahin, 2022). Özellikle kükürt ile birlikte uygulanan azot, yağ oranı ve kalite üzerinde belirgin bir sinerjik etki göstermektedir (Ren et al., 2025). Azot ve kükürt uygulamalarının birlikte klorofil, protein ve antioksidan içeriğini anlamlı şekilde artırdığını ortaya koymuştur (Javaid et al., 2024). Bu etkileşimler arasında $N \times K$, $N \times P$ ve $N \times S$ gibi kombinasyonlar sinerjik sonuçlar verirken, aynı taşıma mekanizmasını kullanan katyonlar arasındaki rekabet antagonistik etkilere yol açabilmektedir (Jayara et al., 2023). Örneğin, iyonların birbirleriyle rekabeti sonucu azotun baskın hale gelmesi potasyum ve kalsiyum alımını sınırlandırabilirken, potasyum fazlası azot, kalsiyum ve magnezyum emilimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Rácz & Radócz, 2019).

Azotun Fotosentez Kapasitesi Üzerindeki Etkileri

Azot, klorofil molekülünün temel yapı taşı olup fotosentez kapasitesinin artırılmasında doğrudan etkiye sahiptir (Jarecki, 2022). Yapraklarda yeterli azot bulunması, klorofil sentezini ve fotosentetik enzimlerin özellikle yeryüzünde en bol bulunan protein olmasıyla ve karbon tutma işlemindeki kilit taşı olması rolü ile bilinen Rubisco'nun (Ribüloz-1,5-bisfosfat karboksilaz/oksijenaz) üretimini destekleyerek net fotosentez hızını yükseltmektedir (Ren et al., 2025). Kontrollü salınlı gübre denemelerinde, CRF uygulanan ayçiçeği bitkilerinde yaprak fotosentetik azot oranı, net fotosentez hızı (P_n : Net Photosynthetic Rate), stomatal iletkenlik (G_s : Stomatal Conductance) ve interselüler CO_2 konsantrasyonu (C_i : Intercellular CO_2 Concentration) geleneksel gübrelemeye kıyasla %30–90 oranında artış göstermiştir (Ren et al., 2025). Fotosentez kapasitesinin yükseltilmesi, yalnızca verim artışıyla sınırlı kalmayıp aynı zamanda yağ ve protein sentezinde de olumlu sonuçlar doğurmaktadır (Jarecki, 2022; Ren et al., 2025). Bununla birlikte, aşırı azot uygulamaları stomatal iletkenliği ve transpirasyonu artırarak su kullanım etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir; bu nedenle su stresi koşullarında azot dozunun dikkatle ayarlanması gerektiği vurgulanmaktadır (Allaf & Berahmandzadeh, 2020; Ren et al., 2025).

Şekil 1. Azotun Fotosentez Kapasitesi Üzerindeki Etkileri



- **Azot Dozları ve Yaprak Fotosentez Hızı:** Artan azot dozları, ayçiçeğinde yaprak azot içeriğini artırarak net fotosentez hızı, stomatal iletkenlik ve transpirasyon oranını yükseltmektedir. Ancak aşırı azot uygulamaları fotosentez veriminde doygunluğa veya düşüşe yol açabilmektedir. Dolayısıyla Ayçiçeğin azot dozlarına verilen fizyolojik yanıtı nicel olarak ortaya koymuştur (Ren et al., 2025).
- **Klorofil İçeriği, Yaprak Azotu ve Fotosistem Aktivitesi:** Azot dozlarının artışı, ayçiçeğinde SPAD klorofil değerlerini, klorofil a ve b içeriğini ve fotosistem II (PSII) etkinliğini artırmakta; bu durum fotosentez kapasitesini doğrudan yükseltmektedir. Elde edilen bulgular azot–klorofil–fotosentez zincirini birlikte ele almış ve fotosentezdeki artışın biyokimyasal temellerini açıklamıştır (Ren et al., 2025).
- **Azot Dozları – Kök Gelişimi – Fotosentez İlişkisi:** Uygun azot dozları, kök yüzey alanını ve kök aktivitesini artırarak su ve besin alımını güçlendirir; bu durum dolaylı olarak yaprak fotosentezini ve karbon asimilasyonunu artırır (Ren et al., 2025).
- **Fotosentez Artışı ve Verim–Yağ İçeriği İlişkisi:** Fotosentez aktivitesindeki artış, ayçiçeğinde biyokütle birikimini, tabla gelişimini, tohum verimini ve yağ sentezini doğrudan desteklemektedir. Ancak yüksek azot dozları yağ oranında azalmaya yol açabilmektedir (Coêlho et al., 2022).

Azot dozları, ayçiçeğinde kök gelişimini teşvik ederek bitkinin su ve besin alım kapasitesini artırmakta; bu durum yaprak azot içeriği, klorofil yoğunluğu ve fotosentez aktivitesinin yükselmesine neden olmaktadır. Artan fotosentez kapasitesi, fotosentetik azot kullanım etkinliğini ve karbon asimilasyonunu güçlendirerek bitki biyokütlesi ve tohum verimini olumlu yönde

etkilemektedir. Ancak aşırı azot uygulamaları fotosentez verimliliğinde doymuşluğa ve yağ oranında azalmaya yol açabilmektedir (Coêlho et al., 2022; Ren et al., 2025).

Azotun ayçiçeğinde fotosentez kapasitesinin biyokimyasal temelini oluşturan klorofil sentezi ve Rubisco aktivitesi üzerinde doğrudan düzenleyici rol oynadığı görülmektedir. Uygun azot düzeylerinin yaprak azot içeriğini artırarak net fotosentez hızını, stomatal iletkenliği ve karbon asimilasyonunu güçlendirdiği; ancak aşırı azot uygulamalarının fotosentetik verimlilikte doymuşluk veya düşüşe yol açabildiği bildirilmektedir. Bu bulgular, fotosentez–azot–verim ilişkilerinin doğrusal değil, optimum eşik değerler etrafında şekillendiğini ve fizyolojik verimliliğin sürdürülebilir azot yönetimiyle doğrudan bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır.

3. Verim ve Kalite Üzerindeki Rolü

Tane Verimi ve Verim Bileşenleri

Azot, ayçiçeğinde tane verimi ve verim bileşenlerini şekillendiren en kritik girdilerden biri olarak öne çıkmaktadır (Haliloğlu ve Aydoğdu, 2024).

- **Bin tane Ağırlığı:** Son yıllarda gerçekleştirilen çok sayıda saha denemesi, artan azot dozlarının çıkış, çiçeklenme ve olgunlaşma süresini uzattığını; aynı zamanda gövde kalınlığı, tabla çapı, dolu tane oranı, 1000 tane ağırlığı ve hasat indeksinde anlamlı artışlara yol açtığını ortaya koymuştur (Jarecki, 2022; Kurdali & Attar, 2025; Ren et al., 2025).
- **Tane Verimi:** Ayçiçeğinde Azotun verime etkisini inceleyen çalışmalarda 12–20 kg da⁻¹ azot uygulaması ile dekara tane verimi %30–40 oranında arttırdığı tespit edilmiştir (Ünlüyurt & Demir, 2022).

- **Bitki Verimi:** 300 kg ha⁻¹ azot uygulamasında bireysel bitki veriminin 88.9 g bitki⁻¹'e ulaştığını rapor etmiştir (Mahameed et al., 2025).
- **Kuru Madde Oranı:** 150 kg ha⁻¹ azot uygulamasında kuru madde veriminin %49, toplam azot alımının ise %96 oranında arttığını göstermiştir (Kurdali & Attar, 2025). Ancak, aşırı azot uygulamalarının verim artışını bir noktadan sonra stabilize ettiği, hatta bazı durumlarda generatif gelişimi baskılayarak verimi düşürebileceği de belirtilmektedir. Bu nedenle, optimum dozun belirlenmesi ve sulama ile birlikte dengeli bir azot yönetimi önerilmektedir.

Kalite Üzerine Etkileri

Yağ Kalitesi Üzerindeki Etkileri: Ayçiçeği tohumunda yağ oranı ve yağ asidi kompozisyonu, endüstriyel kullanım ve beslenme açısından büyük önem taşımaktadır (Roba Jilo et al., 2025; Yağmur et al., 2021). Azot uygulamaları, belirli dozlara kadar yağ oranı ve toplam yağ verimini artırabilmekte; ancak aşırı azot kullanımı yağ oranında düşüşe ve yağ asidi kompozisyonunda değişimlere neden olabilmektedir (Jarecki, 2022; Kurdali & Attar, 2025). Azot dozunun artışıyla toplam yağ veriminin anlamlı şekilde arttığını, ancak yağ oranının azaldığını göstermiştir (Mahameed et al., 2025). Benzer şekilde, azotlu gübre uygulamalarında yağ oranının azaldığını, ancak toplam yağ veriminin arttığını rapor etmiştir (Kurdali & Attar, 2025). Başka bir çalışmada ise, azot ve kükürt uygulamalarının birlikte yağ oranını ve yağ verimini %2–5 oranında artırdığını, ancak aşırı dozlarda toksisite ve kalite kaybı riskinin bulunduğunu belirtmiştir (Erbaş & Şenates, 2020). Yağ asidi kompozisyonu bakımından, artan azot dozlarının oleik asit oranını düşürdüğü ve linoleik asit oranını yükselttiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Jarecki, 2022; Yağmur et al., 2021). Bu değişim, özellikle yüksek oleik asitli

ayçiçeği çeşitlerinde kalite açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir durumdur (Kurdali & Attar, 2025; Roba Jilo et al., 2025).

Çerezlik Kalitesi Üzerine Etkileri: Azot uygulaması çerezlik ayçiçeği tohumlarında verimi artırırken aşırı dozlarda yağ oranını düşürmektedir. Ayrıca yağ asidi kompozisyonu, α -tokoferol (E vitamini) ve amino asit profilleri değişmektedir (Canavar & Gören, 2025). Kontrollü salınımlı azot gübrelere yapraklarda azot birikimini ve fotosentez kapasitesini artırarak genel verimliliği yükseltmektedir. Bu durum çerezlik çeşitlerde daha iri ve kaliteli tohum oluşumuna katkı sağlamaktadır (Ren et al., 2025). Azot uygulama seviyeleri ile birlikte sulama koşulları, çerezlik ayçiçeği çekirdeklerinde protein ve amino asit içeriğini önemli ölçüde etkilemiştir. Dengeli azot uygulaması besin değerini yükseltmiştir (Feng et al., 2021).

Sonuç olarak azot uygulamalarının ayçiçeğinde tane verimi, tabla çapı, bin tane ağırlığı ve toplam biyokütle üzerinde güçlü bir artırıcı etkiye sahip olduğu; buna karşın yağ oranı ve yağ asidi kompozisyonu üzerinde doz bağımlı ve çift yönlü etkiler oluşturduğu anlaşılmaktadır. Orta düzey azot uygulamalarının hem verim hem de kalite açısından optimum sonuçlar sağladığı, aşırı azotun ise yağ oranında düşüşe ve kalite parametrelerinde bozulmaya yol açabildiği görülmektedir. Bu durum, verim artışının tek başına yeterli bir hedef olmadığını, kalite ve besin değeri boyutunun da azot yönetimi stratejilerine entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir.

4. Azot Kullanım Etkinliği ve Ölçüm Yöntemleri

Azot kullanım etkinliği (NUE: Nitrogen Use Efficiency), bitkinin alınan azotu ne kadar verimli kullandığını gösteren temel bir göstergedir. Yüksek NUE hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir üretimin anahtarıdır. (Kurdali & Attar, 2025), ¹⁵N izotop tekniğiyle yaptıkları çalışmada, ayçiçeğinde ortalama

%64'lük bir azot kullanım etkinliği tespit etmiş, en yüksek etkinliğin ise 150 kg ha⁻¹ azot uygulamasında (%69) elde edildiğini göstermiştir. Kontrollü salınlı gübre uygulamalarında geleneksel gübrelere göre NUE'nin %10'a kadar arttığını, bunun da verim ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağladığını belirtmiştir (Ren et al., 2025).

Ölçüm Yöntemleri ve Teknolojik Yaklaşımlar

- **Tanımlar ve göstergeler:** NUE, uygulanan azotun ürün verimine veya ürüne geri kazanımına katkısını ifade eder. Standart göstergeler arasında kısmi faktör verimliliği (PFP: *Partial Factor Productivity*), agronomik verimlilik (AE: *Agronomic Efficiency*), fizyolojik verimlilik (PE: *Physiological Efficiency*), geri kazanım verimliliği (RE: *Recovery Efficiency*) ve azot hasat indeksi (NHI: *Nitrogen Harvest Index*) yer alır (Congreves et al., 2021).
- **İzotop ve bütçe temelli ölçümler:** 15N izotop izleme, azot geri kazanım verimliliğini (NRE: *Nitrogen Recovery Efficiency*) güvenilir şekilde ölçmekte ve kayıpları (denitrifikasyon, sızma) ayrıştırabilmektedir. Ayrıca çiftlik düzeyinde azot bütçeleri, girdiler ve çıktılar üzerinden sürdürülebilir yönetim için metrikler sağlar (Alami et al., 2025).
- **Uzaktan algılama ve veri odaklı yöntemler:** Hiperspektral indeksler ve makine öğrenmesi, yaprak azot durumunu ve fotosentetik kapasiteyi tahmin ederek saha ölçeğinde NUE'nin mekânsal yönetimini mümkün kılar (Miller, 2024).
- **Yönetim uygulamaları:** Bölünmüş uygulama, kontrollü salınlı gübreler ve organik-inorganik

kombinasyonlar verim ve kaliteyi artırırken çevresel kayıpları azaltır (Sharma & Bali, 2018).

- **Genetik ve moleküler yaklaşımlar:** NRT ve AMT taşıyıcı genleri, kök mimarisi ve genotip farklılıkları azot kullanım etkinliğini artırır. Agronomik uygulamalar ile genetik ilerlemelerin entegrasyonu en yüksek etkiyi sağlar (Ali et al., 2025).

NUE ölçümünde klasik yöntemlerin yanı sıra, ^{15}N izotop tekniği, uzaktan algılama, hiperspektral görüntüleme ve yapay zekâ tabanlı modellemeler giderek daha fazla kullanılmaktadır (Cao et al., 2025; Li et al., 2023). Özellikle hiperspektral ve termal görüntüleme yöntemleri sayesinde azot ve su kullanım dinamiklerinin izlenmesi mümkün olmakta; bu da hassas gübreleme ve sulama stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Nie et al., 2024).

Yapay Zekâ, Uzaktan Algılama ve Toprak Testleri ile Azot Yönetimi

Hiperspektral görüntüleme ile toprakta toplam azot içeriğinin haritalanmasının çevresel heterojenliği anlamada kritik rol oynadığını vurgulamıştır (Lin et al., 2024). Ayrıca, İHA görüntüleri ve yapay zekâ algoritmaları birleştirilerek, su stresine bağlı azot alım değişimleri ve azot kullanım etkinliği izlenebilmektedir (Chen et al., 2025). Bu teknolojiler, gereksiz azot uygulamasını önleyerek hem ekonomik kayıpları azaltmakta hem de nitrat sızıntısı ve sera gazı emisyonları gibi çevresel riskleri düşürmektedir (F.A.O., 2025; Zaveri, 2025). Sonuç olarak, hassas tarım uygulamalarıyla entegre edilen bu sistemler, sürdürülebilir gübre yönetimi için vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir. İnsansız hava aracı (İHA) tabanlı çoklu spektral görüntüleme ile ayçiçeği çıkış oranı ve azot durumu tespitinde %94 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu tür teknolojiler, büyük ölçekli üretim alanlarında azot yönetiminin

optimizasyonunda önemli bir potansiyel sunmaktadır (Lu et al., 2020).

Ayçiçeğinde azot kullanım etkinliğinin yalnızca uygulanan gübre miktarına değil; gübre formu, uygulama zamanı, sulama rejimi, genotip özellikleri ve toprak biyolojik aktivitesi gibi çok sayıda faktörün etkileşimiyle belirlendiği görülmektedir. Kontrollü salınlı gübreler, organik kaynaklar ve hassas tarım teknolojileriyle desteklenen sistemlerin, geleneksel uygulamalara kıyasla daha yüksek NUE değerleri sağladığı ve çevresel kayıpları anlamlı düzeyde azalttığı bildirilmektedir. Bu bulgular, azot yönetiminin salt girdiye dayalı değil, sistem temelli ve teknoloji destekli bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

5. Gübre Tipleri ve Uygulama Stratejileri

Kimyasal ve Kontrollü Salınlı Gübreler

Geleneksel azotlu gübreler (üre, amonyum nitrat, amonyum sülfat), hızlı çözünürlükleri sayesinde kısa sürede yüksek miktarda azot sağlayabilmektedir; ancak bu durum aynı zamanda yüksek kayıp oranları ve düşük azot kullanım etkinliği ile çevresel riskleri de beraberinde getirmektedir (Cao et al., 2025; Lu et al., 2020). Buna karşılık, kontrollü salınlı gübreler kaplama teknolojileri sayesinde azotun bitki ihtiyacına göre yavaş ve dengeli biçimde salınmasını sağlamakta; böylece hem verim artışı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Nie et al., 2024; Ren et al., 2025).

Organik Azot Kaynakları ve Sürdürülebilirlik

Organik gübreler, hayvan gübresi, kompost, yeşil gübreler, baklagiller, vermikompost ve biyokömür gibi kaynaklar aracılığıyla toprakta azotun yavaş salınımını sağlayarak uzun süreli besin desteği sunmakta ve aynı zamanda toprak sağlığını iyileştirmektedir (Begizew, 2020; Sharma, 2024). Bu kaynaklar,

toprak organik madde miktarını artırır, mikrobiyal aktiviteyi teşvik eder, azot sızmasını ve sera gazı emisyonlarını (N_2O gibi) azaltır, biyoçeşitliliği korur ve sentetik gübre kullanımını minimize ederek sürdürülebilir tarımı destekler (Badagliacca ve ark., 2024). Organik azot yönetimi, bitki besin kullanım verimliliğini yükseltir, toprak verimliliğini uzun vadede korur ve çevresel kirliliği önleyerek gıda güvenliğini güçlendirir (Shahzad ve ark., 2025).

