



The Historical Process of Fertilizer Application in Agriculture: An Evaluation from the Perspective of Field Crops

Şerife AKKEÇECİ^{1*}

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Göksun MYO Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Organik Tarım Programı, Kahramanmaraş, Türkiye

Keywords:	ABSTRACT
Fertilization history Field crops Sustainable agriculture Precision agriculture Circular economy	This compilation study examines the historical development of fertilizer use in agriculture in a multifaceted manner in the context of field crop production; and comprehensively examines the transformation process extending from traditional practices to modern and technology-based strategies. The concept of fertilization, which has been shaped by natural materials such as animal waste, plant residues and ash since ancient times, was established on scientific foundations in the 19th century, and evolved into a production-oriented structure in the 20th century with the widespread use of industrial-type chemical fertilizers. Especially during the Green Revolution, with the widespread use of high-yield varieties, intensive input use provided significant increases in field crop productivity. However, these developments also brought environmental, economic and social costs. With the increasing environmental awareness in the post-1980 period, sustainable fertilization practices, integrated nutrient management and organic farming approaches have gained importance; in recent years, precision agriculture technologies, biotechnological fertilization systems and circular economy principles have been effective in reshaping fertilization policies. In Turkey, the current situation has been evaluated by taking into account the historical development line, transformation trends in practices have been analyzed and future suggestions have been included in line with sustainable agriculture targets.

Tarımda Gübre Uygulamasının Tarihsel Süreci: Tarla Bitkileri Perspektifiyle Bir Değerlendirme

Anahtar Kelimeler:	ÖZET
Gübreleme tarihi Tarla bitkileri Sürdürülebilir tarım Hassas tarım Döngüsel ekonomi	Bu derleme çalışması, tarımda gübre kullanımının tarihsel gelişimini tarla bitkileri üretimi bağlamında çok yönlü bir şekilde ele almakta; geleneksel uygulamalardan modern ve teknoloji temelli stratejilere uzanan dönüşüm sürecini kapsamlı biçimde incelemektedir. İlk çağlardan itibaren kullanılan hayvansal atıklar, bitki kalıntıları ve kül gibi doğal materyallerle şekillenen gübreleme anlayışı, 19. yüzyılda bilimsel temellere oturmuş, 20. yüzyılda ise sanayi tipi kimyasal gübrelerin yaygınlaşmasıyla üretim odaklı bir yapıya evrilmiştir. Özellikle Yeşil Devrim döneminde yüksek verimli çeşitlerin yaygınlaştırılmasıyla birlikte, yoğun girdi kullanımı tarla bitkileri verimliliğinde belirgin artışlar sağlamıştır. Ancak bu gelişmeler, beraberinde çevresel, ekonomik ve sosyal maliyetleri de getirmiştir. 1980 sonrası dönemde artan çevresel duyarlılıkla birlikte sürdürülebilir gübreleme uygulamaları, entegre besin yönetimi ve organik tarım yaklaşımları önem kazanmış; son yıllarda ise hassas tarım teknolojileri, biyoteknolojik gübreleme sistemleri ve döngüsel ekonomi ilkeleri gübreleme politikalarının yeniden şekillenmesinde etkili olmuştur. Türkiye özelinde ise tarihsel gelişim çizgisi dikkate alınarak mevcut durum değerlendirilmiş, uygulamalardaki dönüşüm eğilimleri analiz edilmiş ve sürdürülebilir tarım hedefleri doğrultusunda geleceğe yönelik önerilere yer verilmiştir.

*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: Şerife AKKEÇECİ (sakkececi@ksu.edu.tr)

Received: 06/05/2025

Accepted: 02/12/2025

Published: 31/12/2025

How to cite:

Akkeçeci, Ş., (2025). The Historical Process of Fertilizer Application in Agriculture: An Evaluation from the Perspective of Field Crops. *Agro-Science Journal of Iğdır University*, 3(2), 72-84.



This work is licensed (CC BY-NC-ND 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

GİRİŞ

Tarımda verimlilik artışı ve toprak sağlığının korunması, modern üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından temel önceliklerden biridir. Bu çerçevede gübreleme, bitkisel üretimde toprak besin dengesini sağlama, ürün kalitesini artırma ve uzun vadeli verimliliği sürdürme amacıyla başvuru en yaygın uygulamalardan biridir (Çiftçi ve Kara, 2020). Gübre kullanımı yalnızca bitki gelişimini doğrudan etkileyen bir müdahale yöntemi olmakla kalmayıp; aynı zamanda su kalitesi, sera gazı salımı ve toprak mikrobiyal çeşitliliği gibi çevresel parametrelerle de doğrudan ilişkilidir (FAO, 2019). Tarihsel süreçte gübrelemenin evrimi, insanlığın doğa ile kurduğu üretim ilişkisindeki dönüşümün de bir göstergesidir. İlk çağlardan itibaren kullanılan hayvan gübresi, bitki kalıntıları ve kül gibi doğal materyaller, geleneksel tarım toplumlarının toprak verimliliğini koruma çabalarının temel araçları arasında yer almıştır (Küçük, 2017). 19. yüzyılda Justus von Liebig'in bitki besin elementlerini tanımlamasıyla bilimsel temellere oturan gübreleme anlayışı, 20. yüzyıl başında Haber-Bosch süreciyle birlikte sanayi tipi azotlu gübrelerin yaygınlaşmasına yol açmıştır (Smil, 2001). Bu gelişmeler, özellikle 1940–1970 döneminde yaşanan Yeşil Devrim sürecinde kimyasal gübre kullanımının küresel düzeyde artmasına ve yüksek verimli çeşitlerin yaygınlaşmasına neden olmuştur (Pingali, 2012). Ancak söz konusu gelişmeler, tarımsal üretimde verim artışları sağlarken, uzun vadeli çevresel maliyetleri de beraberinde getirmiştir. Toprak asitlenmesi, su kaynaklarında nitrat kirliliği, organik madde kaybı ve mikrobiyal dengenin bozulması, yoğun kimyasal gübre kullanımının çevresel etkileri arasında öne çıkmaktadır (Erisman ve ark., 2008; Güneş ve ark., 2015). Bu bağlamda, günümüzde gübrelemede daha sürdürülebilir ve entegre yaklaşımlara yönelim artmıştır. Organik gübreler, mikrobiyal gübreler, kompost uygulamaları, kontrollü salımlı ürünler ve hassas gübreleme teknikleri gibi alternatifler, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen başlıca uygulamalardır (Öztürk ve Yılmaz, 2021; Zhang ve ark., 2021).

Tarla bitkileri, gıda, yem ve endüstriyel hammadde üretiminde stratejik öneme sahip olup, yüksek ve sürdürülebilir verim elde edilmesi toprakta yeterli ve dengeli besin elementlerinin varlığına bağlıdır. Bu bağlamda gübreleme, yalnızca verimi ve ürün kalitesini artırmakla kalmaz; aynı zamanda toprak sağlığının korunması ve üretim maliyetlerinin yönetilmesinde de belirleyici bir rol oynar (Çiftçi ve Kara, 2020; Güneş ve ark., 2015). Azot, fosfor ve potasyum gibi makro, ayrıca mikro besin elementlerinin uygun doz ve zamanda uygulanması, bitki gelişimi için kritik öneme sahiptir (Marschner, 2012). Etkin gübreleme ise yalnızca miktara değil; toprak analizleri, uygulama yöntemleri ve çevresel koşullarla uyuma dayalı bütüncül bir yaklaşıma bağlıdır (FAO, 2019; Zhang ve ark., 2021).

