

Kimyasal ve Organik Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri

Güney AKINOĞLU^{1*}, Songül RAKICIOĞLU², Salih DEMİRKAYA³, Zerrin CİVELEK⁴, Ayhan HORUZ⁵, İlayda KULEYİN⁶

^{1,2,3,4,5,6}Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0003-4624-2876>

²<https://orcid.org/0000-0002-8013-6439>

³<https://orcid.org/0000-0002-7374-0160>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-8303-9407>

⁵<https://orcid.org/0000-0002-8338-3208>

⁶<https://orcid.org/0009-0004-0999-2824>

*Sorumlu yazar: guney_akinoglu@ymail.com

Derleme

Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 27.12.2024

Kabul tarihi: 28.04.2025

Online Yayınlanma: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:

Toprak sağlığı

Kimyasal gübre

Organik gübre

Toprak organik karbonu

ÖZ

Sürdürülebilir tarımsal üretim, topraktan uzaklaştırılan veya kaybolan besin maddelerinin yerine konulmasını gerektirir. Bu nedenle, mahsul verimliliğini sürdürülebilir kılmak amacıyla düzenli olarak besin girdileri sağlanmalıdır. Kimyasal ve organik gübreler, bu gereksinimin karşılanmasında en sık kullanılan girdiler arasındadır. Bu girdilerin mahsul performansı, besin kullanım etkinliği ve çevresel etkileri açısından değerlendirilmesine yönelik önemli araştırmalar yapılmış olsa da, özellikle bu uygulamaların toprak sağlığı üzerindeki etkileri daha az incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, kimyasal ve organik gübre girdilerinin toprak sağlığı üzerine etkilerini mevcut literatür ışığında özetlemek ve toprak sağlığına yönelik araştırma boşluklarını belirlemektir. Bu derleme kapsamında, toprak sağlığını değerlendirmek üzere toprak organik karbonu, toprak organik maddesi, kation değişim kapasitesi, toprak pH'sı, toprak agregat stabilitesi, su tutma kapasitesi ve mikrobiyal biyokütle gibi temel parametreler dikkate alınmıştır. Araştırma sonuçları, kimyasal gübre uygulamalarının, bitki tarafından alınabilecek miktarları aşmadığı sürece toprak organik maddesini ve toprak sağlığını olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Organik gübreler toprak organik karbonuna ve toprak sağlığının çeşitli parametrelerine katkıda bulunur, ancak bu girdiler farklı besin seviyelerinde uygulanır ve toprak sağlığı üzerindeki etkileri değişir, bu nedenle karbon bazında değerlendirilmesi zordur. Genel olarak, besin maddesi içeren gübrelerin toprak sağlığını desteklediği görülmekte; ancak, bu girdilerin toprak sağlığına etkilerini daha ayrıntılı ve karşılaştırmalı olarak inceleyen çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Effects of Chemical and Organic Fertilizers on Soil Health

Reviews

Article History:

Received: 27.12.2024

Accepted: 28.04.2025

Published online: 15.12.2025

Keywords:

Soil health

Chemical fertilizer

Organic fertilizer

Soil organic carbon

ABSTRACT

Sustainable agricultural production requires the replenishment of nutrients removed or lost from the soil. Thus, regular nutrient inputs are essential to maintain crop productivity in a sustainable manner. Chemical and organic fertilizers are among the most commonly used inputs for this purpose. While significant research has evaluated the effectiveness of these inputs in terms of crop performance, nutrient use efficiency, and environmental impact, the effects of these inputs on soil health remain less understood. The aim of this study is to summarize the effects of chemical and organic fertilizer inputs on soil health based on the existing literature, and to identify research gaps regarding soil health. Within the scope of this

review, fundamental parameters such as soil organic carbon, soil organic matter, cation exchange capacity, soil pH, soil aggregate stability, water holding capacity, and microbial biomass were considered for evaluating soil health. Research findings indicate that chemical fertilizer inputs can positively influence soil organic matter and soil health when applied within the limits of plant nutrient uptake. Organic fertilizers contribute to soil organic carbon and various soil health parameters; however, these inputs are applied at differing nutrient levels, and their impacts on soil health vary, making their assessment on a carbon basis challenging. Overall, nutrient-containing inputs are shown to benefit soil health; however, more detailed and comparative studies are needed to better understand their specific impacts on soil health.

To Cite: Akınoğlu G., Rakıcıoğlu S., Demirkaya S., Civelek Z., Horuz A., Kuleyin İ. Kimyasal ve Organik Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(5): 2546-2573.

1. Giriş

Bitkisel üretimde, hasat edilen ürünlerle birlikte topraktan önemli miktarda besin maddesi de uzaklaştırılmaktadır. Bu uygulama sürekli hale geldikçe, topraktaki besin maddeleri giderek azalır, çünkü toprakta gerçekleşen biyokimyasal süreçler, kaybedilen besinleri hızla ve yeterli miktarda yenileyerek bir sonraki mahsulün ihtiyaçlarını karşılayacak düzeye getiremez. Bu durum, besin yönetimini sürdürülebilir tarım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline getirir. Hasat sırasında kaybedilen besin maddelerinin geri kazandırılması için en yaygın yöntemler, kimyasal ve organik gübrelerin toprağa uygulanması yoluyla besin girdilerinin sağlanmasıdır (Howe ve ark., 2024).

Gübreleme, tarımsal üretimde önemli bir uygulamadır (Lenssen ve ark., 2020) ve gübrelerin doğru yöntem ve miktarlarda kullanımı, verimliliği artırmak ve toprak kalitesini iyileştirmek açısından kritik önem taşımaktadır (Bhattacharyya ve ark., 2007). Ancak gübrelerin uzun süre boyunca aşırı kullanılması, kimyasal gübrelerin düzensiz ve kontrolsüz uygulanması veya organik gübre kullanımının azalması gibi yanlış uygulamalar, toprak organik maddesinin azalması, yeraltı sularının kirlenmesi ve toprak verimliliğinin düşmesi gibi çevresel sorunlara yol açabilmektedir (Bansal ve ark., 2020; Shinoto ve ark., 2020).

Besin girdilerinin verimlilik, mahsul performansı ve çevresel etkiler üzerindeki etkinliği üzerine önemli çalışmalar yapılmış olsa da (Ronner ve ark., 2016; Xia ve ark., 2021; Schmitt ve ark., 2024), bu girdilerin toprak sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkileri hâlâ tam olarak anlaşılmamıştır. Bu derleme, kimyasal ve organik gübreler gibi besin girdilerinin toprak sağlığı üzerindeki etkisine ilişkin mevcut literatürü özetlemeyi amaçlamaktadır.

2. Kimyasal Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri

Mineral kaynaklardan veya endüstriyel süreçlerle elde edilen gübreler (kimyasal gübreler), yüksek saflıkta ve bitkilerin ihtiyaç duyduğu temel besin maddelerini içeren kaynaklardır. Çoğu kimyasal gübre, çözünür formda olup, bitkiler tarafından doğrudan kullanılabilen ve karbon (C) içeriği oldukça düşük veya hiç bulunmayan bileşenler içerir. Mineral gübrelerin bir kısmı doğrudan madencilik yoluyla elde edilirken (örneğin, kaya fosfatı ve kükürt), diğerleri kimyasal işlemler sonucu üretilmektedir. Bu gübrelerin temel

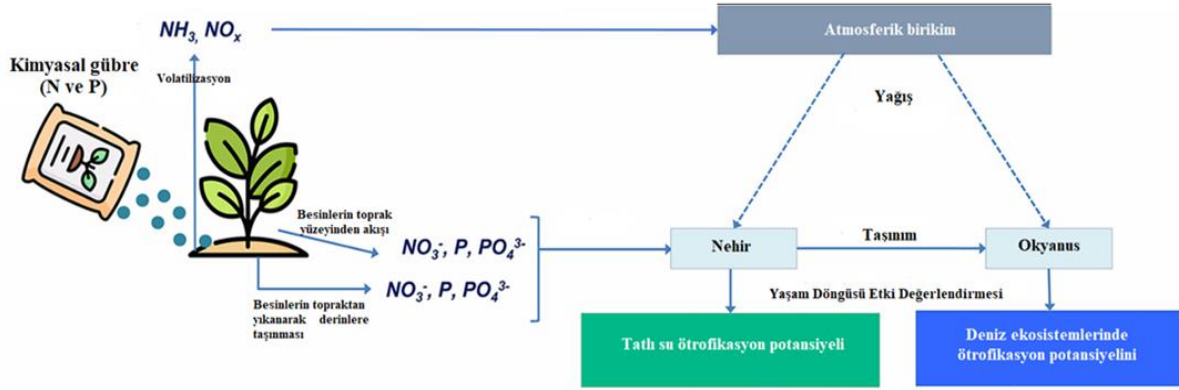
bileşenlerinden biri olan azot (N), enerji tüketimi yüksek olan Haber-Bosch prosesi ile üretilmektedir (Cherkasov ve ark., 2015). Bu proseste, atmosferik azot gazı (N₂), hidrojen gazı (H₂) ile reaksiyona girerek amonyak (NH₃) oluşturur. Proseste kullanılan hidrojen gazı ise büyük ölçüde doğal gazın (metan, CH₄) buharla reforme edilmesi yöntemiyle elde edilmekte olup, bu yöntem yüksek enerji tüketimi ve önemli miktarda karbon salımına neden olmaktadır. Elde edilen amonyak daha sonra bitkilerin doğrudan kullanabileceği amonyum (NH₄⁺) ve nitrat (NO₃⁻) gibi gübre bileşiklerine dönüştürülmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan amonyum nitrat, kalsiyum nitrat, potasyum nitrat, üre, monoamonyum fosfat ve diamonyum fosfat gibi gübreler, bu sürecin önemli çıktıları arasında yer alır (Tablo 1). Bu gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirirken, özellikle besin elementlerinin kullanılabilirliği, bitki performansı ve uzun vadeli sürdürülebilirlik üzerindeki rolleri önem kazanmaktadır. Fosforlu gübreler, çoğunlukla fosfat kayasının asitlerle işlenmesiyle elde edilir. Bu işlem, bitkiler tarafından kolayca alınabilen fosfor (P) bileşiklerine dönüştürülmesini sağlar. Amonyum fosfat türevleri bu gübrelerin başlıca formunu oluştururken, yüksek etkili bir diğer P kaynağı olarak triple süper fosfat da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Potasyum (K) gübreleri ise K açısından zengin tuzların veya maden cevherlerinin rafine edilmesiyle üretilir. Bazı durumlarda, çözültiden madencilik yöntemi de kullanılabilir. Potasyum sülfat ve potasyum nitrat dışında, potasyumlu gübrelerden biri de potasyum klorürdür. Bu potasyumlu gübreler, tarımsal uygulamalarda bitkilerin K ihtiyaçlarını etkin biçimde karşılamak için temel girdiler arasında yer alır (Howe ve ark., 2024).