- **Mikrobiyal Gübreler:** Mikrobiyal gübreler, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azotobacter* gibi azot bağlayıcı (örneğin *Azotobacter*, *Azospirillum*), fosfor çözücü ve potasyum mobilize edici bakteriler ile fitohormon üreten, siderofor salgılayan ve ACC (1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit) deaminaz enzimi içeren bitki büyümesini teşvik eden rizobakterileri içerir (Kumar ve ark., 2022). Bu mikroorganizmalar, biyolojik azot fiksasyonu, besin solubilizasyonu (P, K, Zn), fitohormon üretimi, siderofor ile Fe alımını artırma ve stres toleransı (kuraklık, tuzluluk, ağır metal) sağlama yoluyla toprakta organik azot salınımını hızlandırır, mikrobiyal biyokütle karbonu, enzim aktivitelerini (dehidrogenaz, fosfataz, üreaz) yükseltir, rizosfer mikrobiyom çeşitliliğini artırır ve bitki kök gelişimini, besin alımını güçlendirir (Rashmi ve ark., 2022). Tek tür veya konsorsiyum (örneğin *Pseudomonas* + *Bacillus*) inokülasyonları, kimyasal gübre dozunu %25-50 azaltarak N kullanım verimliliğini artırır, sera gazı emisyonlarını düşürür ve sürdürülebilir tarımı destekler (Liu ve ark., 2023; Shah ve ark., 2021). Ayçiçeğinde, PGPR tohum/kök uygulamaları bitki boyunu, yaprak sayısını, kök

uzunluğunu/biyokütlesini, tohum verimini %20-50 artırır, yağ oranını/protein içeriğini iyileştirir; örneğin *Azospirillum* + *Pseudomonas* kombinasyonları NUE'yi %20-30 yükseltir, kurak/tuzlu koşullarda stres toleransını güçlendirir ve P kullanım verimliliğini optimize eder (Güler & Ögütçü, 2024).

- **Hümk Asit & Leonardit:** Hümk asitler, organik maddelerin humifikasyonu sonucu oluşan kompleks, yüksek moleküler ağırlıklı organik bileşiklerdir ve düşük oranda (%0.5-2) azot içerir; bu azotu yavaş salınım yoluyla sağlar, toprak mikrobiyal aktivitesini (üreaz, fosfataz enzimleri) teşvik ederek N mineralizasyonunu artırır, katyon değişim kapasitesini (CEC) yükselterek NH_4^+ ve NO_3^- tutma kapasitesini güçlendirir, kök gelişimini, besin (özellikle N) alımını, klorofil sentezini ve bitki stres toleransını iyileştirir (Sefaoğlu, 2021). Leonardit, linyitin oksidasyon ürünü olup %50-80 humik-fulvik asit barındıran doğal organik kaynaktır, toprak yapısını, su tutma kapasitesini ve organik madde miktarını artırır, N kayıplarını (sızma, buharlaşma) minimize eder, N kullanım verimliliğini %27'ye varan oranlarda yükseltir ve sentetik gübre ihtiyacını azaltır (Akimbekov et al., 2020; Kaya, 2020). Ayçiçeğinde, 2 L ha⁻¹ hümk asit yaprak uygulaması + %50 mineral gübre tohum verimini %15-25 artırır, yağ kalitesini yükseltir, N alımını güçlendirir ve tuzlu/kurak topraklarda büyüme sağlar; leonardit kombinasyonları da verim ve azot kullanım etkinliğini iyileştirir (El-Tahlawy & Ali, 2022).
- **Organomineral Gübreler:** Organomineral gübreler, organik (hayvan gübresi, kompost, biyokütle atıkları

gibi) ve mineral kaynakların (üre, superfosfat, potasyum klorür vb.) karışımıdır; yavaş salınım azot sağlayarak nitrat sızmasını, amonyum buharlaşmasını ve fosfor fiksasyonunu minimize eder, toprak organik madde miktarını artırır, katyon değişim kapasitesini yükseltir, mikrobiyal aktiviteyi teşvik eder ve besin kullanım verimliliğini artırır (Abdulraheem et al., 2023). Bu gübreler, organik kısmın yavaş mineralizasyonu ile mineral kısmın hızlı etkisini birleştirerek bitki büyüme dönemine uyumlu besin salınımı sağlar, sentetik gübre ihtiyacını azaltır ve çevresel kirliliği önler (Abdulraheem et al., 2023). Ayçiçeğinde, 3-5 t ha⁻¹ organomineral uygulama tohum verimini 800-900 kg ha⁻¹'ya çıkarır, yağ ve protein içeriğini iyileştirir, N uptake'ini artırır; örneğin 3.65 t/ha doz bitki biyokütlesini ve tohum verimini önemli ölçüde yükseltir (El-Dein et al., 2023).

- **Vermikompost & Arıtma Çamuru:** Vermikompost, solucanlarca işlenmiş organik atıktır; yüksek N içeriği, enzimler, mikrobiyal çeşitlilik, büyüme düzenleyicileri ve yavaş salınım sağlayan besinler barındırır, toprak organik madde miktarını artırır, mikrobiyal aktiviteyi teşvik eder, besin solubilizasyonunu hızlandırır ve bitki büyümesini destekler (Al-Tawarah et al., 2023; Sefaoğlu, 2021). Arıtma çamuru (sewage sludge/biosolids), işlenmiş kanalizasyon çamurudur; N-P zengin olup toprak fiziksel-kimyasal özelliklerini iyileştirir, mineral N, P ve K alımını artırır ancak Pb, Cd, Ni gibi ağır metaller için sıkı denetim ve limitli dozaj gerektirir (Mohammadian et al., 2023). Ayçiçeğinde,

2-2.5 t ha⁻¹ vermikompost + %50 mineral N veya biyoçar kombinasyonu tohum verimini 3-4.8 t ha⁻¹'a yükseltir, yağ oranını %46.8'e çıkarır, N kullanım verimliliğini artırır; arıtma çamuru 10-30 t/ha veya 50-100% N eşdeğeri dozları bitki büyümesini, tohum verimini, yağ kalitesini ve su kullanım verimini iyileştirir, ağır metal birikimi agronomik limitlerde kalır (Islam et al., 2024).

- **Biyokömür:** Biyokömür, biyokütlenin piroliz ürünüdür; gözenekli yapısı, yüksek katyon değişim kapasitesi ve yüzey fonksiyonel grupları ile NH₄⁺ ve organik azot bileşiklerini adsorbe ederek N tutma kapasitesini artırır, yavaş salınım sağlar, NO₃⁻ ve NH₄⁺ sızmasını azaltır, toprak pH'sını düzenler, su tutmayı iyileştirir, mikrobiyal aktiviteyi teşvik eder ve sera gazı emisyonlarını (N₂O, NH₃) minimize eder (Hussain et al., 2025). Organik azot kaynağı olarak değerlendirildiğinde, yüksek C/N oranına sahip olsa da N zenginleştirilmiş biyokömür formları yavaş salınan gübre görevi görür, N kullanım verimliliğini %20-50'ye varan oranlarda yükseltir ve sentetik N ihtiyacını azaltır (Ghassemi-Golezani & Rahimzadeh, 2022; Khan et al., 2023). Ayçiçeğinde, 5-20 t/ha biyokömür + yavaş salınım N uygulaması kurak ve tuzlu koşullarda bitki büyümesini, tohum verimini ve yağ kalitesini önemli ölçüde artırır; örneğin vermikompost ile kombinasyonu toprak kalitesini iyileştirir ve verimi 3-4 t ha⁻¹'a çıkarır (Islam et al., 2024; Lipi et al., 2023) Ayçiçeğinde, 5-20 t ha⁻¹ biyoçar + yavaş salınım N, kurak koşullarda verimi %20-50 artırır (örneğin 604

g m⁻² kuru madde), N kullanım verimini yükseltir (Islam et al., 2024; Lipi et al., 2023).

- **Biyoçar:** Biyoçar (biyoçar varyantı), biyokömüre benzer şekilde organik azot stabilizasyonu sağlar, toprak karbon sekestrasyonunu destekler. Bu materyal, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek bitki verimini artırır ve kaliteli ürün elde edilmesini sağlar (Gul' et al., 2019). Bu materyallerin tarımsal sistemlerde entegre kullanımı, toprağın su tutma kapasitesini artırarak kuraklık stresine karşı bitki direncini güçlendirir ve toprak mikrobiyal aktivitesini destekleyerek besin döngüsünü optimize eder (Islam et al., 2024). Ayçiçeğinde, 10-15 t ha⁻¹ dozlar tohum verimini 3-4 t ha⁻¹'a çıkarır, kuraklık stresini azaltır ve sürdürülebilirliği artırır (Hussain et al., 2025; Lipi et al., 2023).

Uygulama Zamanı ve Dozu

Azotun uygulanma zamanı ve dozu, ayçiçeğinde verim ve kalite üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Haliloğlu & Aydogdu, 2024). Ekim döneminde %100 oranında ve 12 kg da⁻¹ azot uygulamasının en yüksek tane verimini sağladığını bildirmiştir (Ünlüyurt & Demir, 2022). Benzer şekilde, (Kurdali & Attar, 2025), azotun iki aşamalı olarak çıkış ve çiçeklenme öncesi dönemlerde uygulanmasının azot kullanım etkinliğini artırdığını rapor etmiştir (Ren et al., 2025).

tetikleyebildiğini ortaya koymaktadır (Hina, 2024; Kurdali & Attar, 2025).

Su Kirliliği ve Sera Gazı Emisyonları

Yoğun azot gübrelemesi, toprak profilinde nitrat birikimini artırarak yeraltı suyu kirliliği riskini yükseltebilir (Hina, 2024). Chen ve arkadaşlarının 2024'teki denemelerinde, 240 kg ha⁻¹ azot uygulamasıyla 0–100 cm toprak katmanında nitrat birikiminin %180'den fazla arttığı ve aşırı sulama koşullarında bu birikimin daha derin katmanlara taşındığı belirlenmiştir. Ayrıca, denitrifikasyon süreçleri sırasında N₂O gibi güçlü sera gazlarının salınımının yoğunlaştığı bildirilmiştir (Sabina et al., 2025; Wang et al., 2020).

Çevresel etkiler toplu olarak değerlendirildiğinde, ayçiçeği tarımında aşırı azot kullanımının nitrat yıkanması, denitrifikasyon ve N₂O emisyonları yoluyla hem yeraltı suyu kirliliğine hem de iklim değişikliğine katkı sağladığı açıkça görülmektedir. Özellikle yüksek doz azot ve aşırı sulama kombinasyonlarının çevresel riskleri belirgin biçimde artırdığı, buna karşılık kontrollü salınımlı gübreler ve dengeli sulama stratejilerinin bu riskleri önemli ölçüde azalttığı bildirilmektedir. Bu sonuçlar, azot yönetiminin yalnızca verim artışı değil, çevresel sürdürülebilirlik ve ekosistem sağlığı açısından da kritik bir politika alanı olduğunu göstermektedir.

7. Sürdürülebilirlik ve En İyi Uygulamalar

Azot kaynaklı çevresel etkilerin azaltılabilmesi için kontrollü salınımlı gübreler, organik materyaller ve hassas gübreleme-sulama yöntemleri öne çıkmaktadır (G.K.M.M. et al., 2020; Ren et al., 2025). Ayrıca, gübreleme miktarının toprak analiz sonuçları ve bitkinin gerçek besin ihtiyacına göre ayarlanması, aşırı dozlardan kaçınılması açısından kritik öneme sahiptir (Cao et al., 2025).

Sürdürülebilir Gübreleme Stratejileri ve En İyi Uygulamalar

- **Hassas Tarım ve Uzaktan Algılama:** Hassas tarım uygulamaları, azot gübrelemesinin zaman ve mekân açısından en uygun şekilde yapılmasını mümkün kılmaktadır (Cao et al., 2025). Hiperspektral ve termal sensörler, insansız hava araçlarıyla gerçekleştirilen uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı modeller, geniş tarım alanlarında azot beslenme durumu ile su kullanım verimliliğinin doğru biçimde izlenmesine olanak tanımakta ve bu yöntemler, gereksiz gübre kullanımını azaltarak hem ekonomik kazanç hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır (Li et al., 2023; Nie et al., 2024).
- **Kontrollü Salınlı ve Organik Gübreler:** CRF ve SRNF gibi kontrollü salınlı gübreler, azotun bitki tarafından ihtiyaç duyulan dönemde dengeli şekilde sağlanmasına olanak tanır; bu durum hem ürün verimini yükseltir hem de çevresel sürdürülebilirliği destekler (Ren et al., 2025). Organik gübre uygulamaları ise toprak yapısını iyileştirerek mikrobiyal faaliyetleri teşvik eder ve uzun vadede kalıcı verimlilik sağlar (G.K.M.M. et al., 2020; Oyege & Balaji Bhaskar, 2023).
- **Entegre Besin Yönetimi:** Azotun fosfor, potasyum, kükürt ve mikro besinlerle dengeli şekilde verilmesi hem verim hem de kaliteyi yükseltirken çevresel olumsuzlukları azaltmaktadır (Wang et al., 2024). Kükürt ile birlikte yapılan azot uygulamaları ise yağlı tohumlarda yağ oranını ve kaliteyi artırarak sinerjik

bir etki ortaya koymaktadır (G.K.M.M. et al., 2020; Ren et al., 2025).

Bu konudaki atıfta bulunulan kaynaklar birlikte değerlendirildiğinde, ayçiçeği tarımında sürdürülebilir üretimin ancak kontrollü salınımlı gübreler, organik azot kaynakları, hassas tarım teknolojileri ve dengeli besin yönetimi yaklaşımlarının entegre edilmesiyle mümkün olabileceği görülmektedir. Tek yönlü ve yüksek girdiye dayalı gübreleme stratejilerinin kısa vadede verim artışı sağlasa da uzun vadede hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir olmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, modern ayçiçeği üretim sistemlerinde azot yönetimi, verim–kalite–çevre üçgeninde optimize edilmiş bütüncül bir tarım modeli olarak ele alınmalıdır.

8. Türkiye’de Uygulamalar ve Bulgular

Bölgesel Çalışmalar ve Deneme Sonuçları

Türkiye’de ayçiçeği üretimi ağırlıklı olarak Trakya-Marmara, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmaktadır (Orman Bakanlığı Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü, 2024). Bölgesel denemeler, optimum azot miktarının toprak özellikleri ve sulama koşullarına göre farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Trakya’da 10–12 kg da⁻¹, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu’da ise 15–20 kg da⁻¹ azot uygulamalarının en yüksek verim ve kaliteyi sağladığı bildirilmiştir (Ünlüyurt & Demir, 2022). Çeşitli ekim zamanları ve toprak işleme yöntemlerinin bitki gelişimine etkileri incelenmiş, erken ekimlerin çıkış süresini uzattığı fakat sonraki gelişim aşamalarında avantaj sağladığı görülmüştür (Haliloğlu & Aydogdu, 2024). Aydın koşullarında azot gübrelemesinin yağ asidi profili ve α -tokoferol içeriğini artırdığı; kalite parametrelerini iyileştirdiği yapılan çalışmalarda görülmüştür (Yağmur et al., 2021). Ayrıca, optimum azot uygulamalarının verim

ve kalite parametrelerini en üst seviyeye çıkardığı rapor edilmiştir (Kurdali & Attar, 2025; Ünlüyurt & Demir, 2022).

Politika, Ekonomi ve Üretici Uygulamaları

Türkiye’de gübre kullanımına yönelik politikalar, devlet destekleri ve resmi düzenlemelerle şekillendirilmektedir. 2025 yılında Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından mazot ve gübre destekleri “temel destek” çatısı altında birleştirilmiş, sürdürülebilir ve organik tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması hedeflenmiştir ve organik gübre kullanımını resmi olarak belgeleyen üreticilere ise ek teşvikler sağlanmaktadır (Orman Bakanlığı, 2025). ÇKS’ye kayıtlı çiftçiler bu kapsamda mazot giderlerinin yarısı ve gübre maliyetlerinin dörtte biri oranında destek almaktadır (T.Ü.İ.K., 2024).

Ekonomik analizler, azotlu gübre maliyetlerinin üretici gelirinde önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Dünya Bankası’nın 2025 tarihli raporunda, azotlu gübre sübvansiyonlarının verimsiz kullanımını teşvik ederek çiftlikler ve ekonomiler için maliyetleri artırdığı, aynı zamanda çevresel kırılganlığı yükselttiği vurgulanmaktadır (Zaveri, 2025).

Benzer şekilde, Avrupa Birliği’nde yapılan 2025 tarihli bir çalışmada, azotlu gübre tüketiminin üretim maliyetleri yanında dışsalılık maliyetlerini de artırdığı, optimum dozun üzerinde yapılan uygulamaların hem ekonomik kayıp hem de çevresel risk oluşturduğu rapor edilmiştir (Sobolewska & Bukowski, 2025). FAO’nun gübre piyasası raporları da, azotlu gübrelerin üretim maliyetlerinin doğrudan çiftçi gelirine yansıdığını ve aşırı kullanımın sürdürülebilirlik açısından riskli olduğunu ortaya koymaktadır (F.A.O., 2025).

Sonuç ve Öneriler

Bu derleme çalışması, ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) tarımında azotun fizyolojik, morfolojik, verimsel, kaliteye yönelik ve çevresel etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ele alarak, sürdürülebilir üretim açısından azot yönetiminin kritik rolünü ortaya koymuştur. Güncel literatür bulguları, azotun ayçiçeğinde fotosentez kapasitesinden yağ ve protein sentezine, kök gelişiminden stres toleransına kadar çok sayıda temel biyolojik süreçte belirleyici olduğunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, azotun miktarı, uygulama zamanı, formu ve diğer besin elementleriyle olan etkileşimi; verim ve kalite artışının yanı sıra çevresel risklerin şekillenmesinde de belirleyici olmaktadır.