Bu çalışma, tarla bitkileri üretiminde gübre kullanımının tarihsel gelişimini kapsamlı bir biçimde ele alarak, geleneksel uygulamalardan günümüzün çevre dostu stratejilerine uzanan dönüşüm sürecini irdelemeyi amaçlamaktadır. Böylece gübrelemenin yalnızca tarımsal bir müdahale değil, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve sosyo-politik etkileri olan çok boyutlu bir süreç olduğu ortaya konacaktır.

Geleneksel Tarım Dönemi: Doğal Kaynaklara Dayalı Gübreleme (Antik Çağ – 19. Yüzyıl Ortası)

Tarım faaliyetlerinin ilk ortaya çıktığı Mezopotamya, Nil Vadisi ve İndus Havzası gibi bölgelerde, çiftçiler toprak verimliliğini korumak için hayvan gübresi, kül, bitki kalıntıları ve mutfak atıklarından yararlanmıştır (Küçük, 2017). Bu dönemde: Toprak dinlendirme (nadas) ve ürün rotasyonu gibi uygulamalarla doğal besin döngüsü korunmaya çalışılmıştır. Yeşil gübreleme yöntemiyle baklagil gibi bitkiler toprağa karıştırılarak azot döngüsüne katkı sağlanmıştır. Gübreleme tamamen yerel kaynaklara dayanmakta, dışsal bir kimyasal girdi bulunmamaktadır. Ancak, uygulamalar deneyime dayalı olup, modern toprak ve bitki bilimi bilgisine dayanmamaktadır.

1. Geleneksel Tarım Dönemi: Doğal Kaynaklara Dayalı Gübreleme (Antik Çağ – 19. Yüzyıl Ortası)

Mezopotamya ve çevresinde, tarımsal üretimi artırmak için hayvan gübresi ve bitki kalıntıları gibi organik materyallerin kullanımı yaygındı. Bu uygulamalar, toprağın besin içeriğini zenginleştirerek verimliliği korumaya yardımcı oldu (Styring ve ark., 2017; Poznyak ve ark., 2022).

1.1. Organik Materyal Kullanımı ve Erken Tarımsal Uygulamalar

Tarihsel veriler, organik materyal kullanımının tarımsal üretimin başlangıcından itibaren önemli bir stratejik unsur olduğunu göstermektedir. Özellikle hayvan gübresi, bitki kalıntıları ve mutfak atıkları gibi organik artıkların toprağa eklenmesi uygulamaları (gübreleme ya da middening olarak da adlandırılır), Mezopotamya’da M.Ö. 7. binyıldan itibaren yerleşik tarımın temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir (Styring ve ark., 2017). Bu uygulama, hem toprak verimliliğini korumak hem de besin döngüsünü sürdürmek açısından kritik öneme sahipti.

Özellikle ilk kent devletlerinin ortaya çıkışıyla birlikte, artan nüfusun beslenme ihtiyacını karşılamak amacıyla tarımsal üretim genişletilmiş; bu süreçte ekstensifikasyon yani tarım arazilerinin genişletilerek kullanımının yaygınlaştığı gözlemlenmiştir. Bu dönemde, organik materyallerle zenginleştirilmiş topraklar, yüksek verimlilik sağlamakta ve yerleşimlerin sürdürülebilirliğini desteklemekteydi (Poznyak ve Ivaniuk, 2022).

Ancak zamanla tarım faaliyetlerinin daha geniş alanlara yayılması, özellikle uzak mesafelerdeki alanlara organik gübrelerin taşınmasını zorlaştırmış, bu da birim alana düşen organik madde miktarında azalmaya neden olmuştur. Sonuç olarak, toprağın doğal verimlilik kapasitesi kademeli olarak düşmüş ve bu durum, ilerleyen dönemlerde yoğun tarımın sürdürülebilirliğini sınırlandıran önemli bir faktör haline gelmiştir (Styring ve ark., 2017; Poznyak ve Ivaniuk, 2022).

1.2. Toprak Verimliliği ve Tarımsal Gelişim

Mezopotamya’daki antik tarım sistemlerine yönelik yapılan karbon (^{13}C) ve azot (^{15}N) izotop analizleri, bu bölgelerde geçmişte kullanılan tarım arazilerinin günümüz topraklarına kıyasla 2 ila 4 kat daha fazla nem içerdiğini ve organik madde bakımından çok daha zengin olduğunu ortaya koymaktadır (Styring ve ark., 2017). Bu bulgular, erken tarım toplumlarının toprağı yoğun biçimde organik materyalle desteklediğini ve üretim sistemlerinde doğal verimliliği korumaya odaklandığını göstermektedir.

Ancak zamanla, özellikle artan nüfus baskısı ve tarım alanlarının genişlemesiyle birlikte, azot izotop değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum, toprağın doğal azot rezervlerinin tükendiğini, dolayısıyla organik gübreleme uygulamalarının azaldığını ve toprak verimliliğinde kademeli bir gerileme yaşandığını düşündürmektedir. Tarımsal alanların giderek daha fazla kullanılması, toprağın besin döngüsünü bozmuş ve sürdürülebilir gübre yönetimi yapılmadığında verimlilik kayıplarına yol açmıştır.

Buna karşın, erken dönem çiftçileri tarafından uygulanan organik temelli gübreleme stratejileri, evcilleştirilen başlıca tahıllarda özellikle buğday ve arpa gibi türlerde tane ağırlığı ve üretim verimliliğinde uzun vadeli artışlar sağlamıştır. Bu da söz konusu geleneksel uygulamaların, ilk şehirleşme süreçlerine paralel olarak gelişen tarımsal üretim kapasitesinin temel yapı taşlarından biri olduğunu ortaya koymaktadır (Styring ve ark., 2017).

1.3. Gübre Uygulamaları ve Toprak Verimliliği

İndus Vadisi’nde de benzer şekilde, tarımsal atıklar ve hayvan gübresi, hem gübreleme hem de yakacak olarak kullanıldı. Özellikle Harappa’da yapılan arkeobotanik analizler, yakıt olarak tezek kullanımının yaygın olduğunu gösteriyor (James ve ark., 2024).

Organik kaynaklı gübrelerin, özellikle hayvan gübresi ve tarımsal atıkların sistematik biçimde toprağa uygulanması, organik karbon içeriğini artırarak toprak yapısının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirmekte, dolayısıyla toprak kalitesinin korunmasına önemli katkı sunmaktadır (Zhao ve ark., 2024). Bu organik uygulamalar sayesinde, toprağın su tutma kapasitesi, havalanabilirliği ve mikrobiyal aktivitesi artmakta; ayrıca uzun vadede sentetik gübrelere duyulan ihtiyaç azalmaktadır. Bu durum, hem üretim maliyetlerini düşürmekte hem de tarımın çevresel yükünü hafifletmektedir.