Tablo 1. Bazı kimyasal gübreler ve primer besin maddesi kapsamları

Gübre adı	Kimyasal formülü	Primer besin içeriği (%)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Üre	CO(NH ₂) ₂	46	-	-
Amonyum sülfat	(NH ₄) ₂ SO ₄	21	-	-
Amonyum nitrat	NH ₄ NO ₃	33	-	-
Kalsiyum nitrat	Ca(NO ₃) ₂	15,5	-	-
Kireçli amonyum nitrat	NH ₄ NO ₃ + CaCO ₃	21-26	-	-
Diamonyum fosfat	(NH ₄) ₂ HPO ₄	18	46	-
Monoamonyum fosfat	NH ₄ H ₂ PO ₄	11	52	-
Normal süper fosfat	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + CaSO ₄	-	16-18	-
Triple süper fosfat	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	-	42-44	-
Potasyum klorür (müriat)	KCl	-	-	60
Potasyum sülfat	K ₂ SO ₄	-	-	50
Potasyum nitrat	KNO ₃	13	-	44
Monopotasyum fosfat	KH ₂ PO ₄	-	52	34

Geleneksel bitki üretim sistemleri (konvansiyonel üretim sistemleri), mahsul verimini artırmak ve hasat sırasında topraktan alınan besinleri yeniden kazandırmak için gübre kullanımına dayanır. Gübrelerin etkinliği, uygulanan besin maddesi, yetiştirilen ürün türü ve yerel koşullara bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik gösterir. Özellikle azotlu gübrelerinin etkinliği çoğunlukla düşük seviyededir. Azot (N), tüm bitkilerin büyüme ve gelişimi için gerekli temel bir elementtir. Küresel ölçekte, N, tarımda en yaygın şekilde kullanılan gübre bileşenidir. Ancak yapılan araştırmalar, bitkilerin uygulanan azotun yalnızca yaklaşık %50'sini etkin bir şekilde kullandığını, geri kalan kısmının ise çeşitli yollarla çevreye sızarak

kaybolduğunu ortaya koymuştur (Govindasamy ve ark., 2023). Bu durum, hem verimlilik kayıplarına yol açmakta hem de çevresel sorunları tetiklemektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Tarım topraklarına uygulanan gübrelerin (N ve P) çevresel döngüsü (Govindasamy ve ark., 2023)

Gübrelerin tarımsal sistemler üzerindeki etkisi genellikle ürün verimi ve çevresel etkileri üzerine odaklanmıştır (Hawkesford, 2014; Ronner ve ark., 2016; Schmitt ve ark., 2024). Ancak gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkisi sınırlı ölçüde anlaşılmıştır ve bu konuda yapılan incelemeler ve meta-analiz çalışmaları literatürdeki bu bilgi boşluğunu gidermeye yönelik katkılarda bulunmuştur (Grandy ve ark., 2022; Krasilnikov ve ark., 2022). Durumu daha karmaşık hale getiren bir diğer etken ise, çeşitli gübreleme seviyeleriyle uzun vadeli çalışmalar yürüten araştırmaların kimyasal, fiziksel ve biyolojik toprak sağlığı özelliklerini değerlendirmesidir (Duo ve ark., 2014; Poffenbarger ve ark., 2017; Dhiman ve ark., 2019). Bu araştırmalar, gübrelerin sadece verim değil, aynı zamanda uzun vadeli toprak sağlığı üzerindeki etkilerini de ortaya koymak açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

2.1. Kimyasal Gübrenin Toprağın Kimyasal Özelliklerine Etkileri

Toprak organik karbonu (TOK), birden fazla toprak özelliğini etkileme ve toprak işlevlerini yönlendirme yeteneği nedeniyle toprak sağlığının en önemli göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir. 24 saatlik potansiyel C mineralizasyon değerlendirmesi ve TOK içeriği, toprak sağlığının en iyi iki ölçüsü olarak önerilmektedir (Liptzin ve ark., 2022). Dünya genelinde çeşitli ürünler üzerinde gerçekleştirilen çok sayıda araştırma ve meta-analiz, genellikle azotlu gübre girdilerinin, ekili sistemlerde N girdisi olmaksızın elde edilen sonuçlara göre TOK'yi artırdığını ortaya koymuştur (Geisseler ve ark., 2016; Dhiman ve ark., 2019; Tang ve ark., 2023).

Gübre girdilerinin sağladığı ürün büyümesindeki artış, zamanla TOK'yi artıran daha fazla yüzey kalıntısı ve kök biyokütlesine katkıda bulunmaktadır. Dünya genelinde 107 uzun vadeli gübreleme çalışmasının meta-analizi, gübrelemenin TOK'yi gübrenenmemiş bir kontrole kıyasla ortalama %12,8 oranında artırdığını bildirmiştir (Geisseler ve Scow, 2014). Değerlendirilen 107 çalışmadan yalnızca 18'inde TOK'de bir azalma gözlemlenmiştir (Geisseler ve Scow, 2014). Poffenbarger ve ark. (2017) ile Dhiman ve ark. (2019), uzun vadeli çalışmalarda (sırasıyla 14-16 yıl ve 44 yıl) düşük, optimum ve aşırı oranlarda N

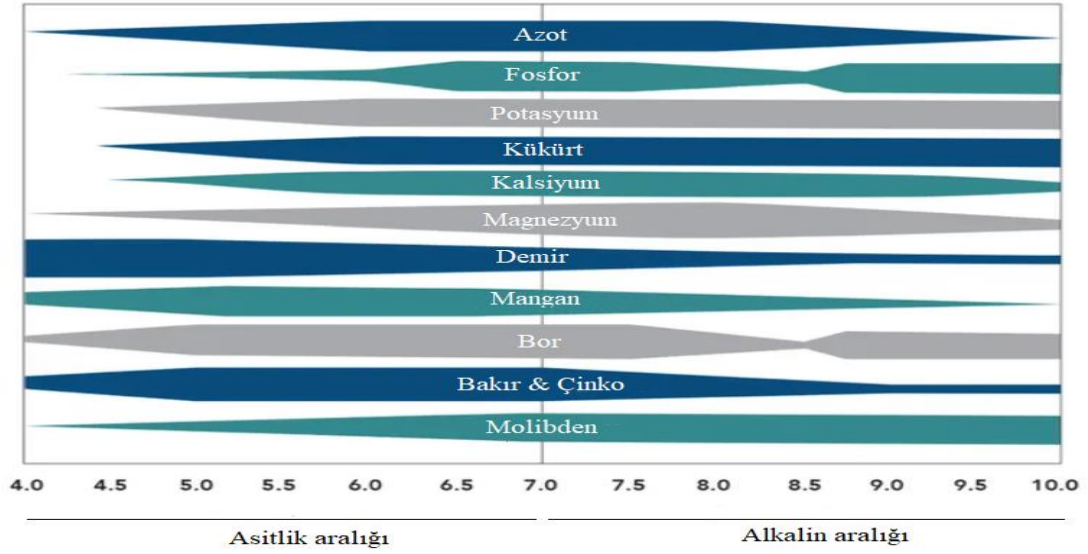
uygulamaları gerçekleştirmişlerdir. Her iki çalışma da, TOK'nin baklagil içermeyen ekim sistemlerinde N gübre oranının agronomik olarak optimum olduğu zaman en yüksek seviyeye ulaştığını tespit etmişlerdir. Dhiman ve ark. (2019), buğday ekim sistemleri için önerilen N, P ve K oranlarını kullanırken, Poffenbarger ve ark. (2017) Iowa'daki dört ayrı bölgede her ekim sistemi için (sürekli mısır ve mısır-soya fasulyesi rotasyonu) agronomik olarak optimum N oranlarını belirlemişlerdir. Bu oranlar, 7 farklı N oranı için 14 ila 16 yıllık ortalamalara dayanmaktadır. N oranları her bölge ve ekim sistemi için optimum N değerine göre ölçeklendiğinde, Poffenbarger ve ark. (2017) TOK'nin optimum orana kadar arttığını, ardından sürekli mısır sisteminde hafifçe azaldığını, mısır-soya fasulyesi sisteminde ise N oranıyla birlikte TOK'de hafif fakat önemli olmayan bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Lu ve ark. (2011) tarafından yapılan bir çalışma, ormanlar ve çayırarda N uygulaması ile TOK'nin azaldığını, ancak tarımsal ekosistemlerde %3,6 oranında önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir.

Azotlu gübrelerin tarımsal üretimde optimum düzeyin üzerine çıkarak kullanılması, bitki büyümesini verimden ziyade vejetatif gelişmeye yönlendirerek verim kayıplarına neden olabilir (Marschner, 1995; Albornoz, 2016). Vejetatif büyümedeki potansiyel kazanımlara rağmen, aşırı N gübrelemesinden kaynaklanan TOK miktarı, optimum N oranından daha az, ancak N olmayan kontrol gruplarından daha fazla olarak bulunmuştur (Poffenbarger ve ark., 2017; Singh, 2018). Aşırı N uygulamasının, ek eksojen N veya kalıntıların C/N oranının düşürülmesi yoluyla organik madde bozunması ile ilişkili N sınırlamasını azalttığı düşünülmektedir (Poffenbarger ve ark., 2017; Singh, 2018). Ancak, fotosentez ürünlerinin kök biyokütlesi yerine topraküstü biyokütlesine kaydırılmasının da gerçekleştiği bilinmektedir (Marschner, 1995). Bu durum, TOK'deki kök biyokütlesinin önemini vurgulamakta ve diğer çalışmalarda (Lu ve ark., 2011; Burke ve ark., 2019) önerilen bulgularla örtüşmektedir.

Bazı sistemlerde, N gübrelemesinin toprak organik madde (TOM) bozunma oranında bir artışa yol açabileceği öne sürülmüştür (Kuzyakov ve ark., 2000). Ancak bu olgu, yayınlanmış uzun vadeli arazi denemelerinde kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. N gübrelemesi, subtropikal bir çeltik üretim sisteminde gübrelenmemiş parsellere kıyasla toprak organik maddesinin (TOM) ayrışma hızını yavaşlatmış ve karbondioksit (CO₂) ile metan (CH₄) emisyonlarını azaltmıştır (Zhu ve ark., 2018). Zhu ve ark. (2018), bu durumun mikrobiyal biyokütledeki azalma ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Başka bir çalışmada, NPK gübrelerinin eklenmesi, taze biyokütle girdilerinden elde edilen TOK miktarını artırarak, bir Çin mısır ekim sisteminde toprak organik karbonun mineralizasyon hızını yavaşlatmıştır (Wu ve ark., 2019). Ancak orman ekosistemlerinde, TOK'yi toprak profili boyunca azaltan bir dizi N uygulama oranı priming etkisini teşvik etmiştir (Zheng ve ark., 2022). Bünemann ve ark. (2006) tarafından yapılan bir incelemede, toprak organik madde mineralizasyonunda priming etkisi olarak adlandırılan hızlanmanın sınırlı kanıtlara dayandığı ve muhtemelen kısa süreli olduğu belirtilmiştir.

Toprak pH'sı, toprak özellikleri üzerinde geniş kapsamlı etkileri olması nedeniyle başlıca değişken olarak kabul edilmektedir. Bitkiler, farklı büyüme stratejilerine sahip olmalarına rağmen, çoğu tarımsal ürün için ideal pH aralığı hafif asidikten hafif alkaliye (pH 6 – 7,5) kadardır. Bu aralıkta, bitkiler optimal gelişim

gösterir. Kimyasal açıdan bakıldığında toprak pH'sı, topraktaki besinlerin ve diğer elementlerin çözünürlüğünü ve türleşmesini etkileyen temel faktördür (Şekil 2).



Şekil 2. Toprak pH düzeyinin besin yarıyışlılığı üzerindeki etkisi

Örneğin, düşük pH koşullarında birçok bitki besin elementi, özellikle Fe, Cu ve Mn, çözünürlüğü artmış halde bulunur ve dolayısıyla bitkiler tarafından daha kolay alınabilir hale gelir. Ancak aynı koşullarda, Al gibi elementler bitkiler için toksik olabilir. Söz konusu elementler, düşük pH değerlerinde (asidik koşullarda) suda çözünür katyonik formda (örneğin; Fe^{+3} , Cu^{+2} , Mn^{+2} , Al^{+3} , $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^{+}$) bulunarak bitkiler tarafından kolayca alınabilir. Ancak toprak pH'sı yükseldikçe (alkalin koşullara doğru) çözünmeyen bileşiklere (örn. $Fe(OH)_{3(s)}$, $MnO_{2(s)}$, $Cu(OH)_{2(s)}$ ve $Al(OH)_{3(s)}$) dönüşürler (Howe ve ark., 2024).

Kolloidlerin büyük bir kısmının negatif yükü olduğundan, katyonları elektrostatik olarak yüzeylerinde tutar ve bu katyonlar değiştirilebilir özellikte olup, toprağın katyonları tutma kapasitesini belirler. Bu kapasite, katyon değişim kapasitesi (KDK) olarak adlandırılır ve toprağın pH değerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. KDK'deki değişikliklerden en çok etkilenen katyonlar arasında K^{+} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , NH_4^{+} ve Na^{+} gösterilir. Bu katyonlardan Na^{+} dışındakiler bitkiler için makro besin niteliğindedir. KDK, değişebilir katyonlar ve baz doygunluğu toprak besin maddelerinin durumu ve tamponlama kapasitesinin önemli göstergeleridir (Ross ve ark., 2008). Düşük değişebilir katyonlar ve baz doygunluğu seviyeleri, bitki büyümesini kısıtlayabilir ve verimi azaltabilir. Bu nedenle, KDK ve baz doygunluğu değerlerinin uygun seviyelerde tutulması, toprak sağlığı ve gıda üretimi açısından büyük önem taşır. Toprakta KDK ve baz doygunluğu gibi parametreler ise toprak yönetimi uygulamalarından (örneğin; gübre uygulaması) önemli ölçüde etkilenir.