Çalışmalar, optimum azot dozlarının ayçiçeğinde tane verimi, tabla çapı, bin tane ağırlığı ve toplam yağ verimini anlamlı düzeyde artırdığını; buna karşılık aşırı azot uygulamalarının yağ oranında düşüşe, generatif gelişimde gecikmeye ve azot kayıplarına yol açtığını ortaya koymaktadır. Özellikle kontrollü salınlı gübreler, organomineral ve organik azot kaynakları ile entegre edilen uygulamaların, azot kullanım etkinliğini artırarak hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sağladığı görülmektedir.

Derlemede ele alınan güncel moleküler ve genetik çalışmalar, ayçiçeği genotipleri arasında azot alımı ve kullanım etkinliği bakımından belirgin farklılıklar bulunduğunu ve bu farklılıkların ıslah programlarında değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca uzaktan algılama, hiperspektral görüntüleme ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemlerinin, hassas azot yönetimi açısından giderek daha önemli araçlar haline geldiği anlaşılmaktadır.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, bölgesel toprak ve iklim koşullarına bağlı olarak azot gereksiniminin değiştiği, son yıllarda ise sürdürülebilir gübreleme uygulamalarının devlet

destekleri ve politika düzenlemeleriyle teşvik edilmeye başlandığı görülmektedir. Organik ve kontrollü salınımlı gübre kullanımını belgeleyen üreticilere sağlanan ek teşvikler, çevre dostu üretim modellerinin yaygınlaştırılması açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, ayçiçeği tarımında yüksek verim ve kalite hedeflerinin çevresel sürdürülebilirlikten ödün verilmeden gerçekleştirilebilmesi, rasyonel, entegre ve teknoloji destekli bir azot yönetimi yaklaşımının benimsenmesini zorunlu kılmaktadır.

Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, ayçiçeği tarımında azot yönetiminin geliştirilmesine yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. **Toprak ve bitki temelli gübreleme:** Azot uygulama dozu ve zamanı, mutlaka toprak analizleri, bitki gelişim evreleri ve bölgesel koşullar dikkate alınarak belirlenmeli; tek tip ve aşırı gübreleme uygulamalarından kaçınılmalıdır.
2. **Kontrollü salınımlı ve organik gübrelerin yaygınlaştırılması:** Kontrollü salınımlı gübreler, organomineral ve organik azot kaynaklarının kullanımının artırılması, azot kullanım etkinliğini yükseltirken çevresel kayıpları azaltacaktır. Bu uygulamalar, destek politikalarıyla daha güçlü biçimde teşvik edilmelidir.
3. **Hassas tarım teknolojilerinin entegrasyonu:** Uzaktan algılama, insansız hava araçları, yapay zekâ ve hızlı toprak–bitki analiz sistemleri yaygınlaştırılarak, mekâna ve zamana özgü azot yönetimi stratejileri geliştirilmelidir.
4. **Dengeli besin yönetimi:** Azot uygulamaları fosfor, potasyum, kükürt ve mikro besin elementleriyle dengeli

şekilde planlanmalı; özellikle kükürt–azot sinerjisinden yağ verimi ve kalite artışı amacıyla yararlanılmalıdır.

5. **Çeşit seçimi ve ıslah çalışmaları:** Azot kullanım etkinliği yüksek, stres koşullarına daha dayanıklı genotiplerin tercih edilmesi ve bu özelliklerin ıslah programlarında önceliklendirilmesi gerekmektedir.
6. **Su–azot etkileşiminin dikkate alınması:** Kurak ve yarı kurak koşullarda azot uygulama dozu ve zamanı dikkatle ayarlanmalı; Biyoçar ve kontrollü salınlı gübre gibi uygulamalarla su ve azot kullanım etkinliği birlikte optimize edilmelidir.
7. **Çevresel izleme ve politika entegrasyonu:** Nitrat sızıntısı, sera gazı emisyonları ve toprakta azot birikimi gibi çevresel etkiler düzenli olarak izlenmeli; sürdürülebilir azot yönetimini destekleyen politikalar uzun vadeli ve bütüncül bir çerçevede uygulanmalıdır.

Bu önerilerin hayata geçirilmesi, ayçiçeği tarımında hem üretici gelirlerinin artırılmasına hem de doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayarak sürdürülebilir tarımsal üretim hedeflerine ulaşılmasını mümkün kılacaktır.

Kaynakça

Abdulraheem, M. I., Hu, J., Ahmed, S., Li, L., & Naqvi, S. M. Z. A. (2023). Advances in the use of organic and organomineral fertilizers in sustainable agricultural production. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001465>

Ahmad, R., Waraich, E. A., Ashraf, M., Ahmad, S., & Aziz, T. (2013). Does nitrogen fertilization enhance drought tolerance in sunflower? *A Review. Journal of Plant Nutrition*, 37(6), 942. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.868480>

Akimbekov, N. S., Qiao, X., Digel, I., Абдиева, Г. Ж., Ualieva, P., & Жубанова, А. А. (2020). The effect of leonardite-derived amendments on soil microbiome structure and potato yield. *Agriculture*, 10(5), 147. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050147>

Al-Tawarah, B., Alasasfa, M. A., & Mahadeen, A. Y. (2023). Efficacy of compost and vermicompost on growth, yield and nutrients content of common beans crop (*Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Ecological Engineering*, 25(2), 215. <https://doi.org/10.12911/22998993/176862>

Alami, N. E., Bourguid, M., & Kouighat, M. (2025). Advances in nitrogen use efficiency of ¹⁵N-enriched fertilizers: A thirty-year review of research and innovations for sustainable agriculture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 5202 – 5224.

Ali, A., Jabeen, N., Farruhbek, R., Chachar, Z., Laghari, A. A., Chachar, S., Ahmed, N., Ahmed, S., & Yang, Z. (2025). Enhancing nitrogen use efficiency in agriculture by integrating agronomic practices and genetic advances. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1543714. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1543714>

Allaf, M., & Berahmandzadeh, L. (2020). Response of growth indices of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to different level of deficit irrigation and nitrogen fertilizer. *Journal of Crop Nutrition Science*, 6(2), 1–12.

Ashraf, F., & Siddiqi, E. H. (2024). Mitigation of drought-induced stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) via foliar application of Jasmonic acid through the augmentation of growth, physiological, and biochemical attributes. *BMC Plant Biology*, 24(1), 592. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05273-4>

Begizew, G. (2020). Role of integrated nutrient management for enhancing nitrogen use efficiency in crop. *Open Journal of Plant Science*, 5(1), 001–012. <https://doi.org/10.17352/ojps.000017>

Canavar, Ö., & Gören, H. K. (2025). Şekerleme ayçiçeği tohumunun yağ içeriği, sükroz, α -tokoferol, yağ asidi ve amino asit bileşimleri üzerine azotlu gübrelemenin etkileri. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 31(1), 230–241. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1475152>

Cao, W., Sun, H., Shao, C., Wang, Y., Zhu, J., Long, H., Geng, X., & Zhang, Y. (2025). Progress in the study of plant nitrogen and potassium nutrition and their interaction mechanisms. *Horticulturae*, 11(8), 930. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11080930>

Chen, X., Zhang, H., Teng, A., Zhang, C., Lei, L., Ba, Y., & Wang, Z. (2023). Photosynthetic characteristics, yield and quality of sunflower response to deficit irrigation in a cold and arid environment. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1280347>

Chen, X., Zhang, H., & Wong, C. U. (2025). Dynamic monitoring and precision fertilization decision system for agricultural soil nutrients using UAV remote sensing and GIS. *Agriculture*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/agriculture15151627>

Chen, X., Zhang, H., Yu, S., Zhou, C., Teng, A., Lei, L., Ba, Y., & Li, F. (2024). Optimizing irrigation and nitrogen application strategies to improve sunflower yield and resource use efficiency in a cold and arid oasis region of Northwest China. *Frontiers in Plant Science*, 15(1429548). <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1429548>

Choi, S. J., Lee, Z., Jeong, E., Kim, S., Seo, J. S., Um, T., & Shim, J. S. (2023). Signaling pathways underlying nitrogen transport and metabolism in plants. *BMB Reports*, 56(2), 56–64. <https://doi.org/10.5483/BMBRep.2022-0178>

Coêlho, E. d. S., Souza, A. R. E. d., Lins, H. A., Santos, M. G. d., Freitas Souza, M. d., Tartaglia, F. d. L., Oliveira, A. K. S., Lopes, W. d. A. R., Silveira, L. M., Mendonça, V. v. B. J., & A.P. (2022). Efficiency of nitrogen use in sunflower. *Plants*, 11(18), 2390. <https://doi.org/10.3390/plants11182390>

Congreves, K. A., Otchere, O., Ferland, D., Farzadfar, S., Williams, S., & Arcand, M. M. (2021). Nitrogen Use Efficiency Definitions of Today and Tomorrow. *Frontiers in Plant Science*, 12, 637108. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.637108>

Donovan, T. C., Comas, L. H., Schneckloth, J. P., & Schipanski, M. E. (2024). Nitrogen and water availability effects dynamics of soil nitrogen mineralization in a maize system. In *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4474023/v1>

El-Dein, A. A. M. Z., Hefny, Y., & Rashwan, E. A. (2023). Effect of the preceding crop and organic or mineral fertilization on yield and oil components of sunflower. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 101(3), 774. <https://doi.org/10.21608/ejar.2023.191198.1329>

El-Tahlawy, Y. A., & Ali, O. (2022). Role of humic substances on growth and yield of crop plant. In *CABI eBooks* (pp. 159). <https://doi.org/10.1079/9781789248098.0011>

Erbaş, S., & Şenates, A. (2020). Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.)’nde Azot ve Kükürt Gübrelemesinin Verim ve Kaliteye Etkileri. *Süleyman Demirel Üniv. Fen Bilim. Enst. Derg.*, 24(1), 217–225. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.678524>

F.A.O. (2024). World food and agriculture – Statistical yearbook 2023. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

F.A.O. (2025). Fertilizer market developments. In *FAO Agricultural Outlook Report*.

Feng, L., Li, W., Shi, Q., Zhao, S., Hao, Y., Liu, H., & Shi, H. (2021). Effects of irrigation and nitrogen application rates on protein and amino acid content of sunflower seed kernels. *Water*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/w13010078>

Fones, H. N., & Gurr, S. J. (2017). NOXious gases and the unpredictability of emerging plant pathogens under climate change. *BMC Biology*, 15(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s12915-017-0376-4>

Futó, Z. (2019). The effect of fertilization and plant protection in sunflower (*Helianthus annuus* L.) production. *Acta Agraria Debreceniensis*, 2, 57. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/2/3696>

G.K.M.M., R., M.M., R., M.S., A., M.Z., K., H.A., M., R., D., & R.S, M. (2020). Biochar and organic amendments for sustainable soil carbon and soil health. In D. R., M. R., P. S., & C. M (Eds.), *Carbon and Nitrogen Cycling in Soil* (pp. 45–85). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7264-3_3

Ghassemi-Golezani, K., & Rahimzadeh, S. (2022). Biochar modification and application to improve soil fertility and crop productivity. In.

Gul', V. Y., Gıdık, B., & Girgel, Ü. (2019). Vermikompostun ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) çeşitlerinin fenolojik ve morfolojik özelliklerine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 817. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.546552>

Güler, M., & Ögütçü, H. (2024). Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) from rhizosphere of *Helianthus annuus* L. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 8(2), 412. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2024.2.16>

Hajano, A. A., Jamali, A. R., Memon, N. N., Wahocho, N. A., Kaleri, A. A., Jamali, S., Kalhor, A., & Hajano, G. Q. (2025). Response of different nitrogen doses on growth and flowering of ornamental sunflower (*Helianthus annuus* L. *International Journal of Biology and Biotechnology*, 22(3), 699–709.

Haliloğlu, H., & Aydogdu, A. (2024). İkinci ürün olarak yetiştirilen bazı ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) çeşitlerinin büyüme özellikleri üzerine farklı azot dozlarının etkisi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 13(1), 129–136. <https://doi.org/10.29278/azd.1393338>

Hina, N. S. (2024). Global meta-analysis of nitrate leaching vulnerability in synthetic and organic fertilizers over the past four decades. *Water*, 16(3), 457. <https://doi.org/10.3390/w16030457>

Hussain, S., Khan, M., Altaf, M. T., Shah, M. N., & Alfagham, A. T. (2025). Deciphering the morpho-physiological and biochemical response of sunflower hybrids with the application of biochar and slow-release nitrogen fertilizers under drought stress for sustainable crop production. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1541123. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1541123>

İnce Yıldız, M. N., & Öztürk, Ö. (2023). Farklı azot dozlarının yağlık ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) çeşitlerinde verim

ve bazı kalite özellikleri üzerine etkileri. *Uluslararası Mühendislik, Doğa ve Sosyal Bilimler Konferansı, I*, 631–637.

Islam, S. S., Anik, R. B., Hasan, A. K., Karim, R., & Khomphet, T. (2024). Impacts of vermicompost and farmyard manure as organic fertilizer with biochar amendment on soil quality, growth and yield of sunflower. *Indian Journal of Agricultural Research*, 58(4), 595–601. <https://doi.org/10.18805/ijare.af-848>

Jarecki, W. (2022). Effect of varying nitrogen and micronutrient fertilization on yield quantity and quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) achenes. *Agronomy*, 12(10), 2352. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102352>

Javaid, M. M., Khan, M. A., & Hussain, S. (2024). Synergistic effects of nitrogen and sulfur fertilization on chlorophyll, protein and antioxidant content in oilseed crops. *Journal of Plant Nutrition*, 47(5), 812–825. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2234567>

Jayara, A. S., Kumar, R., Pandey, P., Singh, S., Shukla, A., Singh, A. P., Pandey, S., Meena, R. L., & Reddy, K. I. (2023). Boosting nutrient use efficiency through fertilizer use management. *Applied Ecology and Environmental Research*, 21(4), 2931. https://doi.org/10.15666/aer/2104_29312952

Karaşahin, M. (2022). Farklı Gübreleme Uygulamalarının Tanelik Mısır Üzerine Etkileri. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 11(1), 59–68.

Karaşahin, M. (2014). Nitrogen uptake efficiency in plant production and negative effects of reactive nitrogen on environment. *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, 2(3), 15. <https://doi.org/10.5505/apjes.2014.38247>

Kaya, C., Şenbayram, M., Akram, N. A., Ashraf, M., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2020). Sulfur-enriched leonardite

and humic acid soil amendments enhance tolerance to drought and phosphorus deficiency stress in maize (*Zea mays* L. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62669-6>

Kaya, Y. (2020). Sunflower production in Blacksea Region: The situation and problems. *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*, 4, 147–155. <https://doi.org/10.29329/ijiaar.2020.238.15>.

Khan, Z., Yang, X.-J., Fu, Y., Joseph, S., Khan, M. N., Khan, M. A., Alam, I., & Shen, H. (2023). Engineered biochar improves nitrogen use efficiency via stabilizing soil water-stable macroaggregates and enhancing nitrogen transformation. *Biochar*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00252-8>

Kurdali, F., & Attar, J. (2025). Growth, N-uptake and yield attributes of sunflower plants grown on an aridisols in response to N-fertilizer. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 21, 86–94.

Li, Y., Zhang, H., Wang, J., & Chen, Y. (2023). Machine learning approaches for nitrogen use efficiency estimation in crops using hyperspectral data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107623. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107623>

Lin, N., Mei, X., Li, J., Jiang, R., & Zhang, W. (2024). Estimating and mapping the soil total nitrogen contents in black soil region using hyperspectral images. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1401107. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1401107>

Lipi, N. J., Maniruzzaman, M., Haque, M. Z., & F.-E.-A, A. K. M. (2023). Effect of biochar on growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in non-saline Tidal area of Bangladesh. *Journal of Agroforestry and Environment*, 16(2), 9. <https://doi.org/10.55706/jae1621>

Lu, B., Dao, P. D., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture. *Remote Sensing*, 12(16), 2659. <https://doi.org/10.3390/rs12162659>

Mahameed, S., Salih, M. A. A.-J., Al-alosi, M., Kanoosh, O., Abed, M., Abdulrazzaq, S., & Hamad, M. (2025). Effect of irrigation periods on growth and yield of sunflower varieties (*Helianthus annuus* L. In.

Martinez, D. A., Loening, U. E., Graham, M. C., & Gathorne-Hardy, A. (2021). When the Medicine Feeds the Problem; Do nitrogen fertilisers and pesticides enhance the nutritional quality of crops for their pests and pathogens? *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.701310>

Miller, P. K. (2024). Contrasting nitrogen sources impact nitrogen use efficiency and soil health under silage corn production in a semi-arid environment. *All Graduate Theses and Dissertations*.

Mohammadian, E., anesh, S. F., Garmdareh, S. E. H., & Varavipoor, M. (2023). Phytoremediation by ornamental sunflower and its effects on the properties of drainage water. In *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3307601/v1>

Nie, J., Wu, K., Li, Y., Li, J., & Hou, B. (2024). Advances in hyperspectral remote sensing for precision fertilization decision-making: A comprehensive overview. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 48(6). <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3243>

Orman Bakanlığı, T. (2025). Ayçiçeği Tarımı. In.

Orman Bakanlığı Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü, T. (2024). Ayçiçeği tarımı. In.

Oyege, I., & Balaji Bhaskar, M. S. (2023). Effects of vermicompost on soil and plant health and promoting sustainable

agriculture. *Soil Systems*, 7(4), 101.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems7040101>

Pehlivan, A., İlbaşı, A. İ., & Çil, A. N. (2022). The effects of biochar obtained from chicken litter on plant growth in different sunflower (*Helianthus annuus* L.) varieties. In *ISPEC 1st International Agricultural Research Congress April* (pp. 07–08.). Muş.