Özellikle hayvan gübresinin anaerobik sindirim sürecinden geçirilmesiyle elde edilen sindirim artığı (digestate), potasyum başta olmak üzere pek çok makro ve mikro besin elementi açısından zengin bir kaynak olup, bitki beslenmesini destekleyerek tarımsal verimliliğin artırılmasına olanak tanımaktadır (Murthy ve ark., 2024; Zhao ve ark., 2024). Bu tür atıkların değerlendirilmesi, aynı zamanda döngüsel tarım anlayışını güçlendirmekte, biyokütle bazlı üretim sistemleriyle entegre sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet etmektedir.

Buna ek olarak, organik gübrelerin kontrollü kullanımı, aşırı gübreleme uygulamalarını sınırlandırarak toprak ve su kirliliği gibi çevresel risklerin azaltılmasına katkı sağlamakta; azot, fosfor ve potasyum gibi elementlerin gereksiz ve düzensiz bir şekilde toprağa verilmesinin önüne geçmektedir. Böylece hem ekosistem bütünlüğü korunmakta, hem de sürdürülebilir tarım uygulamalarının benimsenmesi kolaylaşmaktadır (Lin ve ark., 2024; Wu ve ark., 2024).

Nil Vadisi'nde ise, Nil'in taşkınlarıyla gelen alüvyon ve organik materyaller, toprağın doğal olarak zenginleşmesini sağladı. Ancak, ek olarak organik gübreleme ve bitki kalıntılarının toprağa karıştırılması da uygulandı (Angelakis ve ark. 2020, Poznyak ve ark., 2022).

2. Su Yönetimi ve Sulama Sistemleri

Bu üç bölgede de gelişmiş sulama sistemleri kuruldu. Mezopotamya'da kanallar ve bentler, Nil Vadisi'nde havuzlar ve kanallar, İndus Havzası'nda ise karmaşık sulama ve su dağıtım sistemleri kullanıldı (Teclaff, 1967). Sulama, sadece verimliliği artırmakla kalmadı, aynı zamanda tarımın sürdürülebilirliğini ve şehirleşmenin önünü açtı (İndus Vadisi'nde, farklı mevsimlere göre (rabi, kharif, zaid) ekim yapılması ve suyun etkin kullanımı, tarımsal çeşitliliği ve dayanıklılığı artırdı (Bates ve ark., 2020, D'Agostini ve ark., 2022).

3. Tarımsal Bilgi ve Toplumsal Etkiler

Bu uygarlıklar, toprak kalitesi ve verimliliği hakkında bilgi birikimi oluşturdu; kadastro tutma, arazi sınıflandırması ve vergi sistemleri geliştirdiler (Poznyak ve Ivaniuk, 2022). Tarımsal üretimdeki artış, şehirleşme ve siyasi merkezîyetçiliğin gelişmesinde önemli rol oynadı (Styring ve ark., 2017). Sonuç olarak, Mezopotamya, Nil Vadisi ve İndus Havzası'nda tarımsal verimliliği korumak için organik gübreleme, bitki kalıntılarının kullanımı ve gelişmiş su yönetimi teknikleri bir arada uygulanmıştır. Bu uygulamalar hem tarımsal sürdürülebilirliği hem de toplumsal gelişmeyi desteklemiştir.

Bilimsel Gübreleme Çağı: Kimyasal Devrimin Başlangıcı (1840–1940)

19. yüzyılda Justus von Liebig'in "Bitkilerin Mineral Beslenme Teorisi"ni ortaya koymasıyla tarımda bilimsel gübreleme anlayışı başlamıştır (Smil, 2001). Bu dönemde: Bitkisel üretimde asıl verim kısıtlayıcının besin elementi eksikliği olduğu anlaşılmıştır ("Minimum Yasası"). Haber-Bosch süreci ile 1909 yılında atmosferik azotun sanayi tipi amonyak üretimine dönüştürülmesi, azotlu gübrelerin seri üretimini mümkün kılmıştır. Fosfat ve potasyum madenlerinin keşfiyle NPK (Azot,

Fosfor, Potasyum) gübreleri kullanılmaya başlanmıştır. Sonuç: Bitkisel üretimde ilk kez sistematik verim artışları gözlemlenmiştir. Ancak bu dönemde çevresel etkiler henüz dikkate alınmamıştır.

1. Bilimsel Gübreleme Yöntemleri ve Teknolojileri

1.1. Derin Gübreleme ve Hassas Uygulama

Gübrelerin derin yerleştirilmesi, verimi %13.5 artırırken, azot kullanım verimliliğini %33,8 yükseltir ve azot gazı kayıplarını önemli ölçüde azaltır. En uygun uygulama derinliği 15-25 cm olarak belirlenmiştir (Wu ve ark., 2024).

1.2. Toprak Testine Dayalı Gübreleme

Toprak analizine dayalı gübreleme (STCR), gübre ve çiftlik gübresiyle birlikte kullanıldığında, ürün verimini ve toprak sağlığını artırır. Bu yöntem, bitki ve toprak özelliklerine göre dengeli besleme sağlar (Murthy ve ark., 2024).

1.3. Entegre Organik ve İnorganik Gübreleme

Organik ve inorganik gübrelerin birlikte kullanılması, toprak kalitesini ve ürün verimini artırırken, çevresel etkileri azaltır ve sürdürülebilirliği destekler (Lin ve ark., 2024 Zhao ve ark., 2024).

1.4. Uzaktan Algılama ve Yapay Zekâ

Uydu görüntüleri, sensörler ve makine öğrenmesi ile toprak ve bitki besin durumu izlenerek, gübre uygulamaları daha hassas ve verimli hale getirilir. Bu teknolojiler, yerel farklılıkları dikkate alarak kaynak kullanımını optimize eder (Radočaj ve ark., 2024, Xing, 2024, Toselli ve ark., 2024, Zhang ve ark., 2024).

2. Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler

2.1. Çevre Dostu Uygulamalar

Organik gübreleme ve nano-gübreler, besin maddelerinin daha verimli kullanılmasını sağlar, sera gazı emisyonlarını ve ağır metal birikimini azaltır (Zhao ve ark., 2024, Seleiman ve ark., 2024).

2.2. Entegre Sistemler

Bitki-hayvan entegrasyonu ve sistem bazlı gübreleme, besin döngüsünü iyileştirir ve toplam üretkenliği artırır (Farias ve ark., 2020). Bilimsel gübreleme, modern teknolojiler ve entegre yaklaşımlarla birlikte, hem tarımsal verimliliği artırmakta hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Toprak ve bitki analizine dayalı, hassas ve çevre dostu gübreleme yöntemleri, geleceğin tarımında temel rol oynamaktadır.