Toprak pH'sı düştükçe KDK de azalır; dolayısıyla düşük pH ve KDK değerine sahip topraklar, besin tutma kapasitesi bakımından sınırlıdır ve tarımsal verimliliği sürdürüebilmek için daha fazla gübre uygulaması gerektirir. Bu nedenle, toprak pH'sının tarımsal uygulamalarda optimize edilmesi, besin alımı ve toprak sağlığı açısından büyük önem taşır.

Toprak organik karbonu (TOK), tarımsal toprakların KDK'sini değiştirmede pH ile birlikte önemli bir role sahiptir. Dhiman ve ark. (2019), 44 yıl boyunca süreklilik gösteren yönetim uygulamalarının ardından, 0-15 cm ve 15-30 cm derinliklerde yapılan gözlemlerde gübre uygulanmış toprakların KDK değerlerinin ($\sim 8,5$ ila $\sim 10,2$ cmolc kg⁻¹ ve $\sim 6,3$ ila $\sim 9,4$ cmolc kg⁻¹) gübrenenmemiş topraklara göre daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Bu durum, muhtemelen TOK miktarındaki artışla ilişkilidir; zira eklenen TOK'nin KDK'ye katkısı, gübrenin KDK üzerindeki asitleştirici etkisinden daha fazla olmuştur. Toprak KDK'sine en büyük katkıda bulunan faktörler TOK ve 2:1 tipi silikat kil mineralleridir (örneğin, smektitler ve vermikülitler). Toprak organik karbonu, diğer tüm toprak kolloidlerine kıyasla daha fazla KDK katkısı sağlamaktadır ve 2:1 tipi silikat kil minerallerinin KDK'si, yapılarındaki kalıcı yükün baskınlığı nedeniyle pH değişimlerinden daha az etkilenir (Howe ve ark., 2024).

Azotlu gübrelerin geliştirilmesi ve sanayileşmesinin hızlanmasıyla birlikte, araştırmalar amonyum bazlı gübrelerin toprak pH'sını düşürme eğiliminde olduğunu, nitrat bazlı gübrelerin ise toprak pH'sını koruma veya artırma eğiliminde olduğunu ortaya koymuştur (Khonje ve ark., 1989; Barak ve ark., 1997). Uygulanan gübrenin tipi ve toprağın tamponlama kapasitesi, toprak asitlenmesinin doğası üzerinde belirleyici bir rol oynar (Singh, 2018).

Amonyum bázlı gübreler, bitki alımı sırasında proton salınımına yol açarak toprakta asitlenme yaratır ve rizosfer pH'sını düşürür (Marschner, 1995). Bitkiler tarafından alınmayan amonyum, toprak pH'sını ayrıca nitrifikasyon yoluyla etkileyebilir. Nitrifikasyon, amonyumun nitrate dönüştüğü mikrobiyal bir süreçtir ve bu işlem toprağı daha da asidik hale getirir (Ni ve ark., 2023). Üre gübresi de amonyuma hidrolize olurken asitlenme potansiyeli taşır; ancak hidroliz işleminin ilk aşamasında proton tüketimi gerçekleştiği için, topraktaki asitlenmenin kapsamı bir ölçüde dengelenir. Hidroliz sürecinde üre önce amonyuma dönüşür, bu da sonraki asitlenme reaksiyonlarının etkisini bir ölçüde azaltır. Üre hidrolizi, pH 7-8 aralığında maksimum hızla gerçekleşir (Cabrera ve ark., 1991).

Amonyum bázlı gübreler toprağın asitlenmesine neden olurken, nitrat gübreleri bu etkiye sahip değildir; hatta pH'yı artırabilme potansiyeli taşır (Khonje ve ark., 1989). Amonyum nitrat gibi gübrelerin pH üzerindeki etkisi, diğer amonyum gübrelerine kıyasla daha az belirgindir ve ürenin pH'ya olan etkisine benzerlik gösterir (Khonje ve ark., 1989). Fosfat gübreleri ise, asitle işlenmiş fosfat kaya kaynaklarından üretildikleri için genel olarak asidik bir yapıya sahiptir. Ancak fosfat gübrelerinin toprağı olan asidik etkisi kaynağı ve toprağın özelliklerine göre büyük farklılıklar gösterir ve genellikle geçici olur. Özellikle, monoamonyum fosfat ve diamonyum fosfat gibi gübrelerin en fazla asiditeyi oluşturduğu kabul edilirken, triple süperfosfat, normal süperfosfat ve kaya fosfatı gibi fosfat gübrelerinin asiditeye etkisi minimal veya geçici düzeydedir. Potasyumlu gübreler ise toprağın pH'sını genellikle etkilemez ve nötr bir etki gösterir.

Uzun vadeli gübreleme çalışmaları, özellikle nitrat bázlı olmayan gübrelerin toprak pH'sında zamanla önemli düşüşlere neden olabileceğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Shen ve ark. (2010), 20 yıllık üre gübrelemesinin ardından toprak pH'sının 6,0'dan 4,9'a düştüğünü rapor etmiştir. Benzer şekilde, Dhiman ve ark. (2019) tarafından yürütülen 44 yıllık bir çalışmada, önerilen N, P ve K gübrelerinin uygulanması sonucunda 0-15 cm derinlikte pH'nın 5,7'den 5,2'ye, 15-30 cm derinlikte ise 5,9'dan 5,3'e gerilediği

bulunmuştur. Zhang ve ark. (2016), 22 yıl süren karşılaştırmalı bir gübreleme çalışmasında, gübrenlenmemiş kontrol grubuna kıyasla en yüksek pH düşüşünün üre-N, P, K ve S'nin birlikte uygulanmasıyla meydana geldiğini bildirmiştir. Orta düzeyde pH düşüşü, üre-N, P ve K (S olmadan) ile üre-N ve P (K ve S olmadan) uygulamalarında gözlenirken; en az pH düşüşü yalnızca üre-N uygulamasıyla gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, gübreleme stratejilerinin toprak pH'sı üzerindeki farklı etkilerini vurgulamakta ve özellikle kükürtün (S) eklenmesinin pH düşüşünü hızlandırdığına işaret etmektedir. Raza ve ark. (2020), nitrojen gübrelemesiyle oluşan asitlenme nedeniyle 1980-2020 yılları arasında Çin'deki tarım arazilerinde inorganik karbonun %7 oranında kaybolduğunu rapor etmiştir. İnorganik C, genellikle toprak sağlığı ile ilişkilendirilmemesine rağmen, daha yavaş bir döngüye sahip bu C formunun hızlı kaybı, C döngüsü ve iklim değişikliği üzerinde önemli etkilere sahiptir. Geisseler ve ark. (2017), üre gübresi uygulamasının çeltik tarlası toprağının pH'sında bir değişime yol açmadığını gözlemlemiştir; bu durum, yüksek organik madde içeriği ve sık su basması nedeniyle çeltik tarlalarında nitrifikasyon reaksiyonlarının baskılanmasına bağlanabilir. Genel olarak gübrelerin toprak pH değeri üzerindeki etkisi; gübre tipi, toprağın pH tamponlama kapasitesi, doğal asitlenme süreçleri (örneğin, iklim), ekim yönetimi uygulamaları ve zaman gibi birçok faktörle ilişkilidir. Toprakta bir pH değişimi gözlemlense bile, bu değişimin KDK gibi diğer özellikler üzerindeki etkisi, TOK ilaveleri ve toprak mineralojisi tarafından da şekillendirilmektedir. Toprak pH'sındaki herhangi bir değişim, mikrobiyal topluluğu da etkileme potansiyeline sahiptir (Singh, 2018).

2.2. Kimyasal Gübrenin Toprağın Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Toprak agregasyonu, verimli ve sağlıklı toprakların temel göstergelerinden biri olup, toprak parçacıklarının sekonder yapılar halinde birleşmesini veya kümelenmesini ifade eder. Agregat boyutu ve stabilitesi, yönetim uygulamalarına duyarlılıkları ve su sızma, su tutma kapasitesi ile erozyon eğilimi üzerindeki etkileri nedeniyle, toprak sağlığını değerlendirmede yaygın olarak kullanılan önemli ölçütlerdendir. Tek bir toprak profili içinde TOK, agregasyonun kilit belirleyicilerinden biridir (Li ve ark., 2017). Toprak organik karbonunu etkileyen gübreleme uygulamaları da dolaylı olarak agregatlaşma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toprak organik karbonu ve agregatlaşma özelliklerini birlikte inceleyen çalışmalar, bu ilişkiyi desteklemektedir. Chakraborty ve ark. (2010), mısır ve buğday ekiminde yürüttükleri uzun vadeli gübreleme çalışmasında, önerilen N, P ve K oranlarında yapılan gübrelemenin, gübrenlenmemiş kontrol grubuna kıyasla 0-5 cm ve 5-15 cm toprak derinliklerinde agregatların ortalama ağırlık çapını, makro gözenekliliği ve toprak organik karbonunun seviyesini anlamlı düzeyde artırdığını belirlemişlerdir. Benzer şekilde, Dhiman ve ark. (2019), 44 yıl boyunca N, P ve K ile gübre uygulanan bir buğday sisteminde, gübrenlenmemiş kontrol grubuna kıyasla artan TOK ile iyileşmiş fiziksel özellikler gözlemlemiştir. Hem 0-15 cm hem de 15-30 cm toprak derinliklerinde gübrelemenin, kontrol grubuna kıyasla daha büyük ortalama agregat ağırlık çapı, gözeneklilik, su tutma kapasitesi ve doymuş hidrolik iletkenlik sağladığı belirlenmiştir. Haynes ve Naidu (1998), uzun süreli gübre uygulamalarının toprak organik maddesini (TOM) artırdığını ve bunun sonucunda suda stabil agregatların, gözenekliliğin, infiltrasyon kapasitesinin ve hidrolik iletkenliğin artış gösterdiğini; hacim ağırlığının ise azaldığını bildirmiştir. Buna karşılık, bazı

çalışmalar gübrelemenin toprağın fiziksel özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını veya olumsuz etkiler yaratabileceğini öne sürmektedir. Örneğin, Yu ve ark. (2012), 18 yıl süresince önerilen gübreleme uygulamalarının agregatlaşma üzerindeki etkisini, gübreleme yapılmamış bir kontrol grubuyla karşılaştırmıştır. Gübreleme yapılan uygulamalarda %27 daha yüksek TOK seviyeleri görülmesine rağmen, agregatlaşma oranında anlamlı bir fark tespit edememişlerdir. Diğer çalışmalar ise, N gübrelemesinin toprak agregatlaşması üzerinde olumsuz etkileri olabileceğini bildirmektedir (Green ve ark., 1995; Fonte ve ark., 2009; Chivenge ve ark., 2011). Ancak bu sonuçlar, genellikle gübre miktarının bitki gereksinimlerinin üzerinde olduğu veya bitki büyümesinin olmadığı durumlarda yapılan değerlendirmelerden elde edilmiştir. Bu nedenle, bulgular, önerilen dozların üzerinde yapılan gübrelemenin TOK'yi azaltarak agregatlaşma üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği hipoteziyle uyumludur.

Çoğu çalışma, belirli gübre türlerinin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Ancak, Haynes ve Naidu (1998) tarafından yapılan bir incelemede, fosforlu gübrenin, Al- veya Ca-fosfat bağlayıcı maddelerin oluşumu yoluyla agregatlaşmayı desteklediğine dair kanıtlar sunulmuştur. Öte yandan, NH_4^+ bazlı gübrelerin yüksek konsantrasyonlarda birikmesi, toprakta dağılıma (dispersiyon) neden olabilir. Benzer şekilde, sodyum (Na) içeren gübreler, örneğin NaNO_3 , dispersiyona neden olurken, gübrelerin kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) formları, örneğin $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, birleşmeyi (flokülasyon) ve agregatlaşmayı teşvik edebilir.

2.3. Kimyasal Gübrenin Toprağın Biyolojik Özelliklerine Etkileri

Toprak biyotası; biyokimyasal döngüler, redoks reaksiyonları, hastalık baskılama ve toprak yapısının korunması gibi önemli süreçlerde temel bir rol oynar (Delavaux ve ark., 2017; Fierer, 2017; Bonanomi ve ark., 2018). Toprak biyotasının biyokütlesi oldukça büyüktür; bir hektar toprak, büyük ölçüde mantar ve bakteriler gibi mikrobiyal grupların hakimiyetinde olmak üzere bir metrik tonun üzerinde biyokütle barındırabilir (He ve ark., 2020). Ayrıca, toprak biyotası, Dünya'daki en büyük biyolojik çeşitlilik rezervlerinden birini oluşturur ve tüm türlerin yaklaşık 59 ± 15 'inin topraklarda yaşadığı tahmin edilmektedir (Anthony ve ark., 2023). Moleküler yöntemlerdeki ilerlemeler, bu biyolojik çeşitliliği daha ayrıntılı bir şekilde incelememize olanak tanımakta ve kültürlenemeyen toprak mikroorganizmalarının araştırılmasını kolaylaştırmaktadır (Lekberg ve ark., 2024).