Rácz, D., & Radócz, L. (2019). Nutrient deficiency and effects of various nutrition technologies on crop health. *Acta Agraria Debreceniensis*, 2, 109. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/2/3687>

Ren, W., Li, X., Liu, T., Chen, N., Xin, M., Qi, Q., & Liu, B. (2025). Controlled-release fertilizer affects leaf nitrogen allocation and photosynthesis to improve nitrogen use efficiency and yield in the sunflower field. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1622766. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1622766>

Roba Jilo, K., Abu Edeo, M., Hunde, T. A., & Aboye, B. M. (2025). Fatty acid composition, oil yield, and oil content of sunflower (*Helianthus annuus* L.) across different pollination treatments. *Journal of Biosciences*, 50, 22. <https://doi.org/10.1007/s12038-025-00494-7>

Sabina, R. D., Paul, J., Sharma, S., & Hussain, N. (2025). Synthetic nitrogen fertilizer pollution: Global concerns and sustainable mitigating approaches. In N. Hussain, C. Y. Hung, & L. Wang (Eds.), *Agricultural nutrient pollution and climate change* (pp. 57–101). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80912-5_3

Sefaoğlu, F. (2021). Effect of organic and inorganic fertilizers or their combinations on yield and quality components of oil seed sunflower in a semi-arid environment. *Turkish Journal of Field Crops*, 26(1), 88–95. <https://doi.org/10.17557/tjfc.869335>

Sharma, L. K., & Bali, S. K. (2018). A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. *Sustainability*, 10(1), 51. <https://doi.org/10.3390/su10010051>

Sharma, S. (2024). Organic agriculture for sustainable food systems: A comprehensive review of benefits and constraints. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 12(8). <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12i8.1476-1481.6482>

Sobolewska, A., & Bukowski, M. (2025). Consumption of nitrogen fertilizers in the EU—External costs of their production by country of application. *Agriculture*, 15(3), 224. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030224>

T.Ü.İ.K. (2024). Bitkisel Üretim İstatistikleri. In.

Taşdelen, K. M., & Candoğan, B. N. (2025). Çerezlik Ayçiçeği Bitkisinin Su-Verim İlişkileri. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 39(1), 95–111. <https://doi.org/10.20479/bursauludagziraat.1601003>

Temme, A. A., Kerr, K. L., Nolting, K. M., Dittmar, E. L., Masalia, R. R., Bucksch, A. K., Burke, J. M., & Donovan, L. A. (2024). The genomic basis of nitrogen utilization efficiency and trait plasticity to improve nutrient stress tolerance in cultivated sunflower. *Journal of Experimental Botany*, 75(8), 2527–2544. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae025>

Ünlüyurt, M., & Demir, S. (2022). Azot uygulama zamanı ve dozunun ayçiçeği verim ve kalite parametrelerine etkisi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 28(3), 215–224.

Wang, H., Yang, Y., Yao, C., Feng, Y., Wang, H., Kong, Y., Riaz, U., Zaman, Q. U., Sultan, K., Fahad, S., & Deng, G. (2024). The correct combination and balance of macronutrients nitrogen, phosphorus and potassium promote plant yield and quality through

enzymatic and antioxidant activities in potato. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43, 4716 – 4734.

Wang, T., Wang, Z., Wu, Q., Zhang, J., Quan, L., Fan, B., & Guo, L. (2021). Coupling effects of water and nitrogen on photosynthetic characteristics, nitrogen uptake, and yield of sunflower under drip irrigation in an oasis. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(5), 130. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211405.6399>

Wang, Y., Ji, H., Wang, R., Hu, Y., & Guo, S. (2020). Synthetic fertilizer increases denitrifier abundance and depletes subsoil total n in a long-term fertilization experiment. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.02026>

Waqar, M., Rahman, M. H. u., Hasnain, M., Iqbal, S., Ghaffar, A., Iqbal, R., Hussain, M. I., & Sabagh, A. E. (2022). Effect of slow-release nitrogenous fertilizers and biochar on growth, physiology, yield, and nitrogen use efficiency of sunflower under arid climate. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(35), 52520. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19289-6>

Yağmur, B., Okur, B. v. O., & N. (2021). Hümk asit ve potasyum uygulamalarının ayçiçeği tohumunun besin ve yağ içeriği ve verimi üzerindeki etkisi. *ISPEC Tarım Bilimleri Dergisi*, 5(1), 156–167. <https://doi.org/10.46291/ISPECJASvol5iss1pp156-167>

Yasir, M. A., & Abed, Z. A. (2025). Response of selected genotypes of sunflower under different nitrogen levels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1538(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1538/1/012004>

Zaveri, E. (2025). Fixing nitrogen: Agricultural productivity, environmental fragility, and the role of subsidies. *Policy Research Working Paper*(11050). <https://doi.org/10.1596/1813-9450-11050>

Zhao, S., Pan, Y., Wang, Z., Wang, X., Wang, S., & Xi, J. (2024). 1-Nonene plays an important role in the response of maize-aphid-ladybird tritrophic interactions to nitrogen. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1296915>

Zheng, Y., Zhang, X., Liu, X., Qin, N., Xu, K., Zeng, R., Liu, J., & Song, Y. (2021). Nitrogen supply alters rice defense against the striped stem borer chilo suppressalis. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.691292>

BÖLÜM 3

CURRENT STATUS AND FUTURE OF SAGE (SALVIA SPP.) CULTIVATION IN TÜRKİYE

BELGİN COŞGE ŞENKAL¹

Introduction

Sage (*Salvia spp.*) is one of the genera of the Lamiaceae family rich in secondary metabolites (especially essential oils and phenolics). There are more than 900 sage species worldwide (Rahmanifar et al., 2023). Among these species, the most important cultivated species is *Salvia officinalis* L., known as medicinal sage (Tundis et al., 2020). Although medicinal sage is not a native plant of the Turkish flora, it is successfully cultivated.

Türkiye has significant potential for sage cultivation due to its location in the Mediterranean phytogeographic belt, its wide ecological diversity, and its hosting of numerous sage taxa (Celep & Doğan, 2023). To transform this potential into economic value, expanding cultivation and prioritizing variety development studies are among the priority issues. Furthermore, importance should be given to the analysis of quality parameters and the development of value-added products based on essential oils. In Türkiye, sage trade

Prof. Dr., Yozgat Bozok University, Department of Field Crops, ORCID: 0000-0001-7330-8098

takes place through both wild harvesting and cultivation (Armağan, 2023). Wild harvesting makes product-quality standardization difficult, whereas excessive and indiscriminate harvesting from natural flora places serious pressure on natural populations. Therefore, production in accordance with sustainable cultivation principles should be prioritized. This study examines the current status and future of sage cultivation in Türkiye using current literature.

Uses of Medicinal Sage

The uses of *S. officinalis* are summarized in Table 1 (Zimmermann et al., 2011; Muntaha et al., 2017; Dadfar & Bamdad, 2019; Michalak, 2023; El-Hack et al., 2025).

Table 1 Basic Information on How to Use Medicinal Sage

Area of use	Usage/product form	The part used	Main component/effect group
Herbal medicine tea	Infusion, decoction, traditional tea	Leaf, herb	Rosmarinic acid, flavonoids, phenolic diterpenes
Oral and throat health	Gargle, mouthwash, lozenge	Leaf extract	Antimicrobial, astringent and anti-inflammatory components
Uses to reduce sweating	Tea, liquid extract,	leaf	Antihidrotic effect
Skin and dermo cosmetics	Cream, gel, lotion, topical extract	Leaf extract, essential oil	1,8-cineole, camphor, borneol, phenolics
Food seasoning	Dried leaves, ground drug	Leaves	Essential oil, phenolic compounds
Functional food and natural preservative	Plant extract, essential oil, natural antioxidant additive	Leaf, essential oil	Antioxidant, antimicrobial compounds

Area of use	Usage/product form	The part used	Main component/effect group
Essential oil industry	Essential oil by hydrodistillation/steam distillation	Leaf and flowering herb	α -thujone, β -thujone, camphor, 1,8-cineole, borneol
Pharmaceutical/nutraceutical raw materials	Dry extract, liquid extract, capsule/tablet	Leaf	Phenolic acids, flavonoids, diterpenes
Aromatherapy	Essential oil inhalation	Essential oil	1,8-cineole, borneol, camphor, thujone
Cosmetics and perfumery	Fragrances, soaps, shampoos, creams, deodorants	Essential oils, leaf extracts	Volatile monoterpenes, phenolics
Veterinary/plant protection research	Natural antimicrobial, antifungal and allelopathic extract	Essential oil, leaf extract	Terpenoids and phenolics

Source: Compiled by the author from (Zimmermann et al., 2011; Muntaha et al., 2017; Dadfar & Bamdad, 2019; Michalak, 2023; El-Hack et al., 2025).

Sage Species and Varieties in Türkiye

The list of sage taxa found in the flora of Türkiye is presented in Table 2. The database includes 114 taxa, 58 of which are endemic (Bizim Bitkiler, n.d.).

Table 2 Sage Taxa in the Flora of Türkiye

Latin name	Turkish name
<i>S. absconditiflora</i> (Montbret & Aucher ex Benth.) Greuter & Burdet*	kara şalba
<i>S. adenocaulon</i> P.H.Davis*	kızlaryülmesi
<i>S. adenophylla</i> Hedge & Hub.-Mor.*	poruk
<i>S. aethiopis</i> L.	habeş adaçayı
<i>S. albimaculata</i> Hedge & Hub.-Mor.*	hoşdudak
<i>S. amplexicaulis</i> Lam.	ekin şalbası
<i>S. anatolica</i> Hamzaoğlu & A.Duran*	ana şalba
<i>S. aramiensis</i> Rech.f.	pohur
<i>S. argentea</i> L.	gümüş şalba
<i>S. aristata</i> Aucher ex Benth.	bayır şalbası
<i>S. atropatana</i> Bunge	çayır şalbası
<i>S. aucheri</i> Benth.	mavi şalba
<i>S. aucheri</i> subsp. <i>aucheri</i> Benth.*	mavi şalba
<i>S. aucheri</i> subsp. <i>canescens</i> (Boiss. & Heldr.) Celep, Kahraman & Doğan*	koramaz
<i>S. aytachii</i> Vural & Adıgüzel*	ay şalbası
<i>S. ballsiana</i> (Rech.f.) Hedge*	gerger şalbası
<i>S. blepharochlaena</i> Hedge & Hub.-Mor.*	hoş şalba
<i>S. brachyantha</i> (Bordz.) Pobed.	kazan şalbası
<i>S. brachyantha</i> subsp. <i>brachyantha</i> (Bordz.) Pobed	kazan şalbası
<i>S. brachyantha</i> subsp. <i>tankutiana</i> Bagherpour, Celep, Kahraman & Doğan*	gönül şalbası
<i>S. bracteata</i> Banks & Sol.	çoban şalbası
<i>S. cadmica</i> Boiss.	kaya şalbası
<i>S. cadmica</i> var. <i>bozkiriensis</i> Celep, Kahraman & Doğan*	
<i>S. cadmica</i> var. <i>cadmica</i> Boiss.*	kaya şalbası
<i>S. caespitosa</i> Montbret & Aucher ex Benth.*	kırk şalba
<i>S. candidissima</i> Vahl	galabor

Latin name	Turkish name
<i>S. candidissima</i> subsp. <i>candidissima</i> Vahl	galabor
<i>S. candidissima</i> subsp. <i>occidentalis</i> Hedge	ak galabor
<i>S. cassia</i> Samuelss. ex Rech.f.	kel şalba
<i>S. cedronella</i> Boiss.*	sarı şalba
<i>S. ceratophylla</i> L.	tarak şalba
<i>S. cerino-pruinosa</i> Rech.f.*	çıplak şalba
<i>S. chionantha</i> Boiss.*	kılıç şalba
<i>S. chrysophylla</i> Stapf*	boz şalba
<i>S. cilicica</i> Boiss. & Kotschy*	narin galabor
<i>S. cyanescens</i> Boiss. & Balansa*	mor galabor
<i>S. dichroantha</i> Stapf*	kutnu
<i>S. divaricata</i> Montbret & Aucher ex Benth.*	saplı şalba
<i>S. ekimiana</i> Celep & Doğan*	bey şalbası
<i>S. eriophora</i> Boiss. & Kotschy*	yünlü şalba
<i>S. ertekinii</i> Yild.*	er şalba
<i>S. euphratica</i> Montbret & Aucher.	fırat şalbası
<i>S. euphratica</i> var. <i>euphratica</i> Montbret & Aucher.*	fırat şalbası
<i>S. euphratica</i> var. <i>leiocalycina</i> (Rech.f.) Hedge*	
<i>S. forskahlei</i> L.	dolmayaprağı
<i>S. freyniana</i> Bornm. ex Freyn*	göl şalba
<i>S. frigida</i> Boiss.	sağır şalba
<i>S. fruticosa</i> Mill.	adaçayı
<i>S. glutinosa</i> L.	oklu şalba
<i>S. halophila</i> Hedge*	tuz şalbası
<i>S. hasankeyfensis</i>	
<i>S. haussknechtii</i> Boiss.*	öksüz şalba
<i>S. hedgeana</i> Dönmez*	bodur şalba
<i>S. heldreichiana</i> Boiss. ex Benth.*	ayaklı şalba
<i>S. huberi</i> Hedge*	meryemiye

Latin name	Turkish name
<i>S. hydrangea</i> DC. ex Benth.	koç şalba
<i>S. hypargeia</i> Fisch. & C.A.Mey.*	siyahot
<i>S. indica</i> L.	sultan şalba
<i>S. kronenburgii</i> Rech.f.*	van şalbası
<i>S. kurdica</i> Boiss. & Hohen. ex Benth.	kürt şalbası
<i>S. limbata</i> C.A.Mey.	maldili
<i>S. longipedicellata</i> Hedge*	duvaklı şalba
<i>S. macrochlamys</i> Boiss. & Kotschy	gevrek şalba
<i>S. macrosiphon</i> Boiss.	çöl şalbası
<i>S. marashica</i> İlçim, Celep & Doğan*	maras adaçayı
<i>S. microstegia</i> Boiss. & Balansa	yağlambaç
<i>S. modesta</i> Boiss.*	yoksul şalba
<i>S. montbretii</i> Benth.	kaba şalba
<i>S. multicaulis</i> Vahl	kürtreyhanı
<i>S. napifolia</i> Jacq.	ters şalba
<i>S. nemorosa</i> L.	gehareş
<i>S. nutans</i> L.	müsellim
<i>S. nydeggeri</i> Hub.-Mor.*	sarıelmacık
<i>S. odontochalmys</i> Hedge*	kulaklı şalba
<i>S. pachystachys</i> Trautv.	yedi şalba
<i>S. palaestina</i> Benth.	sürmeli şalba
<i>S. pilifera</i> Montbret & Aucher ex Benth.*	etekli şalba
<i>S. pinnata</i> L.	çanak şalbası
<i>S. pisidica</i> Boiss. & Heldr. ex Benth.*	benli şalba
<i>S. poculata</i> Náb.	küllü şalba
<i>S. pomifera</i> L.	acıelmaotu
<i>S. potentillifolia</i> Boiss. & Heldr. ex Benth.*	sarıporuk
<i>S. pseudeuphratica</i> Rech.f.*	keban adaçayı
<i>S. quezelii</i> Hedge & Afzal-Rafii*	limon adaçayı

Latin name	Turkish name
<i>S. recognita</i> Fisch. & C.A.Mey.*	puslu şalba
<i>S. reeseana</i> Hedge & Hub.-Mor.*	kır şalbası
<i>S. rosifolia</i> Sm.*	gülmeryemiye
<i>S. russellii</i> Benth.	kurdeşek
<i>S. sclarea</i> L.	paskulak
<i>S. sericeotomentosa</i> Rech.f.	nur şalbası
<i>S. sericeotomentosa</i> var. <i>hatayica</i> Celep & Doğan*	
<i>S. sericeotomentosa</i> var. <i>sericeotomentosa</i> Rech.f.*	nur şalbası
<i>S. siirtica</i> Kahraman, Celep & Doğan*	siirt adaçayı
<i>S. smyrnaea</i> Boiss.*	nif şalbası
<i>S. spinosa</i> L.	yabani adaçayı
<i>S. staminea</i> Montbret & Aucher ex Benth.	erkek şalba
<i>S. suffruticosa</i> Montbret & Aucher ex Benth.	kalın şalba
<i>S. syriaca</i> L.	çevlikotu
<i>S. tchihatcheffii</i> (Fisch. & C.A.Mey.) Boiss.*	kekik şalbası
<i>S. tigrina</i> Hedge & Hub.-Mor.*	musa adaçayı
<i>S. tobeyi</i> Hedge*	yayla şalbası
<i>S. tomentosa</i> Mill.	şalba
<i>S. trichoclada</i> Benth.	meşe şalbası
<i>S. verbenaca</i> L.	elmakekiği
<i>S. vermifolia</i> Hedge & Hub.-Mor.*	ince şalba
<i>S. verticillata</i> L.	dadırak
<i>S. verticillata</i> subsp. <i>amasiaca</i> (Freyn & Bornm.) Bornm.	hart şalbası
<i>S. verticillata</i> subsp. <i>verticillata</i> L.	dadırak
<i>S. virgata</i> Jacq.	fatmanaotu
<i>S. viridis</i> L.	zarif şalba
<i>S. viscosa</i> Jacq.	kızillık
<i>S. wiedemannii</i> Boiss.*	sultantacı
<i>S. xanthocheila</i> Boiss. ex Benth.	dağ şalbası

Latin name	Turkish name
<i>S. yosgadensis</i> Freyn & Bornm.*	bozok şalbası

Source: Bizim Bitkiler (n.d.; accessed May 7, 2026).

Species such as *S. fruticosa*, *S. tomentosa*, *S. cryptantha*, *S. multicaulis*, *S. aramiensis*, and *S. sclarea*, which occur in the flora of Türkiye mainly in the Aegean and Mediterranean regions, are collected from natural areas and exported. Türkiye has five registered sage varieties (Table 3). Two of these varieties are medicinal sage and three are *S. fruticosa*.

Table 3 Registered Sage Varieties in Türkiye

Variety Name	Name Applicant	Registration Date	Latin Species Name
Elif	Aegean Agricultural Research Institute	2018	<i>S. officinalis</i> L.
Karık	Aegean Agricultural Research Institute	2018	<i>S. fruticosa</i> L.
Uysal	Western Black Sea Agricultural Research Institute Directorate	2022	<i>S. fruticosa</i> L.
Turgut	Western Black Sea Agricultural Research Institute	2022	<i>S. fruticosa</i> L.
Beyhekim	Field Crops Central Research Institute	2022	<i>S. officinalis</i> L.

Source: Ministry of Agriculture and Forestry, Seed Registration and Certification Center Directorate (n.d.). Accessed May 7, 2026.