Sanayi Devrimi ve Kimyasal Gübrelerin Yaygınlaşması (19. Yüzyıl Sonu–1950)

Sanayi Devrimi'nin ardından ortaya çıkan teknolojik gelişmeler, tarımsal üretimde geleneksel yöntemlerin yerini bilimsel temellere dayalı ve kimyasal girdilere bağımlı bir yapıya bırakmasına zemin hazırlamıştır. Bu dönüşümün önemli bir ayağını, bitki beslenmesi konusundaki bilimsel gelişmeler oluşturmuştur. 1840'lı yıllarda Justus von Liebig'in "mineral beslenme kuramı" doğrultusunda, bitkilerin büyüme ve verimlilik açısından temel besin elementlerine ihtiyaç duyduğu ortaya konmuş, bu da tarımda mineral gübre kullanımına teorik bir zemin kazandırmıştır (Smil, 2001). 20.yüzyılın başında Fritz Haber ve Carl Bosch'un geliştirdiği Haber-Bosch süreci, atmosferdeki serbest azotun kimyasal olarak bağlanarak amonyak formuna dönüştürülmesini mümkün kılmış, bu da sanayi ölçeğinde azotlu gübrelerin üretimini başlatmıştır (Erisman ve ark., 2008). Buna paralel

olarak fosfat ve potasyum rezervlerinin madencilik faaliyetleriyle işlenebilir hâle gelmesi, NPK bileşik gübrelerinin geniş çapta kullanımını beraberinde getirmiştir (Stewart ve ark., 2005).

Bu gelişmelerle birlikte özellikle buğday, mısır ve arpa gibi tarla bitkilerinde ilk kez kimyasal gübrelerle sistematik uygulamalar gerçekleştirilmiş; böylece üretimde verim artışına yönelik girdiye dayalı üretim modeli tarım politikalarının merkezine yerleşmiştir (Tilman ve ark., 2002). Ancak bu dönemde, gübre kullanımının çevresel ve ekolojik sonuçları henüz bilimsel olarak tam anlamıyla değerlendirilememiştir.

Yeşil Devrim Dönemi: Yüksek Girdili Tarım, Verim Odaklılık Kimyasal Bağımlılık (1960–1980)

1960'lı yıllarda başlayan Yeşil Devrim, tarımsal üretimde yüksek verim hedefiyle yeni bir dönemin başlangıcını oluşturmuş; bu kapsamda geliştirilen yüksek verimli buğday, pirinç ve mısır çeşitleri, özellikle azotlu gübrelere olan talebi önemli ölçüde artırmıştır (Pingali, 2012; Khush, 2001). Tarla bitkileri üretiminde verimlilik ciddi oranda artmış, örneğin buğday üretimi birçok bölgede iki katına çıkmıştır (Evenson ve Gollin, 2003). Ancak bu verim artışı, yoğun kimyasal gübre ve pestisit kullanımı ile sağlandığı için çevresel sürdürülebilirlik ikinci planda kalmış; toprak asitlenmesi, organik madde kaybı ve su kaynaklarında nitrat birikimi gibi sorunlar ortaya çıkmıştır (Erisman ve ark., 2008). Bu dönem, tarımda kimyasal bağımlılığın kurumsallaştığı ve çevresel etkilerin göz ardı edildiği bir üretim modeli ile özdeşleşmiştir.

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından tarım sektörü, küresel ölçekte verimliliği artırma hedefi doğrultusunda endüstriyel üretim modeline evrilmiş ve bu dönüşüm literatürde 'Yeşil Devrim' olarak adlandırılmıştır (Pingali, 2012). Bu dönemde yüksek verimli buğday, pirinç ve mısır çeşitleri geliştirilmiş; kimyasal gübreler ile pestisitlerin kullanımı belirgin şekilde artmış; geniş ölçekli sulama projeleri hayata geçirilmiş ve monokültüre dayalı üretim sistemleri yaygınlaşmıştır. 1965 ile 2010 yılları arasında uygulanan Yeşil Devrim politikaları kapsamında yüksek verimli tohum çeşitlerinin kullanılması, özellikle buğday ve pirinç gibi temel tahıllarda olmak üzere, tarımsal üretkenliği yaklaşık %44 oranında artırmıştır (Haverstock, 1979; Gollin ve ark., 2016; Khush, 2001). Yeşil Devrim'in sağladığı verimlilik artışı, tarımsal gelirlerin yükselmesine katkıda bulunmuş ve dolaylı olarak nüfus artış hızının düşmesine neden olmuştur.

Yapılan tahminlere göre, bu dönüşümün on yıl gecikmesi durumunda, 2010 yılı itibarıyla kişi başına düşen gayrisafi yurt içi hasıla (GSYİH) yaklaşık %17 daha düşük olacak ve küresel nüfusa 223 milyon ek insan dahil olacaktı (Gollin ve ark., 2016). Yeşil Devrim'in ilk aşamalarında elde edilen verim artışları, ağırlıklı olarak sulama imkânlarının yüksek olduğu verimli tarım alanlarında yoğunlaşmış; buna karşın, kurak, dağlık ve diğer marjinal bölgeler söz konusu gelişmelerden sınırlı ölçüde yararlanabilmiştir (Harwood, 2019). Tarımsal üretimin yoğunlaşması, bazı bölgelerde çevresel sorunlara neden olmuş olsa da, orman ve mera gibi doğal alanların tarımsal genişlemeye açılmasını sınırlandırarak yaklaşık 18 ila 27 milyon hektarlık bir alanın korunmasına olanak sağlamıştır.

1. Yeşil Devrim Döneminin Olumlu Etkileri

1.1. Verimlilik ve Gıda Güvenliği

1965-2010 yılları arasında yüksek verimli tohumların kullanımıyla tarımsal verimlilik %44 artmış, bu durum gelir artışı ve açlığın azalmasına katkı sağlamıştır. Gelişmekte olan ülkelerde kişi başına gelir yükselmiş, nüfus artış hızı ise azalmıştır (Gollin ve ark., 2016; Pinstup-Andersen, 1985; Pingali, 2012).

1.2.Yoksulluğun Azalması

Özellikle Hindistan gibi ülkelerde tarımsal üretimin artması, kırsal yoksulluğun azalmasına ve ekonomik büyümeye önemli katkı sunmuştur (John ve Babu, 2021; Stepha, 2022). Açlık ve gıda kıtlığı riski bazı bölgelerde büyük ölçüde azaldı.

1.3.Ekonomik Kalkınma

Tarımdaki verim artışı, toplam GSYİH'ya olumlu yansımış ve olası ekonomik kayıpların önüne geçilmiştir (Gollin ve ark., 2016; Pinsturp - Andersen, 1985).

2. Yeşil Devrim Döneminin Olumsuz Etkileri

Yeşil Devrim sürecinde artan girdi kullanımı, toprakta organik madde kaybının yanı sıra asitlenmenin de artmasına neden olmuştur. Aynı dönemde, yoğun gübre kullanımı su kaynaklarında nitrat kirliliğine yol açmış; bu gelişmeler, tarımsal üretimde çevresel sürdürülebilirliğin arka plana itilmesine neden olmuştur (Erisman ve ark., 2008).