Bu organizmalar, birbirleriyle, bitki kökleriyle ve çevresel faktörlerle sürekli etkileşim içindedir. Bu etkileşimler, topraktaki besin döngüsünü sürdüren karmaşık besin ağlarının oluşmasına zemin hazırlar ve bitki beslenmesi için kritik bir rol oynar. Toprak organizmaları, organik maddelerin parçalanması, besin döngüsünün sağlanması ve bitkilerin bu besinleri alabilmesi için kullanılabilir hale getirilmesi gibi önemli işlevleri yerine getirir. Ayrıca, besinlerin toprak organizmalarının vücutlarında depolanması, besin kayıplarını azaltır ve toprağın yapısını korur.

Kimyasal gübrelerin (özellikle azot, fosfor ve potasyum içerenlerin) toprak pH'sını artırması, mikrobiyal çeşitlilik üzerinde karmaşık etkiler yaratır. Bu etkiler, gübre türü, mikrobiyal topluluğun önceden var olan yapısı ve çevresel koşullar gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir (Rousk ve ark., 2010).

Gübrelerin OH^- iyonları salarak pH'yı yükseltmesi, asidik ortamlarda yaşayan asidofilik mikroorganizmaların popülasyonunu azaltır. Yükselen pH, genel olarak toprak mikrobiyotası üzerinde baskılayıcı bir etkiye sahip olsa da, bazik koşulları tercih eden bazofilik mikroorganizmalar için daha uygun bir ortam oluşturabilir.

Gübreleme, toprak özelliklerini değiştirerek toprak mikroorganizmalarını dolaylı yoldan etkileyebilir (Xun ve ark., 2016). Örneğin, N uygulaması sonrasında toprak pH'sında meydana gelen düşüş, bakteri topluluklarındaki değişikliklerin başlıca nedeni olmuştur (Zeng ve ark., 2016). Ayrıca, Yu ve ark. (2013) gübrelemenin, topraktaki C/N oranlarındaki değişikliklerin mikrobiyal toplulukların dağılımını önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Öte yandan, Ren ve ark. (2020), *Proteobacteria* ve *Gemmatimonadetes*'in gübreleme ve toprak ortamlarından etkilenmediğini; buna karşın, *Acidobacteria* ve *Actinobacteria* bolluğunun gübreleme uygulamalarıyla negatif korelasyon gösterdiğini belirtmişlerdir.

Asidik özellik gösteren kimyasal gübreler, yüksek pH koşullarında gelişen bakterilerin büyümesini engellerken, asidofilik mikrobiyal toplulukların çoğalmasına neden olur (Lin ve ark., 2019). Asidik ortamlarda, mantar toplulukları genellikle daha iyi büyürken, bakteri toplulukları azalır; bu durum, bakteriler tarafından gerçekleştirilen biyokimyasal süreçlerin olumsuz yönde etkilenmesine yol açar. Özellikle nitrifikasyon oranları, nitrifikasyon bakterilerinin daha düşük aktivitesi nedeniyle aşırı asidik topraklarda azalır (Cheng ve ark., 2013). Bakteriyel filumlar arasında, *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Chloroflexi* ve *Proteobacteria* gibi gruplar toprakta yaygın olarak bulunan bakteri filumlarıdır (Zhao ve ark., 2012; Li ve ark., 2016). Asidofilik bakteriler, örneğin *Acidobacterium*, *Acidicaldus* ve *Acidotherrmus* türleri, kimyasal gübrelerin oluşturduğu asidik ortamda çoğalır. Ayrıca, *Acidibacter* türlerinin toprak pH'sı ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Uzun süreli kimyasal gübre kullanımı, toprak pH'sını düşürmenin yanı sıra topraktaki ağır metal iyonlarını aktive eder; bu durum, toprak fizikokimyasal özelliklerini ve ürün kalitesini olumsuz yönde etkiler (Lin ve ark., 2019). Fosforlu gübreler, mikorizal mantarların büyümesini engeller, ancak bu engellenmenin derecesi, mantar türlerine ve topraktaki fosfor seviyelerine bağlı olarak değişir (Seymour, 2002).

Kimyasal gübre uygulamalarının toprak mikroorganizmaları üzerindeki etkileri genellikle geçicidir. Toprakların doğal tamponlama kapasitesi sayesinde, gübre kaynaklı pH değişiklikleri uzun süreli olmayıp, kısa süre sonra normal seviyelere dönme eğilimi gösterir. Yeni Güney Galler'de yapılan bir çalışmada (Angus ve ark., 1999), susuz amonyak ve üre gübrelerinin toplam mikrobiyal aktiviteyi kısa süreli olarak baskıladığı gözlemlenmiştir. Beş hafta içinde mikrobiyal aktivite genel olarak eski haline dönmekle birlikte, bazı mikroorganizma grupları için bu toparlanma daha yavaş veya eksik kalmıştır. Örneğin, nitrifikasyon bakterilerinin popülasyonu beş hafta sonunda belirgin bir artış gösterirken, protozoa popülasyonları yaklaşık %80 oranında azalmış ve bu düşüşün etkileri daha uzun süre devam etmiştir.

Bitkilerin farklı büyüme evrelerinde uygulanan kimyasal gübreler, toprak mikrobiyal topluluklarının yapısını ve aktivitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle çiçeklenme dönemi, diğer büyüme evrelerine göre daha yüksek bir mikrobiyal çeşitlilik sergilemektedir. Yapılan bir çalışmada (Li ve ark., 2012), azot, fosfor ve potasyum içeren farklı gübrelerin toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Sonuçlar, bu gübrelerin invertaz enzimi aktivitesini tüm büyüme evrelerinde artırdığını göstermiştir. Potasyum gübresi, özellikle invertaz ve diğer bazı enzimlerin aktivitesini artırmada daha belirgin bir etki göstermiştir. Çiçeklenme döneminde ise, azot gübresi üreaz enzimi aktivitesini diğer gübrelere kıyasla daha fazla artırmıştır. Bu bulgular, farklı gübrelerin ve büyüme evrelerinin toprak mikrobiyal süreçleri üzerindeki karmaşık etkileşimlerini ortaya koymaktadır.

3. Organik Gübrelerin Toprak Sağlığına Etkileri

Ayrışan veya ayrıştırılan biyolojik ürünlerden elde edilen besin takviyeleri, tarımın sürdürülebilirliği için önemli bir yere sahiptir. İnek gübresi, tavuk gübresi ve benzeri hayvansal kökenli kaynakların yanı sıra, yeşil gübre, kompost gibi bitkisel kaynaklılar da bu kategoride yer alır (Şekil 3).



Şekil 3. Tarımda kullanılan organik gübre çeşitleri (Liu ve ark., 2024)

Organik kökenli materyaller doğrudan kullanılabilir, ancak genellikle kompostlama veya katı-sıvı ayırma gibi işleme yöntemlerinden geçirilir. Bu ürünlerin özellikleri, kaynağa bağlı olarak önemli ölçüde değişir (Tablo 2).

Örneğin, tavuk gübrelerinde azot (N) konsantrasyonu, domuz ve sığır gübrelerine kıyasla çok daha yüksektir. Diğer yandan, sıvı gübrelerin amonyum (NH_4^+) konsantrasyonu katı gübrelerden daha yüksek olup, organik azot (N) oranı daha düşüktür (Whalen ve ark., 2019). Ayrıca, işleme ve depolama yöntemleri ile kullanılan hayvan yataklık materyalleri, gübredeki besin maddelerinin türünü ve miktarını önemli ölçüde etkiler (Lazcano ve ark., 2016). Örneğin, aerobik kompostlama ve vermikompostlama gibi işlemlerle işlenen gübrelerde, katı gübrelerle karşılaştırıldığında daha yüksek organik N ve nitrat (NO_3^-) seviyeleri bulunurken; anaerobik işleme ile elde edilen gübrelerde ise daha yüksek azot konsantrasyonları ve baskın amonyum (NH_4^+)-N havuzları gözlemlenmektedir (Singh ve ark., 2020).

Tablo 2. Hayvansal kaynaklı bazı organik gübrelerin azot (N), fosfor (P₂O₅) ve potasyum (K₂O) içerikleri (Maynard ve Hochmuth, 2007)

Hayvansal gübreler	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Besi sığırı gübresi	1,0-2,5	0,9-1,6	2,4-3,6
Süt sığırı gübresi	0,6-2,1	0,7-1,1	2,4-3,6
At gübresi	1,7-3,0	0,7-1,2	1,2-2,4
Domuz gübresi	3,0-4,0	0,4-0,6	0,5-1,0
Tavuk gübresi	2,0-4,5	4,5-5,5	1,2-2,4
Koyun gübresi	3,0-4,0	1,2-1,6	3,0-4,0

*Hayvansal gübrelerin NPK içerikleri kuru ağırlık esasına göre değerlendirilmiştir.

Organik gübre uygulamaları, toprağın organik madde içeriğini, toprak yapısını, agregat stabilitesini, besin maddesi alımını, su tutma kapasitesini, kation değişim kapasitesini, besin maddesi kullanım etkinliğini ve mikrobiyal aktiviteleri artırarak, toprak sağlığını iyileştirir (Brar ve ark., 2015; Maltas ve ark., 2018; Liu ve ark., 2024). Organik gübrelerden besin salınım hızı kimyasal gübrelerle kıyasla yavaş olsa da (Guo ve ark., 2017), mahsulün büyümesini ve kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Bazı bitkilerin büyümesi, verimi ve kalitesi üzerine organik gübrelerin etkileri (Liu ve ark., 2024)

Bitki	Organik gübre	Organik gübre dozu	Etkiler
Çeltik	Tavuk gübresi	2.5 ton ha ⁻¹	Bitki boyunu, kardeşlenmeyi, tane ve saman verimini, tane ağırlığını, tane NPK konsantrasyonunu iyileştirmiştir.
Domates	Agro balık peleti	Parsel başına 18 kg	Yaprak alanını, kök taze ağırlığını, çiçek sayısını, meyve verimini arttırmıştır.
Bamya	Tavuk gübresi	4.1 ton ha ⁻¹	Bitki boyunu, bitki sayısını, yaprak alanını, verimi, proteini, karbonhidratları, NPK konsantrasyonunu arttırmıştır.
Zerdeçal	Vermikompost	11.36 ton ha ⁻¹	Bitki boyunu, yaprak sayısını, kardeşlenmeyi, taze-kuru rizom verimini, alınabilir NPK içeriklerini arttırmıştır.
Turp	Tavuk gübresi	15 ton ha ⁻¹	Bitki boyunu, yaprak sayısını, sürgün ve kök uzunluğunu, kök çapını, kök ve sürgünün taze ve kuru ağırlığını, biyolojik verimini iyileştirmiştir.
Çeltik	Büyükbaş hayvan gübresi	5 ton ha ⁻¹	Bitki boyunu, yaprak/bitki, salkım uzunluğunu, bin tane ağırlığını, verimini,protein yüzdesini iyileştirmiştir.
Hünnap	Ayrılmış soya fasulyesi küspesi	Saksı başına 5 kg	Klorofil içeriğini, fotosentez oranını,generatif büyümesini, besin kalitesini önemli ölçüde arttırmıştır.
Asma (Üzüm)	Sığır gübresi	10 ton ha ⁻¹	Kök kuru maddesini, meyve ağırlığını, bitki başına meyve sayısını, meyve verimini iyileştirmiştir.
Mısır	Tavuk gübresi	10 ton ha ⁻¹	Yaprak alanını, yaprak alanı indeksini, bitki boyunu, 1000 tane ağırlığı, tane verimini, biyolojik verimini, tane protein ve yağ içeriğini iyileştirmiştir

Organik gübrelerin bir takım dezavantajları da bulunmaktadır, çünkü bitkiler ve hayvanlar için zararlı olabilecek patojenler içerebilirler (Bhatt ve ark., 2019). Organik gübreler, genellikle düşük besin içeriğine sahiptir; bu nedenle, kimyasal gübreler olmadan tarımda büyük ölçekli kullanımları oldukça zordur (Vanlauwe ve ark., 2010). Ayrıca, organik gübrelerin bileşimi oldukça değişkendir, bu da besin maddelerinin bitki üretimine doğru bir şekilde uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Bhatt ve ark., 2019). Diğer

bir dezavantaj ise organik gübrelerin fazla miktarlarda ihtiyaç duyulması ve bununla birlikte kolayca temin edilememesidir (Roba, 2018). Organik gübrelerin ayrışma hızı çok yavaştır ve bu süreç, toprak sıcaklığı ve nemi gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilenir; bu da besin maddelerinin gübrelerden salınımını zorlaştırır (Bhatt ve ark., 2019). Ayrıca, organik gübreler ağır metaller ve fekal koliformlar da içerebilir. Su kütlelerine karıştıklarında, suyun kalitesini ciddi şekilde bozarak sağlık için tehlike oluşturabilirler (Jenkins ve ark., 2008). Özellikle yüksek miktarda kanalizasyon çamuru ve süt sığırcı gübresinin ardışık kullanımı, yeraltı ve yüzey sularının kirlilik riskini arttırabilir (Lazcano ve ark., 2021). Organik gübreler, ayrıca yeraltı suyu üzerinde NO_3^- seviyelerinin artmasına ve yüzey sularının ötrofikasyonuna yol açabilir (Bhatt ve ark., 2019).