These developments are important for the transition of sage production in Türkiye from wild harvesting and local populations to cultivated production based on registered varieties. However, the number of registered varieties remains limited, and new varieties adapted to different ecologies, with stable essential-oil profiles, high leaf ratios, and high dry-herb yields, are still needed.

Sage Production in Türkiye

Current official production series indicate that sage is a medicinal-plant commodity with a small production base but high growth potential in Türkiye. Medicinal-plant production was reported as 39,312 t in 2025, 3.1% higher than in 2024 (Turkish Statistical Institute [TÜİK], 2025). Sage cultivation data are summarized in Table 4. In 2025, 2,643 t of sage were produced from 14,514 da, corresponding to a yield of 182 kg da⁻¹.

Table 4 Sage Cultivation, Production, and Yield Values in Türkiye

Years	Area (da)	Production (t)	Yield (kg da ⁻¹)
2012	54	7	130
2013	30	4	133
2014	130	19	146
2015	536	80	149
2016	3 681	411	112
2017	4 123	557	135
2018	3 951	428	108
2019	5 602	1 233	220
2020	6 655	1 271	191
2021	9 326	1 848	198
2022	12 781	2 356	184
2023	16 755	3 133	187
2024	14 914	2 329	156
2025	14 514	2 643	182

Source: Turkish Statistical Institute data portal (n.d.). Accessed May 8, 2026.

The 2025 Plant Production Statistics published by TÜİK indicate a general contraction in the agricultural sector. Total crop production decreased by 11.6% compared with the previous year, falling to 121 million t, while the “fruits, beverages, and spice plants” group decreased by 30.9% (TÜİK, 2025). Climatic events,

particularly frost and drought, together with changes in production preferences, were among the factors associated with this decline. Antalya, Denizli, and Kütahya are the leading provinces in sage cultivation in Türkiye.

Quality Parameters and Harvesting from Wild

In sage, quality should be evaluated not only by dry-herb yield but also by leaf ratio, essential-oil content, essential-oil yield, essential-oil composition, phenolic profile, microbiological load, heavy-metal residues, and pesticide residues (Bekkai et al., 2026). In export, food-supplement, and cosmetic uses, components such as α -thujone, β -thujone, camphor, and 1,8-cineole are decisive for quality and safety (Jažo et al., 2023). In Türkiye, the natural distribution areas of *Salvia species* are both an economic resource and a source of breeding material. However, intensive wild harvesting can place pressure on population structure and genetic diversity. Wild harvesting also makes quality standards difficult to meet. Therefore, the future production model should be based on a “conservation–characterization–selection–cultivation–certified production” chain rather than the uncontrolled use of natural populations. Natural populations should be considered primarily as genetic resources and breeding material, not as direct commercial collection material.

Strategic Recommendations for the Future

The future of sage cultivation in Türkiye can be summarized under four main headings. These are:

1. Standard production material and regional variety recommendations: Registered varieties should be propagated, the certified seedling system should be strengthened, and variety $\times$ environment interaction trials should be conducted across contrasting ecologies. Dry-leaf yield, essential-oil content, essential-oil yield, α - and

- β -thujone, camphor, 1,8-cineole, and rosmarinic acid should be reported together for each region.
2. Quality-based production and marketing: Producer pricing should consider not only dry-herb mass but also leaf ratio, essential-oil content, essential-oil composition, and residue analyses. For export markets, batch-based GC-MS and contaminant analyses should become a standard quality-control approach.
 3. Sustainable and contract-production models: As in the Konya example, seedling support, purchase guarantees, and contract-production models can reduce producer risk. This model may also protect natural *Salvia populations* by reducing harvesting pressure.
 4. Value-added product development: Türkiye's sage exports should not rely only on dried leaves; production should also target essential oil, standardized extracts, herbal-tea blends, natural preservatives, cosmetic raw materials, and functional-food ingredients. Claims regarding thujone content and biological activity should be supported by analytical and safety data consistent with food and health legislation.

Conclusion

In recent years, sage cultivation in Türkiye has progressed in production area, registered-variety development, and contract-production initiatives. Sage production reached 2,643 t in 2025, an increase of approximately 13.5% compared with 2024 (TÜİK, 2025). Nevertheless, production continues to face challenges related to quality standardization, species and variety verification, conservation of natural populations, the lack of regional agronomic packages, and stability of essential-oil composition. Türkiye's future competitiveness in sage will depend on disseminating registered varieties, implementing quality-based pricing, conducting multi-

location adaptation trials, establishing GC-MS/HPLC-supported quality control, breeding drought-tolerant and chemically stable genotypes, and developing value-added products. With appropriate planning, sage can become a sustainable, export-oriented, high-value medicinal and aromatic crop in suitable Mediterranean, Aegean, and Central Anatolian transition-zone environments.

References

Armağan, M. (2023). Tunceli (Türkiye)'de adaçayı yetiştiriciliği potansiyeli. *Ereğli Tarım Bilimleri Dergisi*, 3(2), 97–110. <https://doi.org/10.54498/ETBD.2023.27>

Bekkai, D., Miceli, N., Taviano, M. F., Coppolino, C., Cacciola, F., Mondello, L., & Trifilò, P. (2026). Phenolic profile and biological evaluation of *Salvia ceratophylloides* Ard.: A novel source of rosmarinic acid. *Chemistry & Biodiversity*, 23(2), e03276. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202503276>

Bizim Bitkiler (n.d.). *Türkiye bitkileri: Salvia taxa*. Retrieved May 7, 2026, from <https://bizimbitkiler.org.tr/yeni/demos/technical/>

Celep, F., & Doğan, M. (2023). The genus *Salvia* in Türkiye: Morphology, ecology, phytogeography, endemism, and threat categories. In *Medicinal and aromatic plants of Türkiye* (pp. 107–120). Springer International Publishing.

Dadfar, F., & Bamdad, K. (2019). The effect of *Salvia officinalis* extract on the menopausal symptoms in postmenopausal women: An RCT. *International Journal of Reproductive BioMedicine*, 17(4), 287–292. <https://doi.org/10.18502/ijrm.v17i4.4555>

El-Hack, M. E. A., Rudayni, H. A., Aldhalmi, A. K., Youssef, I. M., Arif, M., Alawam, A. S., Allam, A. A., Khafaga, A. F., Ashour, E. A., & Khan, M. M. H. (2025). Beyond traditional uses: Unveiling the epigenetic, microbiome-modulating, metabolic, and nutraceutical benefits of *Salvia officinalis* in human and livestock nutrition. *Journal of Functional Foods*, 128, 106843.

Jažo, Z., Glumac, M., Paštar, V., Bektić, S., Radan, M., & Carev, I. (2023). Chemical composition and biological activity of *Salvia officinalis* L. essential oil. *Plants*, 12(9), 1794. <https://doi.org/10.3390/plants12091794>

Michalak, M. (2023). Plant extracts as skin care and therapeutic agents. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(20), 15444. <https://doi.org/10.3390/ijms242015444>

Ministry of Agriculture and Forestry, Seed Registration and Certification Center Directorate (n.d.). *Registered sage varieties*. Retrieved May 7, 2026, from <https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM/TTSM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=85>

Muntaha, F., Zena, K., & Sabah, F. (2017). Anti-inflammatory effect of sage (*Salvia officinalis*) extracts on oral health. *Iraqi Dental Journal*, 39, 1–6.

Rahmanifar, B., Livadariu, O., & Cornea, C. P. (2023). Review on secondary metabolites in *Salvia spp.* *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*, 27(1), 22–29.

Tundis, R., Leporini, M., Bonesi, M., Rovito, S., & Passalacqua, N. G. (2020). *Salvia officinalis* L. from Italy: A comparative chemical and biological study of its essential oil in the Mediterranean context. *Molecules*, 25(24), 5826. <https://doi.org/10.3390/molecules25245826>

Turkish Statistical Institute (n.d.). *Sage cultivation, production, and yield statistics*. Retrieved May 8, 2026, from <https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/statistical-themes>

Turkish Statistical Institute (2025). *Plant production statistics, 2025*. <https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/53939>

Zimmermann, B. F., Walch, S. G., Tinzoh, L. N., Stühlinger, W., & Lachenmeier, D. W. (2011). Rapid UHPLC determination of polyphenols in aqueous infusions of *Salvia officinalis* L. (sage tea). *Journal of Chromatography B*, 879(32), 2459–2464.

BÖLÜM 4

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND ESSENTIAL OIL PROFILE INVESTIGATION OF *SALVIA VERTICILLATA* L.

BELGİN COŞGE ŞENKAL¹

Introduction

The genus *Salvia* L. is one of the largest genera in the Lamiaceae family, containing more than 900 species worldwide (Jažo, et al., 2023). The Lamiaceae family is also prominent in the flora of Türkiye, with 48 genera and 782 taxa, approximately 44% of which are endemic. The genus *Salvia* has particularly high taxonomic diversity in Türkiye (Güner, Aslan, Ekim, Vural, & Babaç, 2012).

Although *Salvia verticillata* L. is not as widely used commercially as *S. officinalis* L. or *S. fruticosa* Mill., it has attracted attention because of its phenolic compounds, rosmarinic acid, salvianolic acids, and sesquiterpene-rich volatile fraction (Ivanova, Dzhakova, Staynova, & Ivanov, 2024). *Salvia verticillata* L. is a perennial herbaceous species naturally distributed in many regions of Türkiye and is represented by two subspecies: *S. verticillata*

Prof. Dr., Yozgat Bozok University, Department of Field Crops, ORCID: 0000-0001-7330-8098

subsp. *amasiaca* (Freyn & Bornm.) Bornm. and *S. verticillata* subsp. *verticillata* L. (Güner, Aslan, Ekim, Vural, & Babaç, 2012).

Essential oils are mixtures of natural, low-molecular-weight, volatile compounds found in plant organs such as flowers, leaves, fruits, seeds, bark, roots, and rhizomes (Bunse, et al., 2022). Chemically, they mainly contain monoterpenes, sesquiterpenes, phenylpropanoids, aldehydes, ketones, alcohols, esters, and oxides. These secondary metabolites contribute to plant defense, pollinator attraction, allelopathy, and adaptation to environmental stress (Chouhan, Solanki, Jodha, Parihar, & Shekhawat, 2026). Essential-oil content and composition vary with species, genotype, plant organ, developmental stage, ecological conditions, harvest time, drying method, and extraction technique (Baydar, 2022). Essential-oil content is commonly determined by Clevenger-type hydrodistillation, whereas composition is generally analyzed using GC-MS or GC-FID (Baj, et al., 2013; Fagbemi, Aina, & Olajuyigbe, 2021). Essential oils are used in the food, cosmetic, perfumery, pharmaceutical, and biopesticide industries and are investigated for antimicrobial, antioxidant, antifungal, and insecticidal activities (Ivanova, et al., 2025). In this study, the morphological characteristics and essential-oil profile of *S. verticillata* subsp. *amasiaca* were considered together, and the biological activities of the principal components were evaluated using published literature.

Taxonomy and Distribution

Taxonomy of the taxon *S. verticillata* subsp. *amasiaca* (Freyn & Bornm.) Bornm.:

Kingdom: Plantae

Division: Magnoliophyta

Subclass: Magnoliidae

Family: Lamiaceae

Genus: *Salvia*

Species: *Salvia verticillata*

Subspecies:

S. verticillata subsp. *amasiaca* (Freyn & Bornm.) Bornm.

S. verticillata subsp. *verticillata* L.

This subspecies has a distribution area throughout Türkiye, except for the coastal areas of the Aegean Region and the Southeastern Anatolia Region (Figure 1).

Figure 1. Distribution of Salvia verticillata subsp. amasiaca in Türkiye



Note. 1a = Istranca Region; 1b = Çatalca-Kocaeli Region; 1c = Ergene Region; 1ç = Southern Marmara Region; 2a = Western Black Sea Region; 2b = Central Black Sea Region; 2c = Eastern Black Sea Region; 3b = Inner Western Anatolia Region; 4a = Upper Sakarya Region; 4b = Middle Kızılırmak Region; 4c = Upper Kızılırmak Region; 4ç = Konya Region; 5a = Upper Euphrates Region; 5b = Erzurum-Kars Region; 5c = Upper Murat-Van Region; 5ç = Hakkari Region; 6a = Antalya Region; 6b = Adana Region.

Source: (Celep & Kahraman, 2012), Bizim Bitkiler (accessed May 18, 2026).

Distribution: Central Europe–Western/Central Asia line; Türkiye is within its natural range

Ecological trends: Dry grasslands, steppe-like areas, roadsides, open habitats

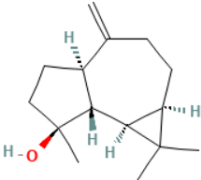
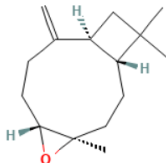
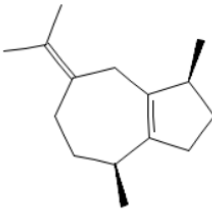
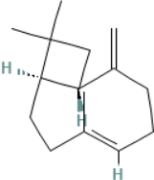
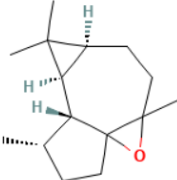
Morphological Characteristics

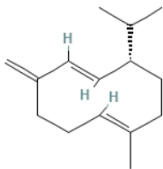
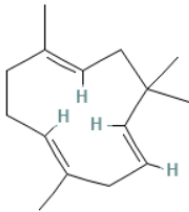
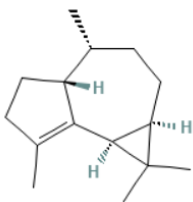
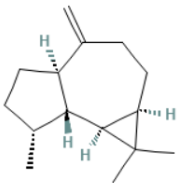
S. verticillata L. is a perennial herbaceous plant that generally reaches 15–80 cm in height and branches in its upper part. Leaves are simple and hairy. Flowers are arranged in terminal or axillary inflorescences in spaced verticillasters, with approximately 12–30 flowers per node. The corolla is violet, blue-violet, lilac, or rarely white. Seeds are oval to slightly elongated, smooth, and light brown. In subsp. *amasiaca*, flowering occurs from May to September. The taxon occupies a broad range of habitats, including rocky slopes, *Stipa steppes*, sandy areas, meadows, *Quercus* and *Pinus* woodlands, fields, and roadsides, at elevations of approximately 20–2300 m (Tursun, 2019; Doğan, Hayta, Yuce, & Bagci, 2015; Ivanova, Dzhakova, Staynova, & Ivanov, 2024).

Essential Oil Yield and Chemical Profile

The aerial parts (herba) of *S. verticillata* subsp. *amasiaca* were collected at full flowering and shade-dried. Essential oil was obtained from dried samples using a Clevenger apparatus by hydrodistillation, and its chemical composition was analyzed by GC-MS. The main components identified in the essential oil are presented in Table 1.

Table 1. Main Components of the Essential Oil of S. verticillata subsp. amasiaca

Component	Molecular formula	Chemical structure
Spathulenol	$C_{15}H_{24}O$	
Caryophyllene oxide	$C_{15}H_{24}O$	
β -Guaiene	$C_{15}H_{24}$	
Caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	
Ledene oxide	$C_{15}H_{24}O$	

Component	Molecular formula	Chemical structure
Germacrene D	C ₁₅ H ₂₄	
α -Humulene	C ₁₅ H ₂₄	
α -Gurjunene	C ₁₅ H ₂₄	
Aromadendrene	C ₁₅ H ₂₄	
Essential oil content (%)	0.04	

Source: Chemical structures were obtained from PubChem (National Center for Biotechnology Information, 2026).

The essential oil of *S. verticillata* subsp. *amasiaca* consisted mainly of sesquiterpene hydrocarbons and oxygenated sesquiterpenes. The combined occurrence of spathulenol, β -caryophyllene, caryophyllene oxide, germacrene D, and

aromadendrene supports further antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory, and cytotoxicity testing (Cianfaglione, et al., 2017; El-Bondkly, et al., 2022; Giuliani, et al., 2023; Alves, et al., 2024; Bhattarai, et al., 2024; Corzo, Calvo, Lizarraga, Marcial, & Mercado, 2025; Francisco, et al., 2025; Pham, Le, Nguyen, Do, & Tran, 2025; Trang, Son, & Giang, 2025).

Table 2. Biological Activities Reported for the Major Components of *S. verticillata* subsp. *amasiaca* Essential Oil

Component	Main biological activities reported in the literature
Spathulenol	Antioxidant, anticholinesterase, antinociceptive, antihyperalgesic, antimycobacterial, antiproliferative/cytotoxic
Caryophyllene oxide	Antifungal, antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory, cytotoxic, insecticide/repellent
β -Guaiene	Antimicrobial, anti-inflammatory, antitumor and antifeedant potential.
Caryophyllene	Anti-inflammatory, antioxidant, antimicrobial, analgesic, antitumor, immunomodulatory
Ledene oxide	Antimicrobial and antioxidant effects
Germacrene D	Antimicrobial, insecticidal, anti-inflammatory, antitumor/cytotoxic
α -Humulene	Anti-inflammatory, antitumor, antioxidant, antimicrobial
α -Gurjunene	Antimicrobial, antioxidant
Aromadendrene	Antioxidant, antimicrobial, antiproliferative, antifungal; insecticidal potential.

Source: Compiled by the author from (Cianfaglione, et al., 2017; El-Bondkly, et al., 2022; Giuliani, et al., 2023; Alves, et al., 2024; Bhattarai, et al., 2024; Corzo, Calvo, Lizarraga, Marcial, & Mercado, 2025; Francisco, et al., 2025; Pham, Le, Nguyen, Do, & Tran, 2025; Trang, Son, & Giang, 2025).

Conclusion

The flora of Türkiye has substantial medicinal- and aromatic-plant diversity and is an important diversity center for *Salvia* L. *Salvia* species have potential uses in pharmaceutical, cosmetic, food,

and phytotherapeutic applications because of their essential oils, phenolic compounds, terpenoids, and other secondary metabolites. *Salvia verticillata* subsp. *amasiaca*, which is naturally distributed in Türkiye, is notable for its sesquiterpene-rich essential oil. Determining its chemical composition, validating its biological activity, and developing sustainable utilization strategies are important both for conserving Türkiye's plant genetic resources and for advancing medicinal- and aromatic-plant research.