2.1.Sosyal Eşitsizlik ve Yoksulluk

Yeşil Devrim sürecinde modern tarım teknolojilerinden en fazla fayda sağlayan kesim büyük ve varlıklı çiftçiler olurken, küçük ölçekli ve düşük gelirli üreticiler bu dönüşümün dışında kalmıştır. Bu durum, kırsal alanlarda toprak mülkiyetinde yoğunlaşmaya, gelir dağılımında eşitsizliğe ve bazı bölgelerde topraksızlık ile yoksulluğun derinleşmesine yol açmıştır (Dawson ve ark., 2016; John ve Babu, 2021).

2.2.Çevresel Sorunlar

Kimyasal gübre ve pestisit kullanımındaki artış; toprak ve su kirliliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve uzun vadede sürdürülemez tarım uygulamaları gibi ciddi çevresel sorunları beraberinde getirmiştir (Pingali, 2012; Harwood, 2019).

2.3.Sağlık ve Beslenme

Tarımsal üretimdeki artışa rağmen, bazı bölgelerde beslenme ve sağlık göstergelerinde kayda değer bir iyileşme sağlanamamış; aşırı kimyasal kullanım ise insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmıştır (Stepha, 2022).

2.4.Yerel Bilgi ve Otonomi Kaybı

Geleneksel tarım sistemleri ve yerel bilgi birikimi bu süreçte zarar görmüş, dışa bağımlı üretim yapısının güçlenmesiyle birlikte çiftçilerin üretim kararlarında özerkliği azalmıştır (Dawson ve ark., 2016).

Sürdürülebilirlik ve Çevresel Farkındalık Dönemi (1980–2000)

1980'li yıllardan itibaren, yoğun kimyasal girdi kullanımının yol açtığı çevresel sorunlar ve toprak sağlığındaki bozulmalar, tarımsal üretimde sürdürülebilirlik arayışlarını gündeme getirmiştir. Bu

süreçte, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini korumaya yönelik yaklaşımlar ön plana çıkmış; özellikle organik tarım, kompost kullanımı, yeşil gübreleme ve entegre nutrient management (IBN) gibi uygulamalar yaygınlık kazanmıştır (Pretty, 2008; Shah ve Wu, 2019). Organik tarım sistemleri, sentetik gübre ve pestisit kullanımını dışlayarak doğal döngüleri esas alırken, IBN uygulamaları organik ve inorganik kaynakları bir arada değerlendirerek hem verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirliği artırmayı hedeflemiştir (Gruhn ve ark., 2000). Bu dönemde ayrıca, toprak biyotasının önemi, erozyon riski ve su kaynaklarının korunması gibi konularda çevresel bilinçlenme artmış ve bu farkındalık tarım politikalarına da yansımaya başlamıştır (Tilman ve ark., 2002).

1. Öne Çıkan Uygulamalar

Bu dönemde çevre dostu tarımsal yaklaşımların benimsenmesiyle birlikte, sürdürülebilir üretim teknikleri yaygınlık kazanmıştır. Özellikle organik tarım kapsamında, resmi olarak sertifikalandırılmış organik gübrelerin kullanımı artmış, bu da hem toprak sağlığının korunmasına hem de tüketici güvenliğinin sağlanmasına katkı sunmuştur. Bunun yanı sıra, biyogübreler ve mikrobiyal inokulantlar gibi mikrobiyal temelli girdilerin kullanımı teşvik edilmiş; bu uygulamalar sayesinde bitki beslenmesi desteklenmiş ve kimyasal gübrelere olan bağımlılık azaltılmıştır. Ayrıca, kompost uygulamaları ve yeşil gübreleme gibi organik madde temelli yöntemler daha fazla benimsenerek toprak verimliliğinin sürdürülebilir biçimde artırılması hedeflenmiştir (Shah ve Wu, 2019; Manimozhi ve Gayathri, 2012).

Türkiye’de Gübre Kullanımının Gelişimi

Türkiye’de kimyasal gübre kullanımı, 1960’lı yıllardan itibaren tarımsal modernleşme politikalarının bir parçası olarak hızla artış göstermiştir. Özellikle 1980 sonrası dönemde, devlet destekleme programları ve sübvansiyonlar aracılığıyla çiftçilerin gübreye erişimi kolaylaştırılmış; bu durum, tarla bitkileri üretiminde verimlilik artışına katkı sağlamıştır (TÜİK, 2023; Güneş ve ark., 2015). Ancak yıllara göre gübre tüketimi verileri incelendiğinde, kullanım miktarının bölgeler arasında önemli farklılıklar gösterdiği ve bazı alanlarda aşırı, bazı alanlarda ise yetersiz gübreleme uygulamalarının yaygın olduğu görülmektedir (Çakmak, 2010). Aşırı ve kontrolsüz kimyasal gübre kullanımı, tarımsal üretimde kısa vadeli verim artışı sağlasada, uzun vadede toprak sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi riskler doğurmaktadır. Özellikle azotlu ve fosforlu gübrelerin yoğun kullanımı; toprakta ağır metal birikimine, tuzluluğun artmasına, besin elementleri dengesinin bozulmasına ve faydalı mikrobiyal faaliyetlerin baskılanmasına yol açmaktadır. Bu durum, toprak yapısının fiziksel ve kimyasal özelliklerinde kalıcı zararlara neden olmakta; aynı zamanda bitki köklerinin besin alım kapasitesini de olumsuz etkilemektedir (Yanardağ, 2022). Ayrıca, fazla gübrelenen alanlardan yer altı ve yüzey sularına sızan azot ve fosfor bileşikler, su kaynaklarında ötrofikasyon riskini artırarak sucul ekosistemlerde oksijen azalması ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi sorunlara neden olabilmektedir. Yapılan bazı toprak analizlerinde, özellikle kadmiyum, kurşun ve arsenik gibi ağır metallerin Avrupa Birliği’nin belirlediği sınır değerlerin üzerine çıktığı bildirilmiştir; bu da gıda zinciri yoluyla insan sağlığını tehdit edecek düzeyde kirlilik riski oluşturabilmektedir (FAO, 2019; Güneş ve ark., 2015).

Karadeniz ve Marmara gibi bölgelerde birim alana düşen gübre kullanımı yüksek iken, Doğu ve Güneydoğu Anadolu’da kullanım sınırlı kalmıştır. Bu dengesizlik, hem verim düzeylerini hem de toprak sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından riskleri beraberinde getirmiştir. Son yıllarda ise gübre kullanımının daha bilinçli ve dengeli yapılabilmesi adına toprak analiz destekleri, tarımsal danışmanlık hizmetleri ve eğitim projeleri ön plana çıkmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).