Gübre atılım sonrası yönetimi, temel fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen önemli bir süreçtir. En yaygın yönetim uygulamaları arasında, atık yem, su (örneğin; atık su, yıkama suyu ve yağmur suyu), yataklıktan ve topraktan gelen eklemeler ile buharlaşmadan kaynaklanan kayıplar yer almaktadır. Biyolojik aktivite, gübre atılımının hemen ardından başlamaktadır ve bu aktivite, gübre özelliklerini, özellikle de besin içeriğini etkiler. Gübre özelliklerini etkileyen diğer faktörler arasında yem türü, yataklık malzemesi, toprak tipi ve gübre yönetimi/depolaması (örneğin; idrar-dışkı ayrımı, atık arıtma lagünleri, temizleme sıklığı, kompostlama ve katı-sıvı ayrımı) bulunmaktadır.

3.1. Organik Gübrelerin Toprağın Kimyasal Özelliklerine Etkileri

3.1.1. Toprak karbon içeriği

Topraklar, küresel ölçekte atmosfer ve karasal bitki örtüsünden üç kat daha fazla karbon (C) depolar (Lehmann ve Kleber, 2015). Ekilebilir topraklar, toprak profilinin ilk 1 metre içinde küresel toprak C stoklarının yaklaşık %10'unu barındırmaktadır (Jobbagy ve Jackson, 2000). Toprak organik karbonu (TOK), ürün verimliliğini artırma, toprak sağlığını koruma, toprak yapısını iyileştirme, iklim değişikliğini hafifletme ve diğer ekosistem hizmetlerini destekleme gibi kritik işlevlere sahiptir (Zhang ve ark., 2012). Ekilebilir alanlarda TOK seviyelerini yükseltmek amacıyla geliştirilen stratejiler, ürün kalıntıları, kompost ve organik gübre gibi karbonca zengin materyallerin toprağa ilavesi yoluyla topraktaki organik C girdilerini artırmayı ve aynı zamanda bu organik maddelerin mikrobiyal ayrışma süreçlerini kontrol ederek toprakta daha uzun süre kalmalarını sağlamayı hedeflemektedir (Cooper ve ark., 2011). Toprağa yüksek C içeriğine sahip organik gübrelerin uygulanmasının, toprak organik maddesini ve dolayısıyla TOK düzeyini koruması veya artırması beklenmektedir (Li ve ark., 2020). Ayrıca, organik kökenli gübre uygulamalarına bağlı olarak TOK'deki artış, genellikle yalnızca sentetik gübrelemeden kaynaklanan artıştan daha büyük bir etki göstermektedir. Dünya genelinde 49 farklı sahada gerçekleştirilen uzun vadeli gübreleme çalışmasının meta analizi sonuçlarına göre, hayvan gübresi uygulaması, TOK seviyelerini, kontrol grubuna kıyasla ortalama $9,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ve kimyasal gübre uygulamalarına kıyasla ise $5,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ daha fazla artırmıştır (Maillard ve Angers, 2014). TOK'deki artış, organik gübreinin doğrudan C girdisine atfedilmiştir. Çalışmada incelenen toprak, iklim, süre, hayvan türleri, arazi kullanımı gibi geniş bir yelpazedeki farklılıklara rağmen, kontrol grubu ile kümülatif gübre-C girdisi olan gübre uygulamaları arasındaki TOK farkı arasında pozitif

bir korelasyon ($r^2 = 0,53$) gözlemlenmiştir (Maillard ve Angers, 2014). Du ve ark. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, organik gübre uygulamalarının TOK, TOM ve partikül organik karbon seviyelerinde anlamlı artışlara neden olduğu bulunmuştur. Özellikle, %50 ve %100 oranında organik gübre uygulamasının, TOK depolamasını kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %5,91 ve %7,84 oranında artırdığı belirtilmiştir. Bu bulgular, organik gübrelerin toprak karbon deposunu güçlendirme potansiyelini vurgulamaktadır. Gübre uygulama araştırmalarının başka bir incelemesinde, Rayne ve Aula (2020), gübre türü ve yataklama yönteminin toprak TOM artışını etkilediğini bildirmiştir. Bu çalışmadaki sonuçlar, farklı hayvansal gübre türlerinin aynı miktarda uygulandığı araştırmalara dayanmaktadır. Ancak, bu tür bir karşılaştırma yanıltıcı olabilir, çünkü hayvansal kökenli gübrelerin C içeriği ve su içeriği gibi farklı özellikleri, C depolama potansiyellerini doğrudan etkiler. Gübrelerin C depolama havuzlarına katkılarını doğru bir şekilde değerlendirmek için, benzer C girdileri üzerinden karşılaştırma yapmak daha uygun olacaktır.

Rayne ve Aula (2020), organik gübrenin toprak sağlığı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, gübre eklemenin TOM tükenmesini yavaşlattığı sonucuna ulaşmışlardır; ancak, bu etki için net bir mekanizma belirtilmemiştir. Çünkü yönetim uygulamaları TOM'un bozunma sürecini doğrudan etkileyebilmektedir. Butler ve ark. (2010) ise hayvan gübresi kompostunu çeşitli oranlarda mısır silajı üretim sisteminde kontrol grubu ve inorganik gübre uygulamalarıyla karşılaştırmışlardır. İlk yılda, kontrolde TOM değeri 12 g kg^{-1} iken, en yüksek kompost oranında ($105 \text{ Mg kompost ha}^{-1}$) bu değer $29,3 \text{ g kg}^{-1}$ düzeyine kadar yükselmiştir. Ancak, ikinci yılda uygulamalar arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Araştırmacılar, mısır-silaj sisteminde kullanılan geleneksel toprak işleme uygulamalarının, eklenen TOM'un hızla azalmasına neden olduğunu ve daha az toprak işleme yapılan sistemlerde daha kalıcı etkiler gözlemlediklerini ifade etmişlerdir (Butler ve ark., 2010). Watts ve ark. (2010) ise, geleneksel toprak işleme (CT) koşullarında soya fasulyesi yetiştirilirken kümes hayvanı gübresi uygulandığında, kontrol grubuna kıyasla TOK üzerinde bir fark gözlemlememişlerdir. Ancak, toprak işleme yapılmayan (NT) ve hem CT hem de NT sisteminde mısır yetiştirilirken belirgin TOK farklılıkları ortaya çıkmıştır. Bu bulgular, yönetim uygulamalarının özellikle kısa vadede gübrenin toprak üzerindeki etkilerini belirgin bir şekilde değiştirebileceğini göstermektedir.

Hayvansal gübreler, bitki ihtiyaçlarını daha etkin bir şekilde karşılamak amacıyla kimi zaman kimyasal gübrelerle birlikte uygulanmaktadır. Bu yaklaşım, her iki gübre türünün ayrı ayrı uygulanmasından daha etkili olabilmektedir (Lin ve ark., 2020). Ayrıca, eş zamanlı uygulamanın TOK'yi artırdığına dair güçlü kanıtlar bulunmaktadır (Abdalla ve ark., 2022; Tian ve ark., 2022). 66 yıldan uzun süreli bir saha deneyinde Abdalla ve ark. (2022), organik gübre ile kimyasal gübrenin birlikte uygulanmasının TOK seviyesini artırdığını ve inkübasyon çalışmalarında, mikrobiyal aktivitenin azalması yoluyla mineralizasyonun C girdileriyle dengelendiğini bulmuşlardır. Tian ve ark. (2022) ise eş zamanlı uygulamanın TOK artışına katkısının, organik madde ilavesiyle oluşan daha büyük toprak agregatlarından kaynaklandığını; bu agregatların TOK'yi kayba karşı koruyarak hem inorganik hem de organik toprak C havuzlarına net fayda sağladığını öne sürmüştür. Bu bulgular, hayvansal kökenli gübre uygulamalarının kimyasal gübre kullanımını azaltma, organik madde girdilerini artırma, toprak sağlığını iyileştirme ve çevre

üzerindeki olumsuz etkileri azaltırken ürün verimini artırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

3.1.2. Toprağın pH değeri

Birçok çalışma, hayvansal kökenli organik gübre ilavesinin toprak pH'sını artırdığını, bu etkinin özellikle başlangıç pH değerinin asidik olduğu durumlarda daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır (Dhiman ve ark., 2019; Butler ve ark., 2010; Watts ve ark., 2010). Çoğu hayvan gübresi nötr ile alkalın arasında bir pH değerine sahiptir. Örneğin, hayvan gübresi arasında domuz gübresinin pH değeri 6,6, sığır gübresinin 7,9 ve tavuk gübresinin 7,7 olarak rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2017). Ayrıca, gübrelerin araziye uygulanmadan önce genellikle kompostlama işlemine tabi tutulduğu bilinmektedir ve bu işlem pH değerinde önemli değişikliklere yol açabilir. Kompostlama sırasında, domuz gübresinin pH değeri genellikle 30 gün sonra yaklaşık 7,8'e yükselirken, sığır gübresinin pH değeri 50 gün sonra yaklaşık 7,5'e düşmekte, tavuk gübresinin ise 30 gün sonra yaklaşık 8,7'ye yükseldiği gözlemlenmiştir (Huang ve ark., 2017). Bu durum, gübre veya kompost ilavelerinin en azından başlangıç aşamasında alkalın koşulları destekleyebileceğini göstermektedir. Organik maddeler güçlü bir pH tamponlama kapasitesine sahiptir; dolayısıyla, gübre ilaveleri özellikle asidik ve düşük tamponlama kapasitesine sahip topraklarda (örneğin, kumlu topraklar) toprak pH'sında daha belirgin bir etki yaratabilir. Bu bağlamda, gübre tipi ve miktarının yanı sıra toprağa karışma derecesi ve başlangıçtaki toprak özellikleri, gübre uygulamalarının toprak pH'sı üzerindeki etkilerini belirlemede kritik öneme sahiptir.

3.1.3. Toprağın kation değişim kapasitesi

Toprağın KDK'si, esas olarak negatif yüklü organik madde ve silikat kationlarının kationları çekme yeteneğinden kaynaklanır. Organik maddenin yüksek KDK değeri nedeniyle, organik gübre uygulamaları genellikle toprak KDK'sini artırır ve bu etki literatürde sıkça vurgulanmaktadır. Miller ve ark. (2016), 15 yıllık bir çalışmada besi yeri gübre uygulama oranlarının toprak KDK'si üzerindeki etkisini ayrıntılı olarak incelemiş ve gübre uygulama oranları ile KDK arasında güçlü bir pozitif korelasyon ($R^2 = 0,98$) bulmuştur. Dhiman ve ark. (2019) ise 44 yıllık bir süreçte organik ve mineral gübre uygulamalarının ardından 30 cm derinliğe kadar KDK'de artış tespit etmişlerdir. Whalen ve ark. (2000) tarafından yürütülen 8 haftalık bir inkübasyon çalışmasında toprak KDK'sinde genel bir değişim gözlemlenmemiş olmakla birlikte, artan organik gübre oranlarının KDK'yi tutarlı bir şekilde yükselttiği rapor edilmiştir.