References

Alves, I., Martins, C., Cacciatore, F., Silva Malheiros, P., Marczak, L., Flôres, S., & Mercali, G. (2024). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from sucupira (*Pterodon pubescens*) fruit: Chemical characterization and antimicrobial activity. *Journal of Food Process Engineering*, 47(10).

Baj, T., Ludwiczuk, A., Sieniawska, E., Skalicka-Woźniak, K., Widelski, J., Zięba, K., & Głowniak, K. (2013). GC-MS analysis of essential oils from *Salvia officinalis* L.: Comparison of extraction methods of the volatile components. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 70, 35–40.

Baydar, H. (2022). *Tıbbi ve aromatik bitkiler bilimi ve teknolojisi*. Nobel Akademik Yayıncılık.

Bhattarai, K., Bhattarai, R., Pandey, R., Paudel, B., Bhattarai, H., & Karki, B. (2024). A comprehensive review of the phytochemical constituents and bioactivities of *Ocimum tenuiflorum*. *The Scientific World Journal*, 2024, Article 8895039.

Bunse, M., Daniels, R., Gründemann, C., Heilmann, J., Kammerer, D., Keusgen, M., . . . Wink, M. (2022). Essential oils as multicomponent mixtures and their potential for human health and well-being. *Frontiers in Pharmacology*, 13, Article 956541.

Celep, F., & Kahraman, A. (2012). *Salvia*. Retrieved from <http://www.bizimbitkiler.org.tr>

Chouhan, G., Solanki, N., Jodha, P., Parihar, S., & Shekhawat, G. (2026). Influence of environmental stress on secondary metabolite production in plants. In *Secondary metabolites in stress and disease management: A natural alternative developments in applied microbiology and biotechnology* (pp. 315–328).

Cianfaglion, K., Blomme, E., Quassinti, L., Bramucci, M., Lupidi, G., Dall'Acqua, S., & Maggi, F. (2017). Cytotoxic essential oils from *Eryngium campestre* and *Eryngium amethystinum* (Apiaceae) growing in Central Italy. *Chemistry & Biodiversity*, 14(7).

Corzo, F., Calvo, F., Lizarraga, E., Marcial, G., & Mercado, M. (2025). Essential oil profiles of *Lippia turbinata* (Verbenaceae) from Argentina: Insights from a systematic review and meta-analysis. *ChemistryOpen*, 14(11).

Doğan, G., Hayta, S., Yuce, E., & Bagci, E. (2015). Composition of the essential oil of two *Salvia* taxa (*Salvia sclarea* and *Salvia verticillata* subsp. *verticillata*) from Türkiye. *Natural Science and Discovery*, 1(3), 62–67.

El-Bondkly, E., Al Shammari, B., El-Gendy, M., Alsafari, I., El-Bondkly, A., El-Shenawy, F., . . . Imran, A. (2022). Phytochemical screening, antifungal, and anticancer activities of medicinal plants *Thymelaea hirsuta*, *Urginea maritima*, and *Plantago albicans*. *BioMed Research International*, 2022, Article 9544915.

Fagbemi, K., Aina, D., & Olajuyigbe, O. (2021). Soxhlet extraction versus hydrodistillation using the Clevenger apparatus: A comparative study on the extraction of a volatile compound from *Tamarindus indica* seeds. *The Scientific World Journal*, 2021, Article 5961586.

Francisco, I., Jacinto, M., Mazza, M., Pires, R., Junqueira, M., Tavares, D., . . . Silva, V. (2025). Chemical composition, antifungal, and cytotoxic activities of essential oil from *Brunfelsia uniflora* leaves. *Chemistry & Biodiversity*, 22(8).

Giuliani, C., Bottoni, M., Santagostini, L., Spada, A., Papini, A., Milani, F., & Fico, G. (2023). *Teucrium fruticans* L., a multi-

scale study: From trichomes to essential oil. *Chemistry & Biodiversity*, 20(4).

Güner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M., & Babaç, M. (2012). *Türkiye bitkileri listesi: Damarlı bitkiler*. Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını.

Ivanova, S., Dzhakova, Z., Staynova, R., & Ivanov, K. (2024). *Salvia verticillata* (L.): Biological activity, chemical profile, and future perspectives. *Pharmaceuticals*, 17(7), Article 859.

Ivanova, S., Gvozdeva, Y., Staynova, R., Grekova-Kafalova, D., Nalbantova, V., Benbassat, N., . . . Ivanov, K. (2025). Essential oils: A review of the natural evolution of applications and some future perspectives. *Pharmacia*, 72, 1–12.

Jažo, Z., Glumac, M., Paštar, V., Bektić, S., Radan, M., & Carev, I. (2023). Chemical composition and biological activity of *Salvia officinalis* L. essential oil. *Plants*, 12(9), Article 1794.

National Center for Biotechnology Information. (2026). *PubChem compound summaries*. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound>

Pham, T., Le, A., Nguyen, K., Do, B., & Tran, G. (2025). Investigation of chemical constituents, anti-oxidant, anti-inflammatory, and anti-cancer effects of the essential oil isolated from *Nosema cochinchinensis* leaves. *Chemistry & Biodiversity*, 22(12).

Trang, V., Son, N., & Giang, P. (2025). Chemical analysis, biological activities, and in silico approach of essential oils from leaves, stem barks, and roots of *Eupatorium clematideum*. *Chemistry & Biodiversity*, 22(9).

Tursun, A. (2019). *Salvia verticillata* L. (Dadırac)'nın tohum dormansisinin kırılmasında farklı uygulamaların etkileri.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi,
22, 30–37.

BÖLÜM 5

KÜRESEL ISINMA VE BUĞDAY TARIMINDA RİSKLER

BURHAN KARA¹

Giriş

Buğday tüm dünyada insanların temel besin maddesi durumundadır. Bunun yanında sanayi hammaddesi (makarna, nişasta, pastacılık) ve hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Buğday tüm dünyada çoğunlukla yağışa dayalı koşullarda yetiştirilmektedir. Türkiye’de buğday tarımı %75 oranında doğal yağışlara bağlı olarak (sulanmadan) yetiştirilmektedir. Küresel ısınmaya bağlı olarak kuraklık zararından en fazla tahıllar (buğday, arpa, yulaf, çavdar), yemeklik baklagiller ve yağ bitkileri vb. gibi doğal yağışlara bağlı olarak yetiştirilen tüm bitkiler olumsuz etkilenecek, verim ve kalite önemli ölçüde düşecektir. Türkiye’de buğdayın yıllık ortalama üretimi, yıllara göre değişmekle birlikte 19.0 ile 22.0 milyon ton arasında değişmektedir (TÜİK, 2025). TÜİK verilerine göre 1970 ve 2005 yılları arasında 9.2 ile 9.6 milyon ha arasında değişen buğday ekim alanı, 2005 den sonra düşmeye başlamış ve 2025 yılında 6.6

¹Prof. Dr. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü-Isparta. Orcid No: 0000-0002-4207-0539

milyon hektara kadar düşmüştür. Azalan ekim alanı ve artan nüfus oranı göz önüne alındığında gelecekte gıda ihtiyacının karşılanması kuvvetle muhtemeldir.

Yerkürede çok uzun jeolojik tarih boyunca iklim sisteminde doğal yollarla birçok değişiklik olmuştur. Jeolojik devirlerdeki iklim değişiklikleri, özellikle buzul hareketleri ve deniz seviyesindeki değişimler yoluyla yalnızca dünya coğrafyasını değiştirmekle kalmamış, ekolojik sistemlerde de kalıcı değişiklikler oluşturmuştur. Geçmişteki bu iklimsel farklılıklar ekolojik döngü içerisinde olmuştur ve doğa kendini yenileyebilmiştir. Ancak günümüz iklim değişikliği ve küresel ısınma çok büyük oranda insan eliyle doğanın tahrip edilmesi, aşırı sömürülmesi ve hatalı kullanımı nedeniyle ortaya çıkmıştır. Günümüzde azalan tarım alanları, artan nüfus oranı, konut baskısı ve yükselen sanayinin neden olduğu iklim değişikliği ve küresel ısınmanın geriye dönüşü ve doğanın kendini yenilemesi zorlaşmıştır. Küresel ısınmaya bağlı olarak kar yağışının azalması, kara ve deniz buzullarının erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi, iklim kuşaklarının yer değiştirmesi, şiddetli hava olayları, taşkınların ve sellerin daha sık oluşması ve etkilerinin kuvvetlenmesi, kuraklık, çölleşme, salgın hastalıklar ve tarım zararlıları; insan yaşamını, sosyoekonomik sektörleri, ekolojik sistemleri ve tarımsal alanları doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyebilecek önemli riskler oluşturacağı öngörülmektedir (IPCC, 2007:185).

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren dünya ikliminin yavaş yavaş değiştiği, bu değişimin kara ve deniz yüzeylerindeki ortalama sıcaklığı artırdığı ve bazı bölgelerde ortalama yağış miktarı azalırken, bazılarında arttığı, buzulların eridiği ve deniz seviyesinin yükselmesi şeklinde kendini göstermektedir (IPCC, 2007:185). Küresel ısınmaya bağlı olarak yeryüzünün bazı bölgelerinde meteorolojik veriler uzun yıllar ortalamalarından farklılık göstermeye başlamıştır ve değişim devam etmektedir. Bu farklılık; genel olarak sıcak günlerin sayısının artacağı, soğuk günlerin sayısının azalacağı,

dünyanın pek çok yerinde artan neme bağlı olarak şiddetli yağışların ve fırtınaların daha sık görüleceği, uzun ve sıcak geçecek olan yazların şiddetli kuraklıkları da beraberinde getireceği, kış aylarının daha ılık geçeceği, kar yağışının azalacağı, çölleşme ve iklime bağlı felaketlerin daha güçlü ve sık görüleceği olarak kendini göstereceği öngörülmektedir (IPCC, 2001:123).

Hükümetler arası iklim değişiklikleri panelinin (IPCC, 2007:185) Dördüncü Değerlendirme Raporuna göre, ortalama yüzey sıcaklığı, 1906-2005 döneminde 0.74 °C artmıştır. 1901-2005 döneminde Amerika'nın doğu bölgelerinde, Avrupa'nın kuzeyi ve Asya'nın kuzeyi ile iç kesimlerinde yağışlarda önemli artışlar, Akdeniz havzası, Afrika'nın orta ve güneyi ile Asya'nın güneyinde bazı kesimlerde önemli azalmalar belirlenmiştir. Son elli yılda ekstrem sıcaklıklarda yaygın ölçekli değişiklikler yaşanmış, atmosferik su buharında gözlenen artış ve ısınma ile tutarlı olarak kuvvetli yağış olaylarının sıklıklarında artış saptanmıştır (Demir et al., 2008:8).

Çeşitli matematiksel iklim modellerinin sonuçlarına göre, iklimde başlayan değişikliklerin gelecekte de süreceğini göstermektedir. Hükümetler arası iklim değişiklikleri panelinin (IPCC) 2001 yılı raporuna göre atmosfere salınan sera gazları (CO₂, CH₄, CFCs, N ve O) sonucunda önümüzdeki yüz yıl içerisinde sıcaklıkların 1.4 ile 5.8 °C arasında artış göstereceği belirtilmiştir. Aynı raporda ortaya atılan senaryolara göre, küresel sıcaklıkta 2100 yılına kadar ortalama 1 °C ile 3.5 °C'lik bir artışı olacağı bildirilmiştir. Bu derleme çalışmasında, dünyanın en fazla ekilen, tüketilen ve ticareti yapılan temel besin maddesi olan buğday tarımı üzerine küresel kuraklığın oluşturduğu riskler üzerinde durulmuştur.

Küresel Isınmanın Nedenleri ve Kanıtlar

Küresel Isınma: Atmosferde biriken başta CO₂ olmak üzere, diğer sera gazlarının (metan-CH₄, azot oksit-N₂O ve flora

clora karbonlar-CFC5, vb.) uzun dalga boylu ışınları tutması nedeniyle ortalama yüzey sıcaklıklarında meydana gelen yükselme küresel ısınma olarak adlandırılmaktadır (Öztürk, 2002:18, Türkeş, 2003:12).

Sera etkisi: Güneşten gelen ışınlar yeryüzünden yansdıktan sonra (karasal radyasyon) bir kısmı doğrudan atmosfer tarafından uzaya verilirken, bir kısmı da yeryüzü tarafından emilir. Atmosferdeki gazların kısa dalgalı güneş ışınlarına karşı geçirgen, yeryüzünden verilen uzun dalgalı radyasyona karşı ise biriken sera gazları nedeniyle daha az geçirgen olması sonucunda, yeryüzüne yakın kısımların beklenenden daha fazla ısınması olayına atmosferin sera etkisi denilmektedir (Öztürk, 2002:18).

Sera gazları: Küresel ısınmaya yol açan sera gazları; esas olarak, fosil yakıtlarından, sanayi, ulaştırma, arazi kullanımı değişikliği, katı atık yönetimi ve tarımsal etkinliklerden kaynaklanmaktadır. Doğal sera gazlarının en önemlileri; su buharı (H₂O), karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazotmonoksit (N₂O) ve ozon (O₃) gazlarıdır. CO₂'in küresel ısınmaya neden olan sera gazları içerisindeki payının %70 olduğu kabul edilmektedir. Sera etkisi yaratan diğer bir etken ise aerosollerdir. Aerosoller doğal veya antropojenik yollarla atmosfere karışan, çok küçük tanecikli ve havada asılı duran katı veya sıvı parçacıklardır (Türkeş, 2003:12).

Kuraklık: Bitkinin vejetasyon süresinin herhangi bir döneminde, gelişmesinde gözle görülür bir şekilde gerilmemeye neden olan nem eksikliğine denir.

Sıcaklık artışının bir kaç on yıl arka arkaya görülen geçici bir olgu mu olduğu, yoksa yüzlerce yıldır devam eden sürekli ve düzenli bir artış eğiliminin mi söz konusu olduğu tartışmaları devam etmektedir (IPCC, 2007:185).

- Dünya yüzeyinin ortalama sıcaklığı 20. yüzyıl boyunca 0.6 °C kadar, son kırk yıldır atmosferin 8 km’lik alt bölümünde ise 0.15 °C artmıştır.
- Kar yağışı ve buzlanma azalmıştır.
- 20. yüzyılda kuzey yarıkürede nehir ve göllerdeki yıllık buzlanma süresi 2 hafta kadar kısalmıştır.
- Kuzey kutup denizindeki buzların kalınlığında, yaz ve sonbahar dönemlerinde %40’a varan eksilme vardır.
- 20. yüzyıl boyunca dünya deniz seviyesi 0.1 ila 0.2 m yükselmiştir.
- 20. yüzyılda Kuzey yarıkürenin orta ve yüksek enlemlerinde yağış miktarı her on yılda bir %0.5 ila 1 arasında artmıştır. Buna karşılık, Kuzey yarıkürenin dönence altı bölgelerinde (10° N ile 30° N) yağış miktarı her on yılda bir %0.3 oranında azalmıştır.
- 1950’den beri aşırı düşük sıcaklık sıklığında azalma görülürken, aşırı sıcaklıkların sıklığında artış söz konusu olmuştur.
- El-Nino-Güney salınımı olayının sıcak dönemleri, geçen 100 yıla oranla, 1970’lerin ortasında beri daha sık, kalıcı ve şiddetli olmaya başlamıştır. Son yıllarda, Asya ve Afrika’nın bazı bölgeleri olduğu gibi, kuraklığın sıklık ve şiddetinde artış gözlemlenmiştir (Can, 2006:262; IPCC, 2007:185; Anonim, 2013:17).

Gelecekte görülebilecek iklim değişikliği ile ilgili olarak, çeşitli kaynaklarca daha çok sera gazı emisyonları dikkate alınarak senaryolar üretilmektedir. Çeşitli matematiksel iklim modellerinin sonuçlara göre, iklimde başlayan değişikliklerin gelecekte de süreceğini göstermektedir. Sanayileşme, fosil yakıtlarının miktarının giderek artması, mera ve orman alanlarının azalması, tarım alanlarının imara açılması vb. küresel ısınmayı tetikleyen, CO₂ ve çeşitli zararlı gazların salınımını artıran etkinliklerinin devam etmesi hâlinde iklim değişikliklerinin yaşanacağı kaçınılmazdır. Hükümetler arası iklim değişiklikleri panelinin (IPCC) 2001 yılı

raporuna göre atmosfere salınan sera gazları (CO, CH, CFCs, N ve O) sonucunda önümüzdeki yüz yıl içerisinde sıcaklıkların 1.4 ile 5.8 °C arasında artış göstereceği belirtilmiştir. Aynı raporda ortaya atılan senaryolara göre, küresel sıcaklıkta 2100 yılına kadar ortalama 1 °C ile 3.5 °C'lık bir artışı olacağı bildirilmiştir. Buna göre, en iyimser koşullarda her on yılda yaklaşık 0.1 derecelik bir sıcaklık artışı görülecektir. Bunun sonucunda; deniz seviyesinin yükselmesi, sıcaklık ve yağış rejimlerinin değişmesinden kaynaklanan afet boyutlarına ulaşan çok değişik sonuçlar yaşanacaktır. Sıcak günlerin sayısı artacak, soğuk günlerin sayısı azalacak, dünyanın pek çok yerinde artan neme bağlı olarak şiddetli yağışlar ve fırtınalar daha sık görülecek, uzun ve sıcak geçecek olan yazlar şiddetli kuraklıkları da beraberinde getirecek, çölleşme, şiddetli yağışlar ve sel baskınları daha güçlü ve daha sık görülür olacaktır (IPCC, 2001:123; Öztürk, 2002:18).