Günümüz ve Gelecek Perspektifi: Hassas Tarım ve Döngüsel Yaklaşımlar (2000–Günümüz)

- ⇒ Hassas gübreleme: sensörler, GPS, haritalama
- ⇒ Biyoteknolojik gübreler ve kontrollü salınım
- ⇒ Tarımsal atıkların geri kazanımı
- ⇒ Karbon ayak izi ve iklim dostu gübreleme stratejileri

Son yıllarda tarım sektörü, iklim değişikliği, su kıtlığı, toprak bozulması ve doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel çevresel tehditlere yanıt verebilmek amacıyla daha sürdürülebilir ve teknoloji odaklı bir dönüşüm sürecine girmiştir. Bu kapsamda öne çıkan uygulamalardan biri, hassas tarım teknolojilerinin yaygınlaşmasıdır. Bu sistemlerde gübre uygulamaları; toprak analizleri, uzaktan algılama sensörleri ve GPS destekli ekipmanlar aracılığıyla bitki ihtiyacına göre optimize edilmekte, böylece hem verim artırılmakta hem de çevresel etkiler azaltılmaktadır.

Ayrıca, biyoteknolojik gübreler önemli bir gelişme alanı olarak dikkat çekmektedir. Kontrollü salınımlı formülasyonlar ve biyofilm tabanlı taşıyıcı sistemler gibi yenilikçi teknolojiler, besin maddelerinin daha verimli kullanımını sağlamanın yanı sıra çevreye olan zararlı etkileri de azaltmaktadır (Zhang ve ark., 2021).

Bununla birlikte, döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde, gıda endüstrisi yan ürünleri, tarımsal atıklar ve kompost materyalleri yem ya da gübre olarak değerlendirilmekte; bu da atıkların azaltılmasına ve kaynakların yeniden kullanımına dayalı sürdürülebilir bir tarım modelini desteklemektedir.

Son olarak, iklim dostu gübreleme stratejileri geliştirilmekte; karbon ayak izini azaltmaya yönelik uygulamalar tarımsal üretim süreçlerine entegre edilmektedir. Bu stratejiler, hem iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sunmakta hem de çevresel sürdürülebilirliği uzun vadede güvence altına almaktadır (Öztürk ve Yılmaz, 2021).

Günümüzde tarımsal üretimde hem verim artışı sağlamak hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemek amacıyla gübreleme stratejilerinde entegre ve yenilikçi yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, özellikle organik ve mikrobiyal gübre uygulamaları, hem toprak sağlığının korunmasına hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sunmaktadır. Organik materyallerin yanı sıra mikrobiyal ajanlar ile birlikte kullanılan biyolojik girdiler, toprakta karbon tutulum kapasitesini artırmakta, ayrıca azot ve fosforun yıkanarak kaybını önlemekte önemli rol oynamaktadır. Özellikle bambu bazlı biyokömür ile mikrobiyal gübrelerin eş zamanlı kullanımı, tarım alanlarında karbon emisyonlarını %80'e kadar azaltabilmekte, aynı zamanda bitkisel üretimde besin kullanımı verimliliğini artırarak çevresel yükü azaltmaktadır (Zhao ve ark., 2024).

Bir diğer etkili yaklaşım, organik ve inorganik gübrelerin birlikte kullanımınıdır. Kimyasal gübrelerin bir kısmının organik kaynaklarla ikame edilmesi, toprak sistemlerinde sera gazı emisyonlarının (özellikle N_2O , NO ve NH_3) azalmasını sağlamaktadır. Araştırmalar, bu tür entegre gübreleme sistemlerinin toplam karbon ayak izini %17 ila %22 oranında düşürdüğünü, buna karşılık ürün verimini ve toprak organik karbon düzeyini artırdığını göstermektedir (Lin ve ark., 2024; Zhao ve ark., 2024).

Ayrıca, azot uygulama miktarının optimize edilmesi ve bitki yoğunluğunun artırılması gibi pratik düzenlemeler de çevresel etkilerin azaltılmasında etkili olmaktadır. Azotlu gübre kullanımının yalnızca %10 oranında azaltılması ve ekim sıklığının artırılması, ürün verimini korurken, karbon ayak izinde %22–27 oranında azalma sağlayabilmektedir. Bu tür uygulamalar, sadece doğrudan sera gazı emisyonlarını değil, aynı zamanda üretim sürecine bağlı dolaylı çevresel etkileri de azaltarak ekonomik verimliliği ve sürdürülebilirlik performansını iyileştirmektedir (Wu ve ark., 2024; Murthy ve ark., 2024).

Güncel Sorunlar ve Geleceğe Yönelik Öneriler

Türkiye’de ve dünyada gübre kullanımına ilişkin en önemli güncel sorunlardan biri, bilinçsiz ve aşırı uygulamalar nedeniyle ortaya çıkan toprak ve su kirliliğidir. Gereğinden fazla kullanılan kimyasal gübreler, özellikle azotlu bileşikler, yer altı sularında nitrat birikimine ve toprakta asitlenmeye yol açarak hem çevresel hem de halk sağlığı açısından risk oluşturmaktadır (Erisman ve ark., 2008; Güneş ve ark., 2015). Ayrıca, çiftçilerin büyük bir kısmının gübreleme konusunda yeterli teknik bilgiye sahip olmaması, yanlış doz ve zamanlama gibi verimliliği düşüren uygulamaların yaygınlaşmasına neden olmaktadır (Çakmak, 2010). Bu kapsamda, çiftçi eğitimi, yayım hizmetlerinin güçlendirilmesi ve toprak analizine dayalı gübreleme planlamasının yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır.

Bununla birlikte, dijital tarım teknolojilerinin (uydu destekli haritalama, sensör temelli izleme, veri tabanlı karar destek sistemleri) gübre uygulamalarına entegrasyonu, hem girdi verimliliğini artırmakta hem de çevresel etkileri azaltmaktadır (Zhang ve ark., 2021). Girdi verimliliği ve üretim artışı, değişken oranlı uygulama teknolojisi (Variable Rate Technology – VRT), uzaktan algılama, arazi sensörleri ve GPS destekli sistemler aracılığıyla tarla içindeki mikro düzeydeki farklılıkları analiz ederek, her bir bölgenin anlık besin ihtiyacına uygun şekilde gübreleme yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu teknoloji sayesinde, özellikle azotlu gübrelerde olmak üzere, toplam gübre tüketiminde %60’a varan bir azalma sağlanırken, aynı zamanda verim oranlarında %62’ye kadar artış kaydedilebilmektedir (Zhang ve ark., 2021). Bu etkili kaynak yönetimi yalnızca ekonomik girdi maliyetlerini düşürmekle kalmamakta, aynı zamanda çevresel yükü azaltarak sürdürülebilir üretimi de teşvik etmektedir. Öte yandan, Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sistemler ile entegre edilen yapay zekâ destekli karar destek mekanizmaları, toprak nemi, hava sıcaklığı, bitki gelişim düzeyi gibi çoklu sensör verilerini analiz ederek zamana ve yere özgü gübreleme stratejileri geliştirmektedir. Bu sayede hem gübre uygulama zamanı hem de dozajı bilimsel temellere dayalı olarak belirlenmekte; bu da yalnızca verim artışı değil, ürün kalitesinde de iyileşme sağlamaktadır (Öztürk ve Yılmaz, 2021).