3.1.4. Toprakta besin elementi kapsamı

Organik gübreler, bitkilerin büyümesi için gerekli olan N, P ve K başta olmak üzere, diğer makro ve mikro besin elementlerini içeren doğal bir gübre kaynağıdır. Bu besin maddeleri, hem inorganik hem de organik formlarda mevcuttur. Zamanla, organik besinler bitkiler tarafından kolayca alınabilen inorganik besinlere mineralize olur. Besinlerin mineralizasyonu mikrobiyal bir süreçtir ve bu nedenle sıcaklık, toprak nemi ve toprak ve gübre özellikleri gibi çevresel koşullara bağlıdır. Mineralizasyon hızı, toprak neminin tarla

kapasitesine yakın olduğu sıcak toprak koşullarında en yüksek seviyeye ulaşır. Gübreden N salınımını ürün talepleriyle eşleştirmek için büyüme derecesi günleri bir tahmin aracı olarak kullanılmıştır (Griffin ve Honeycutt, 2000). Mineralizasyon sürecinin tamamlanması dört yıldan fazla sürebilir; ancak, besinlerin çoğu bu sürecin ilk birkaç yılı içinde salınmaktadır (Eghball ve ark., 2002).

Mineralizasyon, besin maddesine, kaynağına ve uygulama yöntemine (örneğin, kompostlama) bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kompostlanmış gübrede organik azotun mineralizasyon oranı, yaklaşık %18 gibi düşük bir seviyede iken, domuz ve kümes hayvanı gübresinde bu oran yaklaşık %55 seviyesinde beklenmektedir (Eghball ve ark., 2002). Kompostlama işlemi sırasında, kolayca mineralize olabilen karbon (C) ve N bileşikleri kaybolduğundan, ilk birkaç yıl boyunca mevcut mineralize olabilen besin maddelerinin miktarı azalır (Eghball ve ark., 2002). Uygulanan gübrelerden elde edilen P ve K elverişliliği oldukça yüksektir; gübredeki P besininin %70'inden fazlası ve gübredeki K besininin neredeyse %100'ü, ya zaten inorganik formlarda mevcuttur ya da uygulamadan sonra hızla mineralize olmuştur (Eghball ve ark., 2002). Gübreden ayrıca bitkiler tarafından kullanılabilen veya hızla mineralize olabilen formlarda kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), çinko (Zn), demir (Fe), manganez (Mn), bakır (Cu), kükürt (S) ve bor (B) gibi elementler de bulunur. Bazı ülkeler, gübrelerdeki eser element konsantrasyonlarının tehlikeli atık olarak nitelendirilebilecek kadar yüksek olduğu durumları bildirmiştir (Sager, 2007). Ayrıca, gübrelerin tekrar tekrar uygulanmasının, sodyum adsorpsiyon oranını (SAR) ve değişebilir sodyum yüzdesini (ESP) artırabileceği ve bu durumun toprakta zamanla daha fazla sodyum (Na) birikmesine yol açabileceği öne sürülmüştür (Hao ve Chang, 2002). Gübredeki besin içeriği, hayvanın türüne, beslenmesine, yatak malzemesine, nem içeriğine ve depolama/işleme koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir.

Bitkisel üretimde toprağa besin sağlamak amacıyla hayvansal gübre ilavesinin, ürün veriminde önemli bir artış sağladığı bildirilmiştir (Dhiman ve ark., 2019). Ancak, gübrelerin bitki besinlerini etkin bir şekilde sağlamak için kullanımı, dikkate alınması gereken bazı hususları beraberinde getirmektedir. Gübredeki N, P ve K oranları genellikle bitki ihtiyaçlarıyla tam olarak örtüşmemektedir (Rayne ve Aula, 2020). N ihtiyaçlarına dayalı düzenli gübre uygulamaları, P ve K besin maddelerinin toprakta sürekli birikmesine neden olabilir (Sharpley ve ark., 1993; Ferguson ve ark., 2005). Fosforlu gübre uygulamaları, özellikle yüzey akışı ile P kaybı riskinin yüksek olduğu alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Eghball ve ark., 2002). Meek ve ark. (1982), 4 yıl boyunca yüksek oranlarda gübre uygulayarak, sulanan bir çöl bölgesinde 9 yıl boyunca toprağı izlediklerinde, artan yarayışlı P ve K ile birlikte önemli N kayıpları gözlemlemişlerdir. Genel olarak, gübre yoluyla uygulanan N besininin yalnızca %42'sinin kayıpları açıklayabildiği bildirilmiştir. Diğer çalışmalar ise, organik gübre uygulamalarının, kimyasal gübre uygulamalarıyla karşılaştırıldığında bile toprakta N seviyelerini artırdığını göstermiştir (Schlegel ve ark., 2015; Ozlu ve ark., 2019).

Edmeades (2003) tarafından yapılan bir incelemede, uzun vadeli (20-120 yıl) gübreleme uygulamalarının 14 farklı saha denemesi üzerinden ürün verimi ve toprak özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, uzun süreli gübrelemenin aşırı besin birikimine, özellikle de P ve N birikimine neden olduğu ve bu durumun gübre uygulaması yapılmayan topraklarda gözlemlenmediği tespit edilmiştir. Ayrıca, toprakta

bu besin birikiminin, yağış veya sulama suları ile birlikte yer altı ve yüzey sularına karışarak su kalitesini olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir. Ferguson ve ark. (2005) da uzun vadeli gübre uygulamalarında özellikle kabul edilemez düzeyde P birikimi riskine dikkat çekerek benzer endişelerini dile getirmişlerdir. Son yıllarda, organik azotun bitki beslenmesini desteklemedeki rolü giderek daha fazla ilgi görmektedir. Amino asitler ve diğer düşük moleküler ağırlıklı N kaynakları, bitkilerin rizosferinde bolca bulunmakta ve topraktaki organik N seviyesi yüksek olduğunda bitkiler için bir N kaynağı olma potansiyeli taşımaktadır (Moe, 2013). Ancak, organik ve inorganik N alımının bitkilerin genel beslenmesi üzerindeki göreceli önemi henüz tam olarak netlik kazanmamıştır. Yine de, çoğu tarımsal alanda bitki besin gereksinimlerinin büyük oranda inorganik kaynaklarla karşılandığı düşünülmektedir.

3.2. Organik Gübrelerin Toprağın Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi

Organik gübre ilavelerinin toprak fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi genellikle olumlu olarak değerlendirilmektedir (Haynes ve Naidu, 1998; Rayne ve Aula, 2020). Organik gübre uygulamalarıyla toprağın su tutma kapasitesinde, gözenekliliğinde, infiltrasyon oranında, hidrolik iletkenliğinde ve suya dayanıklı agregatların oluşumunda artış sağlanırken, hacim ağırlığı ve yüzey kabuk oluşumunda azalma görüldüğüne dair pek çok çalışma bulunmaktadır (Haynes ve Naidu, 1998; Edmeades, 2003). Guo ve ark. (2016), organik gübrelerin toprak derinliklerinde (0–10 cm ve 10–20 cm arasında), kompoze gübrelerle (NPK) karşılaştırıldığında toprak hacim ağırlığını azalttığını saptamışlardır. Öte yandan, Yu ve ark. (2020), organik gübre uygulaması altında toprakta toplam gözeneklilik ile makro-gözenekliliğin, kontrole ve kompoze gübreyle kıyasla %33–47 oranında daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Benzer şekilde, mezo-gözeneklilikte organik gübre uygulaması altında daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, bu araştırmacılar, gübre uygulaması sonrası toprağın hacim ağırlığındaki artışın, toprak mikro yapılarındaki değişikliklerle bağlantılı olduğunu ortaya koymuşlardır. Yedi yıllık bir organik gübre denemesi, organik gübrenin tek başına veya kimyasal gübre ile uygulanmasının Mollisol tipi topraklarda agregat stabilitesini artırdığını göstermiştir (Zhou ve ark., 2023). Bhanwaria ve ark. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, solucan gübresi (5 t ha^{-1}) uygulamasının toprağın su tutma kapasitesiyle birlikte bitkiye yararışlı su miktarını da önemli ölçüde artırdığını, ancak toprağın hacim ağırlığını düşürdüğü bildirmiştir. Başka bir çalışmada, on yıl boyunca toprağa sığır gübresi uygulanması, domuz gübresi uygulamasına kıyasla -1,5 MPa’da daha yüksek bir su içeriği sağlarken, kontrol grubu ve kimyasal gübre uygulamalarına göre daha düşük bir toprak hacim ağırlığına yol açmıştır (Schlegel ve ark., 2015). Uzun süreli organik gübre uygulamaları ise erozyona uğramış arazilerde mısır verimini artırmakla kalmayıp, doymuş hidrolik iletkenliği iki katına çıkararak toprak hacim ağırlığını azaltmıştır (Arriaga ve Lowery, 2003). Darwish ve ark. (1995) tarafından Virginia’daki üç farklı toprak tipi üzerinde yürütülen 15 yıllık çalışma, hayvansal kökenli organik gübrenin toprakta su tutma kapasitesi, agregat stabilitesi ve ortalama ağırlıklı çap gibi fiziksel özelliklerde belirgin iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur. Çalışma, uygulanan organik gübrenin %95’inin ayrıştığını ve bunun toprakta küçük ama önemli değişikliklere yol açtığını bildirmektedir. Toprak üzerindeki organik

gübre etkisinin, gübrenin özellikleri, uygulama oranları ve ayrışma sürecini etkileyen iklim faktörlerine bağlı olarak değişiklik gösterebileceği belirtilmektedir.

3.3. Organik Gübrenin Toprağın Biyolojik Özelliklerine Etkileri

Toprak mikroorganizmaları, organik maddelerin ayrıştırılması ve besin maddelerinin salınımı süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Organik gübre uygulamalarının, toprak enzimatik aktivitelerini artırdığı ve TOK kapsamında belirgin bir artışa yol açtığı bildirilmiştir (Liu ve ark., 2024). Örneğin, vermikompost uygulamasının sukraz, alkalen fosfataz ve katalaz aktivitelerini farklı derecelerde artırdığı; fakat üreaz aktivitesinin vermikompost uygulamasıyla azaldığı bildirilmiştir (Shang ve ark., 2020). Organik gübreler, toprak bakteriyel yapısını değiştirir ve *Bacilli* ile *Flavobacteriales* gibi faydalı bakteri gruplarının bolluğunu artırır. Ayrıca, organik gübreler, aromatik hidrokarbonların bozunumu ve kitinoliz gibi karbonla ilgili fonksiyonel gruplardaki süreçleri de teşvik eder (Liu ve ark., 2023). Dahası, organik gübrelerin kullanımı, dehidrogenazlar ve β -glukozidaz gibi enzim aktivitelerini artırarak mikrobiyal faaliyetleri iyileştirir (Igalavithana ve ark., 2017; Ikoyi ve ark., 2020). Cui ve ark. (2018), uzun süreli organik gübre kullanımının *Proteobacteria* ve *Chloroflexi* bolluğunu artırdığını ve ayrıca organik materyallerin ve kimyasal gübrelerle birlikte kullanımının *Firmicutes*, *Actinobacteria* ve *Planctomycetes* bolluğunda artışa yol açtığını tespit etmişlerdir. Ikoyi ve ark. (2020), besin döngüsü ve bitki büyümesiyle ilişkili bakteri cinslerinin, özellikle *Burkholderia*, *Allorhizobium*, *Terrimonas*, *Chryseolinea*, *Terrimonas* ve *Ohtaekwangia*'nın, organik gübre uygulanan otlaklarda mineral gübrelerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, organik gübrelerin toprak özelliklerinde yarattığı değişikliklerin, mikrobiyal topluluklar için daha uygun bir ortam sağladığı vurgulanmıştır (Bei ve ark., 2018). 2017 yılında yapılan bir meta-analiz, çeltik tarlalarına hayvansal kökenli organik gübre ilavelerinin, mineral gübrelerle kıyasla mikrobiyal biyokütle karbonunu yaklaşık iki katına çıkardığını bildirmiştir. Bununla birlikte, mineral gübre uygulaması ise, gübreleme yapılmamış (kontrol) tarlalara kıyasla mikrobiyal biyokütle karbonunda %29 oranında artış sağlamıştır (Geisseler ve ark., 2017). Pek çok sayıdaki araştırmalar, uzun vadeli organik gübre yönetiminin mikrobiyal biyokütle karbonunu artırdığını ortaya koymuştur (Liang ve ark., 2012; Liu ve ark., 2013; Dhiman ve ark., 2019). Rayne ve Aula (2020), organik gübre uygulanan topraklarda, gübre uygulanmayan kontrol topraklarına kıyasla daha yüksek mikrobiyal popülasyon gösteren çalışmaların sonuçlarını değerlendirmiştir. Özellikle bakterilerin, organik gübre uygulanan topraklarda mantarlara göre daha iyi geliştiğini, bunun da bakterilere daha uygun olan yüksek pH düzeyinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Öte yandan, bazı araştırmalar, hem inorganik hem de organik gübre uygulamalarının bakteri ve mantar bolluğu üzerinde anlamlı bir fark yaratmadığını belirtmiştir (Ai ve ark., 2012). Organik gübrelerin toprak mikrobiyal toplulukları üzerindeki etkisi yaygın olarak kabul görmekte olup, gübre uygulama yöntemleri ve zamanlamasının, bakteri topluluğu yapısı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Zhao ve ark., 2014). Benzer şekilde, ekilen bitki türleri ve çevresel faktörler (toprak nemi ve sıcaklık) de mikrobiyal toplulukların bileşimini şekillendiren önemli etmenler arasında yer almaktadır (Lauber ve ark., 2013; Ofek-