Türkiye’de Buğday Üretimi, Tüketimi ve İhtiyaç

Türkiye’de TÜİK verilerine göre 1970 ve 2005 yılları arasında 9.2 ile 9.6 milyon ha arasında değişen buğday ekim alanı, 2005 den sonra düşmeye başlamış ve 2015 yılında 7.86 milyon hektara ve 2025 yılında 6.83 milyon hektara kadar düşmüştür. Tarım alanları üzerine açılan yeni yerleşim alanları gelecekte hem gıda sorununa, hem de üzerinde yaşam için gerekli olan barınma, beslenme, ısınma, ulaştırma, yol yapımı vb. gibi faaliyetlerden dolayı kömür ve petrol ürünlerinin emisyonları nedeniyle atmosferin alt tabakasının ısınmasına neden olmaktadır.

Türkiye’de yıllık buğday üretimi 21 milyon tondur (TÜİK, 2025), yılda kişi başına ortalama 159.8 kg buğday tüketilmektedir (Anonim, 2025). Türkiye nüfusu 2026 yılında 86 92 168 olarak sayılmış olup, yılda (86 milyon nüfus x 159.8 kg/yıl tüketim=13.7 milyon ton/yıl) 13.7 milyon ton tüketim için buğdaya ihtiyaç vardır. Her yıl yaklaşık 7.86 milyon ha’lık buğday ekim alanına dekara 20

kg tohum ekilmektedir (7.86 milyon ha x 20 kg/da=1.6 milyon ton/yıl) 1.6 milyon ton tohumluk gerekmektedir. Her yıl hasat, harman, depolamada ve taşınma sırasındaki oluşan kayıplar % 3 olduğu bildirilmektedir. Bu her yıl 0.6 milyon ton buğday kaybı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak her yıl, 13.7 milyon ton tüketim+1.6 milyon ton tohumluk+0.6 milyon ton hasat, harman kayıpları=15.9 milyon ton buğdaya ihtiyaç vardır.

- Türkiye’de günlük gıdasının ve enerji gereksiniminin yaklaşık %40-50 kadarını buğday temelli gıdalardan sağlamaktadır,

- Türkiye’de günlük 101 milyon, yılda 9.2 milyon ton ekmek üretilmektedir. Türkiye’de günlük 6 milyon ekmek bayatlayarak israf edilmektedir,

- Kişi başına düşen yıllık ekmek tüketimi yaklaşık 120 kilogram ile Türkiye dünyada ilk sıralarda yer almaktadır (Ulusal Beslenme Konseyi Emek Raporu, 2025).

Türkiye yıllık buğday üretimi bakımından şimdilik kendine yeter durumdadır. Kuraklığa ve ekim alanlarındaki azalışa bağlı olarak buğday üretiminin düşeceği kuvvetli muhtemeldir. Hızla artan nüfus oranının yanı sıra her yıl ülkemize gelen milyonlarca turist sayısı da düşünülürse, gelecekte buğday ihtiyacının karşılanmasında güçlükler çekileceği düşünülmektedir.

Küresel Isınmanın Buğday Tarımında Oluşturduğu/ Oluşturacağı Riskler

Tarımsal üretim; büyük oranda doğal ekolojik koşullara bağlı olarak yapılmaktadır. Kuraklık, şiddetli yağışlar, dolu, don, çoraklık, tuzluluk, hastalıklar, zararlılar ve yangın gibi çevre faktörlerin biri veya birkaçı tarımsal üretimde her yıl sıkça görülen risklerdir. Dolayısıyla normal koşullarda tarımsal üretim riskli bir faaliyettir ve çevresel stres faktörleri tarafından önemli derecede sınırlandırılmaktadır. Bunun yanı sıra küresel ısınma ile değişen

iklim yapısı ve doğal dengenin bozulması söz konusu risklerin şiddetini daha da artırmaktadır. Buğday üretiminde iklim değişikliğine bağlı olarak oluşabilecek bazı riskler aşağıda sunulmuştur.

Kuraklık: Tarımsal üretim ekolojik faktörlere bağımlı olduğu için vejetasyon süresi boyunca çeşitli riskler içermektedir. Bunların başında kuraklık gelmektedir ve tarımsal üretimin en tehlikeli ve en büyük afetidir (Öztürk, 2002). Dünya üzerindeki kullanılabilir tarım alanları, kendilerini etkileyen stres faktörlerine göre sınıflandırıldıklarında kuraklık %26'lık payla en büyük paya sahip olup, bunu %20 ile mineral, %15 ile soğuk ve don stresleri izlemektedir. Bunların dışında kalanlar %29'luk bir pay alırken, yalnızca %10'luk bir alan herhangi bir stres faktörüne maruz kalmamaktadır (Kalefetoğlu & Ekmekçi, 2005:17).

Tüm bitkilerde olduğu gibi buğdayda da çimlenme, çıkış, vejetatif gelişme, çiçeklenme, olgunlaşma ve hasat gibi tüm bitki gelişme dönemleri sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Bir bitkinin herhangi bir ekolojik bölgede yetişmesinde en belirleyici faktör sıcaklıktır. Buğday gelişiminin ilk devrelerinde düşük sıcaklık düşük nispi nem ve kapalı havalar koşulları isterken, generatif dönemde yüksek sıcaklık ve açık hava ister.

Kuraklık toprak yapısı (su tutma kapasitesi, taban suyunun daha derinlere çekilmesi), bitki türü (yaprak tipi, su kullanımı, kök yapısı vb.) ve evapotranspirasyon hızına bağlıdır. Kuraklık; bitkide gelişimin herhangi bir döneminde büyüme ve gelişmeyi engelleyecek kadar uzun süren yağışsız döneme ya da su eksikliğine denir. Su bitkiler için taşıyıcı, çözücü, soğutucu madde ve hücrelerde basınç etkisi yaratarak bitkinin yapısını tesis eder. Bitki ihtiyacı olan suyu karşılamadığı zaman (kuraklık durumunda) solmaya ve kurumaya başlar, hücre büyümesi durur, yaprak alanı azalır, bitki boyu kısalmır, kök gelişimi zayıflar (Bolanos & Edmedas, 1991:8), bitkinin fotosentez mekanizmasında bozukluklar oluşur, fotosentez olumsuz etkilenir ve enzim aktivitesi düşer (Zinselmeier et al.,

1995:6). Bu durum tanelerin besin maddesi ile yeteri kadar dolmasını olumsuz etkiler ve erken olgunlaşarak cılız taneler oluşmaktadır (Wardlaw & Wrigley 1994:8). Buğdayda gelişme devresinde ortalama sıcaklık 18-25 oC dolayında iken, tane dolum devresinde 30-32 oC'ye kadar çıkar. Sıcaklığın 35 oC ve üstüne çıkması durumunda evopotranspirasyonla kayıp edilen suyu, bitki kökleriyle topraktan karşılayamaz ve kuraklık etkisi kendini göstermeye başlar. Kuraklığa bağlı olarak bitkilerin vejetasyon süresinde kısılma tane ve meyve iriliğinde düşme, tanede buruşma ve kalitede önemli oranda düşme olarak kendini göstermektedir. Günlük maksimum sıcaklığın 32 0C'nin üzerine çıkması durumunda, buğdayda tohum tutma süresinin kısaldığı, protein yapısının değiştiği, buruşuk tohuma neden olduğu ve kalitenin düştüğü kaydedilmiştir (Naeem et al., 2012:6).

Vejetasyon süresinde kısılma: Bitkiler herhangi bir faktörün sınırlayıcı olduğu durumda (sterse girdiklerinde) neslini devam ettirmek için generatif döneme (çiçeklenme ve tohum bağlama) geçiş hızlanır (Sencar & Gökmen, 2004:241). Bitkilerde solunum kayıpları fotosentez ile üretilen madde miktarından daha fazla olması durumunda büyüme durur. Aynı zamanda protoplazmadaki enzimlerin yapısını bozularak metabolizma reaksiyonları geriler, bitki bünyesinde madde iletiminde aksamalar olur, protein yapısı bozulur ve bitkide gelişme geriler ve generatif döneme geçiş hızlanır (Gökmen, 2007:475). Bitkilerin gecikmeli yaşlanma yetenekleri sayesinde fotosentetik olarak aktif kalma yetenekleri yeşil kalma karakteri olarak adlandırılmaktadır. Yaşlanma ekspresyonunda gecikme ilgili genlerin, yeşil kalma genlerinin fotosentezi sürdürmelerine izin vermesi ile meydana gelir (Lim et al., 2007:21). Yeşil kalma süresi stres şartlarına adaptiv bir fizyolojik özellik olarak tanımlanmıştır. Bu kısmen klorozun, fotosentez alanının korunması ve olgunlaşan taneye besinin tekrar hareketlenmesi arasında, kaçınılmaz bir geçişin olduğu yerlerde,

genetik olarak programlanmış yaşlanmanın bir parçası olduğu için ortaya çıkar (Vijayalakshmi et al., 2010:12). Bitki türleri stres koşullarına uyum sağlamak için çeşitli mekanizmalar geliştirmişlerdir. Örneğin bazı bitki türleri olgunlaşma evresinde yeşil kalma özelliklerini korurlar (Hörtensteiner, 2009:7), yeşil kalma süresi uzun olan mutantlarda fotosentezin daha uzun sürmesi nedeni ile, mutant olmayanlara göre daha yüksek verim verdikleri bildirilmiştir (Zheng et al., 2009). Olgunlaşmayla ilgili genlerin geciktirme özellikleri nedeni ile kuraklık şartlarında daha uzun süre fotosentez yapan genotipler daha kalın gövdeli olurlar (Lim et al., 2007:21). Genotipler arasında yeşil yaprak alanının sürdürülmesi derecesinde genetik farklılık vardır (Borrell et al., 2000:11). Sıcaklık ve sıcaklık ile kuraklığın kombine etkisi altında, gelecekte stres şartlarına adaptasyonu geliştirmekte diğer özellikler ile birlikte, yeşil kalma özelliklerinin, eklemeli etkisinin olabileceği bildirilmiştir (Lopes & Reynolds, 2012:9). Yeşil kalma özelliğine sahip hibritler ile bu özelliğe sahip olmayan hibritler karşılaştırıldığında, çiçeklenme evresindeki kuraklık stresi altında, yeşil kalmanın önemli bir verim avantajı sağladığı bildirilmiştir (Borel et al., 2000:11). Buğdayda tane doldurma döneminde yaprakların yeşil kalma sürelerinin verime olan etkisi incelendiğinde, sulu koşullarda yetişen bitkilerde yaprakların yeşil kalma sürelerinin verime herhangi bir etkisinin olmadığı, kurak koşullarda yaprakların uzun süre yeşil kalmasının ise toplam biyoması ve tane verimini olumlu yönde etkilediği bildirilmiştir (Borel et al., 2000:11). Farklı buğday çeşitlerinin fotosentez hızları arasındaki farklılıkları belirlemek amacıyla yürütülen bir araştırmada, tane doldurmadan önceki toplam biyomasın, bayrak yaprak fotosentez hızının ve yeşil kalma süresinin verimle ilişkili olduğunu belirlenmiştir (Koç et al., 2003:9). Kuraklığın hem çiçeklenme öncesi hem de çiçeklenme sonrası bitkinin yeşil kalma süresini sınırlamak suretiyle tane ağırlığını azalttığı bildirilmiştir (Innes & Blackvel, 1981:9; Steduto et al., 1986:18). Robertson & Giunta (1994):16, buğdayda çiçeklenme

öncesi kuraklık stresinin vejetatif dönemin sınırlandığı ve kuraklığın erken çiçeklenmeyi teşvik ettiği bildirmişlerdir. Robertson & Giunta (1994):16, ise buğdayda "terminal başakçık oluşumu-çiçeklenme" ve "karınlanma başlangıcı-çiçeklenme" dönemleri arasındaki kuraklık stresinin tane dolum dönemini önemli derecede kısalttığını belirtmişlerdir.

Ekim zamanının gecikmesi: Bitkilerde verimi; birim alanda optimum bitki sayısı + bitkide tohum/meyve sayısı + tohum/meyve iriliği gibi parametreler belirler. Ekilen tohumların optimum düzeyde çimlenerek toprak yüzeyine çıkmasını ve birim alanda optimum bitki sayısının oluşması verimi pozitif etkileyen en önemli faktörlerin başında gelir. Doğal yağışlara bağlı olarak yetiştirilen buğday alanları daha çok karasal iklim yapısına sahip olup yağış rejimi düzenli değildir ve bu iklim kuşağında yağışlar daha çok kış ve erken ilkbahar aylarında düşmektedir. Zorunlu kuru tarım alanlarında ekim zamanı daha çok yağışa bağlı olarak uygun toprak nemini yakalamakla yakından ilgili olduğundan, yıllara göre önemli farklılıklar gösterebilmektedir.

Son elli yılda ekstrem sıcaklıklarda yaygın ölçekli değişiklikler yaşanmış, bu durum kuraklık olarak kendini göstermeye başlamıştır (Demir et al., 2008:8). Kışlık ekimler ekim zamanı giderek gecikmektedir. Orta Anadolu ve göller yöresinin de için olduğu kışlık tahıl ekim alanlarında bazı yıllarda yağmurun yağmaması ya da çok düşük olması nedeniyle kışlık ekimler, ya kuruya ekilmekte ya da Kasım ayının ortaları veya sonlarına kadar ertelenmektedir. Her iki durumda da buğdayda çimlenme ve çıkış sorunu yaşanmaktadır. Kuruya ekimde tohum nem bulamadığı için zaten çimlenmemektedir, aynı zamanda alatav, böcek, kuş vb. zararlar olurken, geç ekimlerde tohumlar düşük toprak sıcaklığından dolayı çoğunlukla çimlenmemektedir. Geç ekimlerde ise tohumların düşük sıcaklıklardan dolayı tohum ya çimlenememekte ya da ideal kök yapısı ve bitki büyüklüğü elde edilememektedir. Bitkiler don

kesmesine ve don kuraklığına daha fazla maruz kalarak, gelişme geriliği, donun süresine ve şiddetine bağlı olarak fidelerin ölmesine neden olabilir. Bazı yıllar geç ekimlerde yeterli nem olmadığı için çıkışlar Şubat ayının sonlarına doğru olmaktadır. Bu durumda kış soğuklarından zarar görmekte ve birim alandaki bitki sayısı azalmakta ve bu durum verimi olumsuz etkilemektedir. İyi bir verim için buğday kışa rozet şeklinde 3-5 yapraklı olacak şekilde girmelidir, geç ekimlerde 1-2 yapraklı dönemdeki bitkiler kıştan daha fazla zarar görürler. İklim koşulları nedeniyle ekim zamanındaki gecikme başakta tane sayısında, 1000 tane ağırlığı ve m²'deki başak sayısında (Akgün et al., 2011:9) azalmalara neden olduğu bilinmektedir.

Öneri: Tir ekim yöntemi geleneksel buğday üretimine uygulanarak, tohumların daha derine (15 cm) ekilerek çimlenmenin zamanında olması ve fidelerin kışa daha uygun gelişme döneminde girmesi sağlanabilir.

Kar yağışının azalması ve don tehlikesi: Son yıllarda ülkemizde hemen her bölgede kar yağışının 15-20 yıl öncesine nazaran önemli oranda azaldığı kabul edilen bir gerçektir. Kar yavaş eridiği için toprağın nem içeriğini artırır ve ilkbaharın bitkiler yağmur yağmasa bile bu nemden faydalanarak gelişme sağlarlar. Yağmurun yüzey akışı nedeniyle toprak nem içeriğine katkısı kar yağışına göre daha düşüktür. Bu yüzden kar toprağın, göletlerin, barajların, sulama kanallarının, ırmakların önemli oranda su kaynağıdır.

Kar örtüsünden yoksun topraklarda toprağın üst kısmının donup çözülmesi bitkilerin önemli oranda zarar görmesine neden olur. Gündüz çözülen ve gece donan topraklarda don kabarması sonucu toprak içerisinde bitkilerin kökleri kopar (don kesmesi). Don kesmesi geç ekimlerde ve genç bitkilere daha fazla zarar verir. Kar örtüsünden yoksun topraklarda açık, bol ışıklı, rüzgârlı ve soğuk

havalarda bitkinin suyu toprağın donmuş olmasından dolayı alamamasına don kuraklığı denir. Don kuraklığına maruz kalmış bitkilerin kökleri koptuğu için besin elementi alımı düşük olur, sararır, bitki boyu kısalmır, verim ve kalite önemli oranda düşer, hatta don kuraklığının süresine ve şiddetine bağlı olarak bitkiler ölebilir. Kar örtüsü toprak ile atmosfer arasında ısı değişimini engelleyici bir rol oynar ve kar altında kalan ısı fazla düşmez. Yapılan bir çalışmada, 52 cm kalınlığında kar örtüsü bulunan bir alanda yapılan sıcaklık ölçümlerinde hava sıcaklığı -17.0°C ve kar altındaki toprak yüzeyinde ise -1.6°C olarak ölçülmüştür. Kar örtüsü 15.4°C 'lik bir koruma sağlamıştır. Kar örtüsü içindeki sıcaklık değişimi havaya oranla daha azdır ve yağın kar toprağın derinlere doğru donmasını engeller (Sencar & Gökmen, 2004:241). Dondurma veya gömme buğday ekimlerinde ilkbaharın karın erimesiyle bitki 8-10 cm boyunda olur ve soğuktan zarar görmeden eriyen kar suyu ile hızlı gelişme gösterir. Bu yüzden atalarımız “Kar Buğdayın Yorganıdır” demişlerdir.

Artan su isteği: Bitkilerde su isteği çimlenmeden fizyolojik olumun sonuna kadar gelişmeyi, verim ve kaliteyi önemli ölçüde pozitif etkilemektedir. Herhangi bir bölgede kuraklık ve nemlilik iklimin iki temel ögesi olan yağış ve sıcaklıkla ilgilidir (Sencar & Gökmen, 2004:241). Bitkiler kuraklığa bağlı olarak yüksek sıcaklıkta buharlaşmadan (toprakta ve bitkiden) dolayı daha fazla su kaydedebilir ve yaşamlarını sürdürebilmek için kaybettikleri suyu karşılamaları gerekir. Dolayısıyla kurak dönemlerde daha fazla suya ihtiyaç duyarlar. Suyun tarımdaki vazgeçilmez önemi nedeniyle, tatlı su sıkıntısı tarımsal üretimin karşısındaki en büyük kaynak kısıtlaması hâline gelmiştir. Yüksek sıcaklık (kuraklık), bitkilerin doğal yaşam alanlarında değişikliklere yol açacak, özellikle su kaynakları bakımından önemli sorunlar ortaya çıkacaktır. Küresel ısınmanın tatlı su kaynaklarına olan olumsuz etkileri tarımsal sulama açısından miktar ve kalite olarak temiz su temini oldukça

zorlaşacaktır. Ayrıca insanlar için hayati öneme sahip akarsuları besleyen dağlardaki kar ve buz kütlelerindeki azalma yaz aylarında, yani suya en fazla ihtiyaç duyulduğu zamanlarda akarsuların yeterince su taşıyamamasına yol açacaktır.