Türkiye’nin Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları gibi uluslararası stratejilerle uyumlu politikalar geliştirmesi, gübre kullanımının ekosistem temelli planlanması açısından kritik bir gerekliliktir (European Commission, 2020). Önümüzdeki süreçte, bilim temelli ve bölgeye özgü gübreleme stratejilerinin benimsenmesi, hem tarla bitkileri üretiminde verimliliği artıracak hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

Çevresel Etkilerin Azaltılması noktasında; gelişmiş dijital tarım uygulamaları, özellikle kayıt sistemleri, coğrafi bilgi sistemleri (GIS) ve konum tabanlı haritalama teknolojileri sayesinde, tarımda kullanılan gübre ve pestisit miktarını önemli ölçüde optimize etmektedir. Arazi bazlı uygulama verilerinin hassas şekilde izlenmesi ve analiz edilmesiyle, bu girdilerin kullanımı %80’e varan oranlarda azaltılabilmektedir; buna paralel olarak sera gazı emisyonlarında ve tarımsal su kullanımında %20 ila %50 arasında düşüşler sağlanabilmektedir (Zhang ve ark., 2021; Öztürk ve Yılmaz, 2021). Bu gelişmeler, sadece ekonomik sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadele açısından da çevresel faydaları ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca, dijital ikiz (digital twin) teknolojileri ve sayısal modelleme araçları, farklı gübreleme stratejilerinin uzun vadeli çevresel etkilerini simüle ederek üreticilerin daha sürdürülebilir kararlar almasına katkı sağlamaktadır. Bu simülasyon sistemleri, toprakta besin birikimi, su kirliliği riski, karbon ayak izi ve tarımsal verimlilik gibi çok boyutlu çıktıları analiz ederek, çevresel açıdan en düşük maliyetli senaryoların belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Tarımda dijitalleşme süreciyle birlikte, veri tabanlı karar destek sistemleri ve akıllı tarım yönetim platformları, gübreleme başta olmak üzere birçok tarımsal uygulamanın optimizasyonunda önemli rol oynamaktadır. Bu sistemler; toprak verileri, hava koşulları, bitki gelişim evreleri ve geçmiş

üretim kayıtlarını analiz ederek, çiftçilere ve tarım danışmanlarına gerçek zamanlı, veri destekli tavsiyeler sunmakta ve böylece uygulama hatalarının azaltılmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda hem gübreleme verimliliği artmakta, hem de işletme genelinde kaynak kullanımı daha etkin hale gelmektedir (Zhang ve ark., 2021; Öztürk ve Yılmaz, 2021; Toselli ve ark., 2023).

Özellikle uzaktan algılama teknolojileri ve uydu destekli sensör sistemleri, tarla içi varyasyonları ayrıntılı biçimde haritalayarak farklı alanların gübre ihtiyacına özgü müdahaleler yapılmasına olanak tanımaktadır (Radočaj ve ark., 2022). Bu teknolojilerle birlikte çalışan dijital ikiz modeller ve yapay zekâ destekli yazılımlar, bitki besleme senaryolarının simülasyonunu sağlayarak, verim, maliyet ve çevresel etki bakımından en uygun stratejilerin belirlenmesini mümkün kılmaktadır.

Ayrıca, otonom tarım makineleri ve robotik sistemler, gübre uygulamalarını yüksek hassasiyetle ve tekrarlanabilirlik düzeyi yüksek şekilde gerçekleştirebilmekte; bu da iş gücü ihtiyacını azaltmakta, yakıt tüketimini düşürmekte ve tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Xing ve Wang, 2024). Bu bütüncül yaklaşım sayesinde, hem ürün kalitesi hem de çevresel sorumluluk bakımından önemli kazanımlar sağlanmaktadır.

SONUÇ

Tarımda gübre uygulamalarının tarihsel evrimi, yalnızca tarımsal üretim tekniklerinin değil, aynı zamanda insan-doğa ilişkisinin ve çevresel farkındalığın da dönüşümünü yansıtmaktadır. Antik çağlardan 19. yüzyıla kadar uzanan geleneksel dönemde, gübrelemenin temel dayanağı yerel kaynaklara dayalı, organik içerikli materyaller olmuş; toprak verimliliğini koruma çabaları, tarımsal bilgi birikimi ve su yönetimiyle birlikte şekillenmiştir.

19.yüzyılda kimyasal gübrelerin bilimsel temellerinin atılması ve 20. yüzyıl başında Haber-Bosch süreci ile sanayi tipi gübre üretiminin başlaması, tarımda verim odaklı bir paradigmanın yükselişine zemin hazırlamıştır. Yeşil Devrim ile birlikte bu süreç küresel ölçekte hız kazanmış, tarla bitkileri üretiminde kayda değer verim artışları sağlanmıştır. Ancak bu kazanımların çevresel, sosyal ve sağlık temelli maliyetleri giderek daha görünür hâle gelmiştir.

1980'li yıllardan itibaren ortaya çıkan sürdürülebilirlik temelli yaklaşımlar, organik gübreleme, entegre besin yönetimi ve çevre dostu tarım pratikleri gibi yöntemleri öne çıkarmıştır. Günümüzde ise hassas tarım teknolojileri, biyoteknolojik gübreler ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda geliştirilen stratejiler, gübrelemede yeni bir dönemi temsil etmektedir. Toprak analizleri, uzaktan algılama sistemleri ve kontrollü salınımlı ürünler ile hem kaynak kullanımı optimize edilmekte hem de çevresel etkiler en aza indirilmeye çalışılmaktadır.

Bu bağlamda, tarla bitkileri üretiminde gübreleme uygulamalarının geleceği, yalnızca üretim artışı sağlamaya değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, iklim değişikliği ile uyum, besin maddelerinin etkin yönetimi ve çiftçi refahının artırılması gibi çok boyutlu hedeflere hizmet etmek durumundadır. Türkiye özelinde de gübre politikalarının, çiftçi eğitiminin, dijital tarım uygulamalarının ve yerli girdi üretiminin güçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Gübre kullanımının yalnızca teknik bir uygulama değil; aynı zamanda ekolojik, ekonomik ve sosyo-politik bir müdahale biçimi olduğu unutulmamalıdır. Bu çerçevede, disiplinlerarası araştırmaların teşvik edilmesi, yerel bilgiyle modern teknolojilerin entegrasyonu ve karar verici mekanizmaların bilime dayalı yönlendirilmesi, hem ulusal hem de küresel ölçekte sürdürülebilir tarımsal üretim için elzemdir.