Lalzar ve ark., 2014). Shen ve ark. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, inorganik gübre ve domuz gübresi kompostunun toprak bakterileri üzerindeki etkileri karşılaştırılmış; gübresiz kontrol, organik gübre ve organik gübre + azot (N) gübresi uygulamalarında bakteriyel yoğunluğun benzer olduğu tespit edilmiştir. Ancak, organik gübre içeren uygulamaların tek başına N gübresi uygulamasına göre daha yüksek bakteriyel yoğunluk sağladığı bildirilmiştir. Bu veriler, toprak pH'sı ve TOK kapsamı ile ilişkili olup, N gübrelemesinin pH'yı düşürmesinin mikrobiyal topluluğun yapısında değişikliklere yol açarak topluluğun bakteriden uzaklaşmasına neden olduğunu öne sürmektedir. Geisseler ve ark. (2017), çeltik tarlası topraklarında çiftlik gübresi, kompost ve kimyasal gübre uygulamalarının etkilerini inceleyen bir meta-analiz gerçekleştirmiştir. Çalışma sonuçları, organik gübre, kompost veya kimyasal gübrenin mikrobiyal topluluk kompozisyonunu belirgin şekilde etkilemediğini; ancak bu uygulamaların genel mikrobiyal biyokütleyi artırdığını göstermiştir.

4. Sonuçlar

Toprak sağlığını, sürdürülebilir üretimi ve iklim değişikliği ile mücadeleyi desteklemek amacıyla stabilize edilmiş toprak organik karbon (TOK) üzerindeki besin girdilerinin etkilerini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle kimyasal gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkileri hakkında önemli bilgi eksiklikleri bulunmaktadır. Gübre tavsiyeleri genellikle toprak sağlığı veya iklim dostu yönetim uygulamaları dikkate alınmadan hazırlanmakta, bu durum kimyasal gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirme yeteneğimizi kısıtlamaktadır.

Diğer yandan, organik gübrelerin değişken bileşimi, bu gübrelerin toprak sağlığı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Karbon, toprak sağlığını doğrudan etkileyen kritik bir faktör olduğundan, organik gübrelerin uygulanmasında karbon bazında normalize edilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca, multi-omik teknikler (metagenomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik gibi), toprak sağlığı üzerinde umut verici sonuçlar sunmaktadır. Bu teknikler, mikroorganizma topluluklarının işlevlerini, organik C ayrışma süreçlerini ve toprak bileşenleriyle olan etkileşimlerini karakterize etme potansiyeline sahiptir.

Gelecekte, toprak sağlığı çalışmalarının daha geniş bir yönetim uygulamaları yelpazesinde, çevresel koşullar ve ürün desenleri dikkate alınarak daha ayrıntılı ve büyük veri analizleri ile yürütülmesi, toprak sağlığını artırmaya yönelik anlamlı bulgular elde edilmesine katkıda bulunacaktır. Bu hedeflere ulaşmak, toprak sağlığı araştırmalarında daha sistematik ve kapsamlı bir değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynaklar

- Abdalla K., Sun Y., Zarebanadkouki M., Gaiser T., Seidel S., Pausch J. Long-term continuous farmyard manure application increases soil carbon when combined with mineral fertilizers due to lower priming effects. *Geoderma* 2022; 428: 116216.
- Ai C., Liang G., Sun J., Wang X., Zhou W. Responses of extracellular enzyme activities and microbial community in both the rhizosphere and bulk soil to long-term fertilization practices in a fluvo-aquic soil. *Geoderma* 2012; 2: 330-338.
- Albornoz F. Crop responses to nitrogen fertilization: A review. *Scientia Horticulturae* 2016; 205: 79-83.
- Angus JF., Gupta VVSR., Good AJ., Pitson GD. Wheat yield and protein responses to anhydrous ammonia (Coldfo®) and urea, and their effects on soil. Final report of project CSP169, Grains Research and Development Corporation, Canberra, ACT 1999.
- Anthony MA., Bender SF., van der Heijden MGA. Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2023; 120: e2304663120.
- Arriaga FJ., Lowery B. Soil physical properties and crop productivity of an eroded soil amended with cattle manure. *Soil Science* 2003; 168: 888-899.
- Bansal S., Yin XH., Savoy HJ., Jagadamma S., Lee J., Sykes V. Long-term influence of phosphorus fertilization on organic carbon and nitrogen in soil aggregates under no-till corn–wheat–soybean rotations. *Agronomy Journal* 2020; 112: 2519-2534.
- Barak P., Jobe BO., Krueger AR., Peterson LA., Laird DA. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. *Plant and Soil* 1997; 197: 61-69.
- Bei S., Zhang Y., Li T., Christie P., Li X., Zhang J. Response of the soil microbial community to different fertilizer inputs in a wheat-maize rotation on a calcareous soil. *Agricultural Ecosystems & Environment* 2018; 260: 58-69.
- Bhanwaria R., Singh B., Musarella CM. Effect of organic manure and moisture regimes on soil physiochemical properties, microbial biomass Cmic:Nmic:Pmic turnover and yield of mustard grains in arid climate. *Plants* 2022; 11(6): 722.
- Bhatt MK., Labanya R., Joshi HC. Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility-A review. *Universal Journal of Agricultural Research* 2019; 7: 177–188.
- Bhattacharyya R., Chandra S., Singh RD., Kundu S., Srivastva AK., Gupta HS. Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat-soybean rotation. *Soil and Tillage Research* 2007; 94: 386-396.
- Bonanomi G., Lorito M., Vinale F., Woo SL. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: toward a unified framework for disease suppression. *Annual Review of Phytopathology* 2018; 56: 1-20.

- Brar BS., Singh J., Singh G., Kaur G. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation. *Agronomy (Basel)* 2015; 5(2): 220-238.
- Burke JA., Lewis KL., Ritchie GL., Moore-Kucera J., DeLaune PB., Keeling JW. Temporal variability in soil carbon and nitrogen in cotton production on the Texas High Plains. *Agronomy Journal* 2019; 111: 2218–2225.
- Butler T., Han KJ., Muir JP., Weindorf DC., Lastly L. Dairy manure compost effects on corn silage production and soil properties. *Agronomy Journal* 2010; 100: 1541–1545.
- Bünemann EK., Schwenke GD., Van Zwieten L. Impact of agricultural inputs on soil organisms – a review. *Australian Journal of Soil Research* 2006; 44: 379–406.
- Cabrera M., Kissel DE., Bock BR. Urea hydrolysis in soil: effects of urea concentration and soil pH. *Soil Biology and Biochemistry* 1991; 25: 1121–1124.
- Chakraborty D., Garg RN., Tomar RK., Dwivedi BS., Aggarwal P., Behera UK., Thangasamy A., Singh D. Soil physical quality as influenced by long-term application of fertilizers and manure under maize-wheat system. *Soil Science* 2010; 175: 128–136.
- Cheng F., Peng X., Zhao P., Yuan J., Zhong C., Cheng Y. Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling Mountains. *PLoS One* 2013; 8(6): e67353.
- Cherkasov N., Ibhaddon AO., Fitzpatrick P. A review of the existing and alternative methods for greener nitrogen fixation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2015; 90: 24–33.
- Chivenge P., Vanlauwe B., Gentile R., Six J. Comparison of organic versus mineral resource effects on short-term aggregate carbon and nitrogen dynamics in a sandy soil versus a fine textured soil. *Agricultural Ecosystems and Environment* 2011; 140: 361–371.
- Cooper JM., Burton D., Daniell TJ., Griffiths BS., Zebarth BJ. Carbon mineralization kinetics and soil biological characteristics as influenced by manure addition in soil incubated at a range of temperatures. *European Journal of Soil Biology* 2011; 47: 392–399.
- Cui X., Zhang Y., Gao J., Peng F., Gao P. Long-term combined application of manure and chemical fertilizer sustained higher nutrient status and rhizospheric bacterial diversity in reddish paddy soil of Central South China. *Scientific Reports* 2018; 8: 16554.
- Darwish OH., Persaud N., Martens DC. Effect of long-term application of animal manure on physical properties of three soils. *Plant and Soil* 1995; 176: 289–295.
- Delavaux CS., Smith-Ramesh LM., Kuebbing SE. Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils. *Ecology* 2017; 98: 2111–2119.
- Dhiman D., Sharma R., Sankhayan NK., Wepehya S., Sharma SK., Kumar R. Effect of regular application of fertilizers, manure, and lime on soil health and productivity of wheat in an acid Alfisol. *Journal of Plant Nutrition* 2019; 42: 2507–2521.

- Du S., Ma Z., Chen J., Xue L., Tang C., Shareef TM., Siddique KH. Effects of organic fertilizer proportion on the distribution of soil aggregates and their associated organic carbon in a field mulched with gravel. *Scientific Reports* 2022; 12: 11513.
- Duo F., Hons FM., Wright AL., Boutton TW., Yu X. Soil carbon sequestration in sorghum cropping systems: evidence from stable isotopes and aggregate-size fractionation. *Soil Science* 2014; 179: 68–74.
- Edmeades DC. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 2003; 66: 165–180.
- Eghball B., Wienhold BJ., Gilley JE., Eigenberg RA. Mineralization of manure nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation* 2002; 57: 470–473.
- Ferguson RB., Nienaber JA., Eigenberg RA., Woodbury BL. Long-term effects of sustained beef feedlot manure application on soil nutrients, corn silage yield, and nutrient uptake. *Journal of Environmental Quality* 2005; 34: 1672–1681.
- Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology* 2017; 15: 579–590.
- Fonte SJ., Yeboah E., Ofori P., Quansah GW., Vanlauwe B., Six J. Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal* 2009; 73: 961–966.
- Geisseler D., Lazicki PA., Scow KM. Mineral nitrogen input decreases microbial biomass in soils under grasslands but not annual crops. *Applied Soil Ecology* 2016; 106: 1–10.
- Geisseler D., Linquist BA., Lazicki PA. Effect of fertilization on soil microorganisms in paddy rice systems – meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 2017; 115: 452–460.
- Geisseler D., Scow KM. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – a review. *Soil Biology and Biochemistry* 2014; 54–63.
- Govindasamy P., Muthusamy SK., Bagavathiannan M., Mowrer J., Jagannadham PTK., Maity A., Halli HM., GKS., Vadivel R., TKD., Raj R., Pooniya V., Babu S., Rathore SS., LM., Tiwari G. Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Frontiers in Plant Science* 2023; 14: 1121073.
- Grandy AS., Daly AB., Bowles TM., Gaudin ACM., Jilling A., Leptin A., McDaniel MD., Wade J., Waterhouse H. The nitrogen gap in soil health concepts and fertility measurements. *Soil Biology and Biochemistry* 2022; 175: 108856.
- Green CJ., Blackmer AM., Horton R. Nitrogen effects on conservation of carbon during corn residue decomposition in soil. *Soil Science Society of America Journal* 1995; 59: 453–459.
- Griffin TS., Honeycutt CW. Using growing degree days to predict nitrogen availability from livestock manures. *Soil Science Society of America Journal* 2000; 64: 1876–1882.