Tuzluluk, çoraklık ve erozyon sorunu: Tuzluluk, çoraklık ve erozyon her ne kadar iklimsel terimler olamasa da, ortaya çıkmaları ve etkileri iklim yapısıyla özellikle kuraklıkla çok yakından ilişkilidir. Başka bir deyişle ortaya çıkış sebepleri kuraklıktır. Aynı zamanda tuzluluk, çoraklık ve erozyon ortaya çıkışlarında birbirini tetikleyen faktörlerdir. Tarımsal üretimde kuraklıktan sonra en önemli sorunlar tuzluluk, çoraklık ve erozyondur.

Tuzluluk; genellikle kurarak topraklarda su aşağıdan yukarıya doğru, nemli topraklarda yukarıdan aşağıya doğru yıkanır ve toprağın asitlik, bazik ve pH'sını etkiler. Kurak topraklarda su aşağıdan yukarıya doğru yıkanma sırasında toprağın alt katmanlarında bulunan sodyum, kalsiyum, magnezyum, sülfat, klorür, bikarbonat, potasyum ve nitrat gibi maddeler yukarı doğru taşınır ve toprağın üst kısımlarının tuz oranı artar ve tuzluluk oluşur. Aynı zamanda toprağın pH'sı bazik karakterli olur. Yüksek konsantrasyonda değişebilir sodyum katyonu ihtiva eden topraklara alkali topraklar denir. Çoraklık; alkalilik ve tuzluluk oranı yüksek olan topraklara denir. Tuzluluk bitkilerde su alımını engelleyerek fizyolojik kuraklık meydana gelir. Çoraklıkta toprağın besin maddesi içeriğı düşük olduğu için, verim ve kalite önemli ölçüde düşer.

Erozyon; genellikle bitki örtüsünce zayıf olan toprakların üst kısımlarının su veya rüzgarla bir yerden başka bir yere taşınması olayına denir. Erozyon toprağın verimli üst kısmını yok ederek toprak verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Larney et al. (1995):8, toprağın üst kısmında her 1 cm' lik toprak kaybı buğday veriminde

%2 ile 8 oranında kayba neden olmaktadır. Izaurrealde et al. (1998):8, her 1 cm' lik toprak kaybının buğday veriminde 3.3-17.9 kg/da'lık bir azalmaya neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Yağış rejiminin buğday verimine etkisi: Türkiye karmaşık iklim ve topoğrafik yapısı içinde, özellikle küresel ısınmaya bağlı olarak, görülebilecek bir iklim değişikliğinden en fazla etkilenecek ülkeler arasındadır (Öztürk, 2002:18). Türkiye'de Orta Anadolu, Doğu ve Güneydoğu Anadolu'nun büyük bir kısmı, Akdeniz ve Ege bölgelerinin iç kesimleri aldıkları yıllık yağış miktarı bakımından yarı kurak bölgelerdir. İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde ortalama sıcaklığın yükselmesiyle kar yağışlarının azalacağı bu bölgelerde daha tarımsal açıdan su sıkıntısı yaşanacağı tahmin edilmektedir. Gelecekte su sorununun ve toprakta bulunan tuz miktarının artması sonucunda İç ve Güneydoğu Anadolu'nun daha kurak hale gelerek çölleşeceği öngörülmektedir (Türkeş, 1998:12; Öztürk, 2002:18). Türkiye'de kişi başına düşen tatlı su miktarı 575 m³'tür. Dünya ortalamasıyla karşılaştırıldığında ülkemizin, genel olarak bilinenin aksine, sınırlı su kaynaklarına sahip ülkeler arasındadır (Türkeş, 1999:17).

Küresel ısınma yağış, buharlaşma, yüzey akış ve topraktaki kullanılabilir suyun miktarında değişme ve su kaynaklarının depo edilmesini azalacaktır. Bitkilerin çiçeklenme, tozlanma, meyve oluşumu ve tane dolumu sırasında meydana gelebilecek su yetersizliği verimin önemli ölçüde düşmesine neden olacaktır. Artan CO₂ oranı genel olarak bitki gelişimi ve verimi pozitif bir etki sağlayacağı düşünülse de, sıcaklık artışlarının etkileri ve nem eksikliği hakkında kesin bir yargıya henüz ulaşamamıştır (Can, 1994:262). Eğer toprakta nem sınırlayıcı faktör ise bitki hiçbir besin elementini yeterince alamaz. Bitki ortamdaki CO₂ daha etkin kullanmak için sağlıklı ve gelişmiş yaprak, gövde ve kök sistemine sahip olması gerekir, aynı zamanda CO₂ verime çevirmek için neme ihtiyaç vardır. İklimi daha soğuk olan yüksek alanlarda, kuzey

bölgelerde veya ülkelerde sıcaklığın yükselmesi ile bitkiler daha iyi gelişir ve artan CO₂ daha iyi kullanarak verim artışı olabilir. Daha güney enlemlerde ise kavurucu sıcaklar ve kuraklıktan dolayı verimde önemli oranda düşme görülecektir. Dolayısıyla birçok araştırmacı gelecekte tarım alanları daha kuzey ve yüksek rakımlı bölgelere kayacağını öngörmektedirler.

Buğday ve yağışa dayalı tüm ürünlerde yağışın mevsimlere dağılımı büyük önem taşır. Yılın sonbahar ve kış aylarında yeterli yağış düşse dahi buğdayın tane doldurma döneminde oluşacak nem eksikliği tanede besin maddesi birikimini olumsuz etkiler, taneler küçük kalır hatta kırışık olabilir ve verim önemli ölçüde düşer. Bunların sonucunda verim ve kalite önemli oranda düşer. Vejetatif dönem, fotosentez alanının büyüklüğü ve başaktaki potansiyel tane sayısını; tane dolum dönemi ve tane dolum oranı ise tane ağırlığını etkilediğinden tane verimi ile yakın ilişkilidir (Gebeyehou et al., 1982) Buğdayın en önemli kritik gelişme dönemlerinden biri olan minyatür başak oluşturma döneminde oluşacak su stresi başakta tane sayısını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle buğdayda fizyoloji büyüme, olgunlaşma ve verim su, kuraklık ve yüksek sıcaklığın kombine etkisi altında olduğu bildirilmiştir (Sayılğan, 2016:8; Grigorova et al., 2011:6). Zhiqing et al. (1994:24) ve Tubiello et al. (1995):17, çeltikte ve buğdayda, sıcaklık artışlarına paralel olarak verimde düşüş olacağını fakat CO₂ de meydana gelecek olan artışların bu düşüşü telafi edeceğini bildirmişlerdir. CO₂' in verimde meydana getireceği artış, fotosentez oranında meydana getireceği artışla olacağı ve bunun doğadaki tüm bitkileri benzer şekilde etkileyeceği vurgulanmıştır (Norby et al., 1999:31; Poorter & Navas, 2003:23). Ancak sıcaklık sadece gündüz değil gecede artacağından solunum miktarı da artacaktır, bu durum CO₂ artışı ile verimin yükselmesi fikrinin tartışmaya açık olduğunu göstermektedir. Yazlık ekimlerde su stresi verimde önemli düzeyde düşüşlere neden olmaktadır (Eck, 1986:5; Lamm et al., 1994:6) dolayısıyla daha

güney enlemlerde ve kıyı kesimlerinde yazlık ekilen ve sulanmayan ürünlerin verimlerinde su stresinden dolayı verimde azalmalar olacağı bildirilmiştir (Yadav et al., 2006:5). Bu durum ürün türlerinde önemli değişiklikler olabilecek, kurağa daha dayanıklı türler veya çeşitler olacaktır.

Sonuç

Küresel ısınma ve neden olduğu iklim değişikliğinin canlı yaşamı üzerine olumsuz etkileri, özellikle kuraklık tehlikesi baş göstermeye başlamıştır. Buğday üretimi ve tarımsal üretim üzerine küresel ısınmanın olumsuz etkilerini özetlemek gerekirse; üretimde kayıplar ve ürün kalitesinde düşme, bitki hastalık ve zararlıların artması, su ve besin temin edilmesinde güçlükler, su kaynaklarının kurumaya başlaması, tarımsal ürün gelirlerinde kayıplar, tarıma dayalı endüstrilerde kayıplar, üretimdeki düşüşe bağlı işsizlik, ekim zamanında değişiklikler, kar yağışının azalması, su ve rüzgâr erozyonu, en önemlisi gıda ve su kıtlığı olarak sayılabilir.

Sonuç olarak; - Suyun canlı yaşamı için önemi farklı aktivitelerle kuvvetlice vurgulanmalıdır,

- Küresel ısınmaya karşı ülkeler ve yerel yönetimler üzerine düşen görev ve sorumlulukları algılamaları ve gereken önlemleri almalıdırlar,

- Fosil yakıtlarının azaltılması, alternatif enerji kaynaklarının üretilmesi ve kullanılması teşvik edilmeli,

- Doğa ve doğal kaynaklar tasarruflu kullanılmalı,

- İnsanlık sadece kendini değil, başkasını ve geleceği de düşünmeli, zira küresel ısınmanın meydana gelmesinde en büyük faktör insandır,

- Dünya'yı ben mi kurtaracağım düşüncesinden vazgeçilmeli ve her birey üzerine düşeni yapmalıdır.

Kaynakça

Akgün, İ., Altındal, D., & Kara, B. (2011). Isparta Ekolojik Koşullarında Ekmeklik Ve Makarnalık Bazı Buğday Çeşitlerinin Uygun Ekim Zamanlarının Belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 17(4), 300-309.

Anonim (2013). İklim Değişikliği, Sonuçları ve Mücadele Yöntemleri. Türkiye Çevre Koruma ve Yeşillendirme Kurumu Görüşleri. 17s.

Anonim (2025). Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Ürünleri Piyasaları.

Bolanos, J., & Edmeades, G.O. (1991). Value of Selection for Osmotic Potential in Tropical Maize. *Agronomy Journal*, 83: 948-956.

Borrell, A.K., Hammer, G.L., & Douglas, A.C. (2000). Does Maintaining Green Leaf Area in Sorghum Improve Yield Under Drought? I. Leaf Growth and Senescence. *Crop Science*, 40(4), 1026-1037.

Can, A. (2006). Türkiye'deki CO2 Probleminin Sayısal Modelleme İle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 262s, ODTÜ, Ankara.

Day, A.D., & Intalap, S. (1970). Some Effects of Soil Moisture on the Growth of Wheat. *Agronomy Journal*, 62:27-29.

Demir, İ., Kılıç, G., & Coşkun, M. (2008). Bölgesel İklim Modeli İle Türkiye İçin İklim Öngörülleri. HadAMP3 SRES A2 Senaryosu. IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 365-373.

Eck, H.V. (1986). Effect of Water Deficits on Yield, Yield Components and Water Use Efficiency of Irrigated Corn. *Agronomy Journal*, 78, 1035-1040.

Gebeyehou, G., Knott, D., & Baker, R. (1982). Relationships Among Durations of Vegetative and Grain Filling Phases, Yield Components, and Grain Yield In Durum Wheat Cultivars 1. *Crop Science*, 22(2), 287-290.

Gökmen, S. (2007). Genel Ekoloji. Nobel Yayınları No: 1160, 475s.

Grigorova, B, Vaseva I, Demirevska K., & Feller, U. (2011). Combined Drought and Heat Stress in Wheat: Changes in Some Heat Shock Proteins. *Biol. Plant.* 55, 105-111.

Innes, P., & Blackwell, R.D. (1983). Some Effects of Leaf Posture on the Yield and Water Economy of Winter Wheat. *Journal of Agric. Sci.*, 101, 367-376.

IPCC (2001). Birleşmiş Milletler Hükûmetler Arası İklim Değişikliği Paneli İklim Değişikliği Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 123s, www.ekutup.dpt.gov.tr/cevre/oik548.pdf

IPCC (2007). Climate change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate, 185s, Paris, Fransa.

Izaurrealde, R.C., Solberg, E.D., Nyborg, M., & Malhi, S.S. (1998). Immediate Effects of Topsoil Removal on Crop Productivity Loss and Its Restoration With Commercial Fertilizers. *Soil Tillage Research*, 46, 251-259.

Hörtensteiner, S. (2009). Stay-green Regulates Chlorophyll And Chlorophyll-Binding Protein Degradation During Senescence. *Trends in plant science*, 14(3), 155-162.

Kalefetoğlu, T., & Ekmekçi, Y. (2005). The Effects of Drought on Plants and Tolerance Mechanisms. *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 18(4), 723-740.

Koç, M., Barutçular, C., & Genç, I. (2003). Photosynthesis and Productivity of Old and Modern Durum Wheats in A Mediterranean Environment. *Crop Science*, 43(6), 2089-2098.

Lamm, F. R., Rogers D.H., & Manges, H.L. (1994). Irrigation Scheduling With Planned Soil Water Depletion. *Transactions of the ASAE*, 37(5), 1491-1497.

Lim, P. O., Kim, H. J., & Gil Nam, H. (2007). Leaf Senescence. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 58, 115-136.

Larney, F.H., Janzen, H.H., & Olson, B.M. (1995). Efficacy of Inorganic Fertilizer in Restoring Wheat Yields on Artificially Eroded Soils. *Canadian Journal Soil Sci.*, 75, 369-377.

Lopes, M. S., & Reynolds, M. P. (2012). Stay-Green in Spring Wheat Can Be Determined By Spectral Reflectance Measurements Independently From Phenology. *Journal of Experimental Botany*, 63(10), 3789-3798

Naeem, H.A., Paulon, D., Irmak, S., & Mac Ritchie, F. (2012). Developmental and Environmentl Effects on the Assembly of Glutenin Polymers and the Impact on Grain Quality of Wheat. *Journal of Cereal Science*, 56, 51-57.

Norby, R.J., Wullschleger, S.D., Gunderson, C.A., Johnson, D.W., & Ceule-Mans, R. (1999). Tree Responses to Rising CO₂ in Field Experiments: Implications For the Future Forest. *Plant, Cell and Environment*, 22, 683–714.

Öztürk, K. (2002). Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye'ye Olası Etkileri. *G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Der.* 22(1):47-65.

Poorter, H. & Navas, M.L. (2003). Plant Growth and Competition at Elevated CO₂: On Winners, Losers and Functional Groups. *New Physiology*, 157, 175–198.

Robertson, M.J., & Giunta, F. (1994). Responses of Spring Wheat Exposed to Pre-Anthesis Water Stress. Aust. Journal Agric. Res., 45,19-35.

Sayılğan, Ç. (2016). Küresel Sıcaklık Artışının Buğdayda Beklenen Etkileri ve Yüksek Sıcaklığa Toleranslılığın Fizyolojik Göstergeleri. YYÜ Tar Bil Derg (YYU J Agr Scı), 26(3), 439-447.

Sencar, Ö., & Gökmen, S. (2004). Tarımsal Ekoloji. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 8, Ders Kitapları Serisi No: 3, 241s, Tokat.

Steduto, P., Alvino, A., Magliulo, V., & Sisto, L. (1986). Analysis of the Physiological and Repro of Five Wheat Varieties Under Rainfed and Irrigated Conditions in Southern Italy. Drought Resistance in Plants. Meeting Held in Am to 23 October 1986, Belgium, 131-149.

Tubiello, F.N., Rosenzweig, C., & Volk, T. (1995). Interactions of CO₂, Temperature and Management Practices. Simulations With A Modified Version of CERES-Wheat. Agricultural Systems, 49, 135-152.

TÜİK (2025). Türkiye İstatistik Kurumu, 2025.

Türkeş, M. (1998). İklimsel Değişebilirlik Açısından Türkiye’de Çölleşmeye Eğilimli Alanlar. DMİ/İTÜ II. Hidrometeoroloji Sempozyumu Bildiri Kitabı, 45-57, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Türkeş, M. (1999). Vulnerability of Turkey to Desertification With Respect to Precipitation and Aridity Conditions. Turkish J. of Engineering and Environmental Science, 23, 363-380.

Türkeş, M. (2003). Sera Gazı Salınımlarının Azaltılması İçin Sürdürülebilir Teknolojik ve Davranışsal Seçenekler. V. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Çevre Mühendisleri Odası, Ankara.

Vijayalakshmi, K., Fritz, A. K., Paulsen, G. M., Bai, G., Pandravada, S., & Gill, B. S. (2010). Modeling and Mapping QTL for Senescence-Related Traits In Winter Wheat Under High Temperature. *Molecular Breeding*, 26(2), 163-175.

Yadav, S.S., Kumar, J., Yadav, S.K., Singh, V.S., Turner, Y.C., & Redden, R. (2006). Evaluation of Helicoverpa and Drought Resistance in Chickpea. *Plant Genetic Resources*, 4, 198-203.

Wardlaw I.F., & , C.W. (1994). Heat Tolerance in Temperate Cereals: An Overview. *Aust J Plant Physiol* 21, 695–703.

Zheng, H., Wu, A., Zheng, C., Wang, Y., Cai, R., Shen, X., Dong, S., 2009. QTL Mapping of Maize Stay-Green Traits and Their Relationship to Yield. *Plant Breeding*, 128(1), 54-62.

Zhiqing, J., Ge., D., Chen, H., & Fang, J. (1994). Effects of Climate Change On Rice Production and Strategies For Adaptation In Southern China, in: *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study*, U.S. Climate Change Division Report EPA, 230-B-94-003, pp. 1-24.

Zinselmeier, C., Schussler, J.R., Westgate M.E., & Jones, R.J. (1995). Low Water Potential Disrupts Carbohydrate Metabolism in Maize Ovaries. *Plant Physiology*, 107, 385-391.