KAYNAKLAR

Angelakis, A., Zaccaria, D., Krasilnikoff, J., Salgot, M., Bazza, M., Roccaro, P., Jiménez, B., Kumar, A., Wang, Y., Baba, A., Harrison, J., Garduno-Jimenez, A., & Fereres,

- E., 2020. Irrigation of World Agricultural Lands: Evolution through the Millennia. Water. <https://doi.org/10.3390/w12051285> (Erişim tarihi: 30.04.2025).
- Çakmak, E. H. (2010). Agricultural policy reforms and their implications on rural development: Turkey case. *New Medit*, 9(4), 19–26.
- Çiftçi, V., & Kara, M. (2020). Tarımsal üretimde gübre kullanımı ve çevresel etkileri. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(2), 89–98.
- Çiftçi, V., & Kara, M. (2020). Tarımsal üretimde gübrelemenin önemi ve güncel yaklaşımlar. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(3), 415–426.
- Dawson, N., Martin, A., & Sikor, T., 2016. Green Revolution in Sub-Saharan Africa: Implications of Imposed Innovation for the Wellbeing of Rural Smallholders. *World Development*, 78: 204–218. <https://doi.org/10.1016/J.WORLDDEV.2015.10.008> (Erişim tarihi: 30.04.2025).
- D’Agostini, F., Lucarini, G., & Radini, A. (2022). *Phytoliths as indicators of plant water availability: The case of millet cultivation in the Indus Valley Civilization*. *Journal of Archaeological Science*, 139, 105581. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105581>
- Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J. N., Klimont, Z., & Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1(10), 636–639.
- Evenson, R. E., & Gollin, D. (2003). Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, 300(5620), 758–762.
- FAO (2019). The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gollin, D., Hansen, C., & Wingender, A. (2016). Two Blades of Grass: The Impact of the Green Revolution. *Journal of Political Economy*, 129, 2344 - 2384. <https://doi.org/10.1086/714444>.
- Güneş, A., İnal, A., & Alpaslan, M., 2015. Bitki Besleme ve Gübreleme. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Güneş, A., İnal, A., & Alpaslan, M., 2015. Gübreleme ve Toprak Verimliliği. Kalite Matbaacılık, Ankara.
- Güneş, A., İnal, A., & Alpaslan, M. (2015). Toprak verimliliği ve gübreleme stratejileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 4(1), 45–59.
- Harwood, J. (2019). Was the Green Revolution intended to maximise food production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 17(4), 312–325. <https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1637236>
- Haverstock, N., & Schroeder, R., 1970. Green Revolution. <https://doi.org/10.4135/9781446247501.n1767> (Erişim tarihi: 30.04.2025)
- James, N., Decaix, A., Villasana, I., Kenoyer, J. M., Meadow, R. H., & d’Alpoim Guedes, J. (2024). Taphonomy and labour at the Indus Valley site of Harappa (3700–1300 BC). *Antiquity*, 98(403), 83–100. <https://doi.org/10.15184/aqy.2024.196>.
- John, D., & Babu, G., 2021. Lessons From the Aftermaths of Green Revolution on Food System and Health. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.644559> (Erişim tarihi: 30.04.2025).
- Khush, G. S. (2001). Green revolution: the way forward. *Nature Reviews Genetics*, 2(10), 815–822.
- Küçük, T. (2017). Türkiye’de tarım tarihi: Gübreleme uygulamaları. *Ziraat Tarihi Araştırmaları*, 12(1), 55–72.
- Lin, S., Wang, Q., Wei, K., Zhao, X., Tao, W., Sun, Y., Su, L., & Deng, M. (2024). Comprehensive assessment of combined inorganic and organic fertilization strategies on cotton cultivation: implications for sustainable agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13673>
- Manimozhi, K., & Gayathri, D. (2012). Eco Friendly Approaches for Sustainable Agriculture. Marschner, P., 2012. Marschner’s Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). Academic Press, London.
- Mehta, D., 2018. The Green Revolution did not increase poverty and hunger for millions. *Nature Plants*, 4: 736. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0240-8> (Erişim tarihi: 30.04.2025)
- Murthy, R., Nagaraju, B., Govinda, K., Kumar, S., et al. (2024). *Soil test crop response nutrient prescription equations for improving soil health and yield sustainability a long-term study under Alfisols of southern India*. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1439523>

- Öztürk, M., & Yılmaz, D. (2021). Hassas tarımda gübreleme teknolojileri. Tarımda Dijitalleşme Sempozyumu Bildirileri, 141–148.
- Pingali, P., 2012. Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109: 12302–12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109> (Erişim tarihi: 30.04.2025)
- Pinstrup-Andersen, P., & Hazell, P., 1985. *The impact of the green revolution and prospects for the future*. *Food Reviews International*, 1: 1/25. <https://doi.org/10.1080/87559128509540765> (Erişim tarihi: 30.04.2025)
- Poznyak, S., & Ivaniuk, H. (2022). *Knowledge About Soils in the Civilizations of the Ancient World*. The Scientific Issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Geography. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.22.1.1>
- Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). *The Role of Remote Sensing Data and Methods in a Modern Approach to Fertilization in Precision Agriculture*. *Remote Sensing*, 14(3), 778. <https://doi.org/10.3390/rs14030778>
- Smil, V., 2001. *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. MIT Press, Cambridge.
- Stepha, G. (2022). Impact of Green Revolution in India. *International Journal of Health Sciences*. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns4.10077>.
- Stewart, W. M., Dibb, D. W., Johnston, A. E., & Smyth, T. J. (2005). The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*, 97(1), 1–6.
- Styring, A. K., Charles, M., Fantone, F., Hald, M. M., McMahon, A., Meadow, R., et al. (2017). *Isotope evidence for agricultural extensification reveals how the world's first cities were fed*. *Nature Plants*, 3. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.76>
- Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022. Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü 2022 Faaliyet Raporu. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Yayınları, Ankara.
- Teclaff, L. A. (1967). The river basin as the basis of water control for agriculture in antiquity. In *The River Basin in History and Law* (ss. 15–25). https://doi.org/10.1007/978-94-015-1025-7_3
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677.
- Toselli, M., Baldi, E., Ferro, F., Rossi, S., & Cillis, D. (2023). *Smart Farming Tool for Monitoring Nutrients in Soil and Plants for Precise Fertilization*. *Horticulturae*, 9(9), 1011. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9091011>
- Tyagi, A., 2016. *Towards a Second Green Revolution*. *Irrigation and Drainage*, 65: 388–389. <https://doi.org/10.1002/ird.207> (Erişim tarihi: 30.04.2025)
- TÜİK, 2023. Gübre Kullanım İstatistikleri 2000-2022. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://tuik.gov.tr> (Erişim tarihi: 30.04.2025)
- Wu, P., Wu, Q., Huang, H., Xie, L., An, H., Zhao, X., et al. (2024). *Global meta-analysis and three-year field experiment shows that deep placement of fertilizer can enhance crop productivity and decrease gaseous nitrogen losses*. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109263>
- Yanardağ, A. (2022). Heavy Metal Evaluation of Overused Commercial Fertilizers and Their Interactions with Soil Properties. *Journal of Agricultural Production*. <https://doi.org/10.56430/japro.1148305>.
- Xing, Y., & Wang, X. (2024). *Precise application of water and fertilizer to crops: challenges and opportunities*. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1444560>
- Zhao, K., Zhao, X., He, L., Wang, N., Bai, M., Zhang, X., Chen, G., Chen, A., Luo, L., & Zhang, J. (2024). *Comprehensive assessment of straw returning with organic fertilizer on paddy ecosystems: a study based on greenhouse gas emissions, C/N sequestration, and risk health*. *Environmental Research*, 120519. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120519>
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2021). *Managing nitrogen for sustainable development*. *Nature*, 594(7863), 74–83.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2021). *Managing nitrogen for sustainable development*. *Nature*, 618(7954), 305–313.