- Guo JX., Hu XY., Gao LM., Xie KL., Ling N., Shen QR., Hu SJ., Guo SW. The rice production practices of high yield and high nitrogen use efficiency in Jiangsu, China. *Scientific Reports* 2017; 7: 2101.
- Guo L., Wu G., Li Y., Li C., Liu W., Meng J., Liu H., Yu X., Jiang G. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China. *Soil and Tillage Research* 2016; 156: 140–147.
- Hao X., Chang C. Effect of 25 annual cattle manure application on soluble and exchangeable cations in soil. *Soil Science* 2002; 167: 126–134.
- Hawkesford MJ. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. *Journal of Cereal Science* 2014; 59(3): 276–283.
- Haynes RJ., Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 1998; 51: 123–137.
- He L., Mazza Rodrigues JL., Soudzilovskaia NA., Barceló M., Olsson PA., Song C., Tedersoo L., Yuan F., Yuan F., Lipson DA., Xu X. Global biogeography of fungal and bacterial biomass carbon in topsoil. *Soil Biology and Biochemistry* 2020; 151: 108024.
- Howe JA., McDonald MD., Burke J., Robertson I., Coker H., Gentry TJ., Lewis KL. Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review. *Soil Security* 2024; 16: 100155.
- Huang J., Yu Z., Gao H., Yan X., Chang J., Wang C., Hu J., Zhang L. Chemical structures and characteristics of animal manures and composts during composting and assessment of maturity indices. *PLoS ONE* 2017; 12: e0178110.
- Igalavithana AD., Lee SS., Niazi NK., Lee YH., Kim KH., Park JH., Moon DH., Ok YS. Assessment of soil health in urban agriculture: Soil enzymes and microbial properties. *Sustainability* 2017; 9: 310.
- Ikoyi I., Egeter B., Chaves C., Ahmed M., Fowler A., Schmalenberger A. Responses of soil microbiota and nematodes to application of organic and inorganic fertilizers in grassland columns. *Biology and Fertility of Soils* 2020; 56: 647–662.
- Jenkins MB., Truman CC., Siragusa G., Line E., Bailey JS., Frye J., Sharpe RR. Rainfall and tillage effects on transport of fecal bacteria and sex hormones 17 β -estradiol and testosterone from broiler litter applications to a Georgia Piedmont Ultisol. *Science of the Total Environment* 2008; 403: 154–163.
- Jobbagy EG., Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 2000; 10: 423–436.
- Khonje DJ., Varsa EC., Klubek B. The acidulation effects of nitrogenous fertilizers on selected chemical and microbiological properties of soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 1989; 20: 1377–1395.

- Krasilnikov P., Taboada MA., Amanullah. Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability. *Agriculture* 2022; 12(4): 462.
- Kuzyakov Y., Friedel J.K., Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry* 2000; 32: 1485–1498.
- Lauber CL., Ramirez KS., Aanderud Z., Lennon J., Fierer N. Temporal variability in soil microbial communities across land-use types. *ISME Journal* 2013; 7: 1641–1650.
- Lazcano C., Tsang A., Doane TA., Pettygrove GS., Horwath WR., Burger M. Soil nitrous oxide emissions in forage systems fertilized with liquid dairy manure and inorganic fertilizers. *Agricultural Ecosystems & Environment* 2016; 225: 160–172.
- Lazcano C., Zhu-Barker X., Decock C. Effects of organic fertilizers on the soil microorganisms responsible for N₂O emissions: a review. *Microorganisms* 2021; 9: 983.
- Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 2015; 528: 60–68.
- Lekberg Y., McLeod M., Bullington LS., DuPre ME., De La Roca G., Greenbaum S., Rousk J., Ramsey PW. Substantial and rapid increase in soil health across crops with conversion from conventional to regenerative practices. *Sustainability* 2024; 16: 5509.
- Lenssen AW., Sainju UM., Jones C., McVay K., Angvick T. Nitrogen fertilization rate and method influences water and nitrogen productivity of forage winter wheat. *Agronomy Journal* 2020; 113: 577–589.
- Li N., You M-Y., Zhang B., Han XZ., Panakoulia SK., Yuan YR., Liu K., Qiao YF., Zou WX., Nikolaidis NP., Banwart SA. Chapter seven – modeling soil aggregation at the early pedogenesis stage from the parent material of a Mollisol under different agricultural practices. In: Banwart, S.A., Sparks, D.L. (Eds.), *Quantifying and Managing Soil Functions in Earth's Critical Zone: Combining Experimentation and Mathematical Modelling*. *Advances in Agronomy Vol. 142*, Academic Press; 2017. pp. 181–241.
- Li T., Zhang Y., Bei S., Li X., Reinsch S., Zhang H., Zhang J. Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates. *Catena* 2020; 194: 104739.
- Li XH., Han XZ., Li HB., Song C., Yan J., Liang Y. Soil chemical and biological properties affected by 21-year application of composted manure with chemical fertilizers in a Chinese Mollisol. *Canadian Journal of Soil Science* 2012; 92: 419–428.
- Li YC., Li Z., Li ZW., Jiang YH., Weng BQ., Lin WX. Variations of rhizosphere bacterial communities in tea (*Camellia sinensis* L.) continuous cropping soil by high-throughput pyrosequencing approach. *Journal of Applied Microbiology* 2016; 121: 787–799.
- Liang Q., Chen H., Gong Y., Fan M., Yang H., Lal R., Kuzyakov Y. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat–maize system in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 2012; 92: 3–21.

- Lin W., Lin M., Zhou H., Wu H., Li Z., Lin W. The effects of chemical and organic fertilizer usage on rhizosphere soil in tea orchards. *PLoS One* 2019; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217018>.
- Lin Y., Watts DB., Torbert HA., Howe JA., Feng Y. Integration of poultry litter and mineral nitrogen on growth and yield of winter canola. *Agronomy Journal* 2020; 112: 2496–2505.
- Liptzin D., Norris CE., Cappellazzi SB., Bean GM., Cope M., Greub KLH., Rieke EL., Tracy PW., Aberle E., Ashworth A., Tavares OB., Bary AI., Baumhardt RL., Gracia AB., Brainard DC., Brennan JR., Reyes DB., Bruhjell D., Carlyle CN., Crawford JJW., Honeycutt CW. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. *Soil Biology and Biochemistry* 2022; 172: 108708.
- Liu E., Yan C., Mei X., Zhang Y., Fan T. Long-term effect of manure and fertilizer on soil organic carbon pools in dryland farming in Northwest China. *PLoS ONE* 2013; 8: e56536.
- Liu Y., Lan X., Hou H., Ji J., Liu X., Lv Z. Multifaceted ability of organic fertilizers to improve crop productivity and abiotic stress tolerance: review and perspectives. *Agronomy* 2024; 14: 1141.
- Liu Z., Song Y., Ge L., Pan X., Zhao Y., Cheng L., Li Y., Liu X. Impact of various organic fertilizers on the growth, yield, and soil environment of peanuts subjected to continuous cropping obstacles. *Polish Journal of Environmental Studies* 2023; 32: 3683–3693.
- Lu M., Zhou X., Luo Y., Yang Y., Fang C., Chen J., Li B. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis. *Agricultural Ecosystems & Environment* 2011; 140: 234–244.
- Maillard E., Angers DA. Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Global Change Biology* 2014; 20: 666–679.
- Maltas A., Kebli H., Oberholzer HR., Weisskopf P., Sinaj S. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degradation & Development* 2018; 29(4): 926–938.
- Marschner H. *Principles of Plant Nutrition*. Academic Press; 1995.
- Maynard DN., Hochmuth GJ. *Knott's Handbook for Vegetable Growers*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA; 2007. 630 p.
- Meek B., Graham L., Donovan T. Long-term effects of manure on soil nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, organic matter, and water infiltration rate. *Soil Science Society of America Journal* 1982; 46: 1014–1019.
- Miller J., Beasley B., Drury C., Larney F., Hao X. Influence of long-term application of composted or stockpiled feedlot manure with straw or wood chips on soil cation exchange capacity. *Compost Science & Utilization* 2016; 24: 54–60.
- Moe LA. Amino acids in the rhizosphere: from plants to microbes. *American Journal of Botany* 2013; 100(9): 1692–1705.

- Ni G., Leung PM., Daebeler A., Guo J., Hu S., Cook P., Nicol GW., Daims H., Greening C. Nitrification in acidic and alkaline environments. *Essays in Biochemistry* 2023; 67(4): 753-768.
- Ofek-Lalzar M., Sela N., Goldman-Voronov M., Green SJ., Hadar Y., Minz D. Niche and host-associated functional signatures of the root surface microbiome. *Nature Communications* 2014; 5: 4950.
- Ozlu E., Sandhu SS., Kumar S., Arriaga FJ. Soil health indicators impacted by long-term cattle manure and inorganic fertilizer application in a corn-soybean rotation of South Dakota. *Scientific Reports* 2019; 9: 11776.
- Poffenbarger HJ., Barker DW., Helmers MJ., Miguez FE., Olk DC., Sawyer JE., Six J., Castellano MJ. Maximum soil organic carbon storage in Midwest US cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. *PLoS ONE* 2017; 12: e0172293.
- Rayne N., Aula L. Livestock manure and the impacts on soil health: a review. *Soil Systems* 2020; 4: 64.
- Raza S., Miao N., Wang P., Ju X., Chen Z., Zhou J., Kuzyakov Y. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands. *Global Change Biology* 2020; 27: e7–e10.
- Ren N., Wang Y., Ye YL., Zhao YA., Huang YF., Fu W., Chu Xv. Effects of continuous nitrogen fertilizer application on the diversity and composition of rhizosphere soil bacteria. *Frontiers in Microbiology* 2020; 11: 1948.
- Roba T. Review on: The effect of mixing organic and inorganic fertilizer on productivity and soil fertility. *Open Access Library Journal* 2018; 5: 1-11.
- Ronner E., Franke AC., Vanlauwe B., Dianda M., Edeh E., Ukem B., Bala A., Van Heerwaarden J., Giller KE. Understanding variability in soybean yield and response to P-fertilizer and rhizobium inoculants on farmers' fields in northern Nigeria. *Field Crops Research* 2016; 186: 133–145.
- Ross D., Matschonat G., Skjellberg U. Cation exchange in forest soils: the need for a new perspective. *European Journal of Soil Science* 2008; 59: 1141–1159.
- Rousk J., Brookes PC., Bååth E. The microbial PLFA composition as affected by pH in an arable soil. *Soil Biology and Biochemistry* 2010; 42: 516–520.
- Sager M. Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. *Soil Biology and Biochemistry* 2007; 39: 1383–1390.
- Schlegel AJ., Assefa Y., Bond HD., Wetter SM., Stone LR. Soil physiochemical properties after 10 years of animal waste application. *Soil Science Society of America Journal* 2015; 79: 711–719.
- Schmitt MA., Scheaffer CC., Randall GW. Manure and fertilizer effects on alfalfa plant nitrogen and soil nitrogen. *Journal of Production Agriculture* 2024; 7(1): 104–109.
- Seymour NP. Impacts of pesticides and fertilizers on soil biota. Dissertation, University of Southern Queensland; 2002.

- Shang L., Wan L., Zhou X., Li S., Li X. Effects of organic fertilizer on soil nutrient status, enzyme activity, and bacterial community diversity in *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China. *PLoS ONE* 2020; 15: e0240559.
- Sharpley AN., Daniel TC., Edwards DR. Phosphorus movement in the landscape. *Journal of Production Agriculture* 1993; 6: 492–500.
- Shen J., Zhang L., Guo J., Ray JL., He J. Impact of long-term fertilization practices on the abundance and composition of soil bacterial communities in NE China. *Applied Soil Ecology* 2010; 46: 119–124.
- Shinoto Y., Otani R., Matsunami T., Maruyama S. Analysis of the shallow root system of maize grown by plowing upland fields converted from paddy fields: Effects of soil hardness and fertilization. *Plant Production Science* 2020; 24: 297–305.
- Singh B. Are nitrogenous fertilizers deleterious to soil health? *Agronomy* 2018; 8: 48.
- Singh TB., Ali A., Prasad M., Yadav A., Shrivastav P., Goyal D., Dantu PK. Role of organic fertilizers in improving soil fertility. In: *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management*; Springer: Cham, The Netherlands; 2020. pp. 61–77.
- Tang B., Rocci KS., Lehmann A., Rillig MC. Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality. *Global Change Biology* 2023; 29(7): 1971–1983.
- Tian Y., Wang Q., Gao W., Luo Y., Wu L., Rui Y., Huang Y., Xiao Q., Li X., Zhang W. Organic amendments facilitate soil carbon sequestration via organic carbon accumulation and mitigation of inorganic carbon loss. *Land Degradation & Development* 2022; 33(9): 1423–1433.
- Vanlauwe B., Bationo A., Chianu J., Giller KE., Merckx R., Mkwunye U., Sanginga N. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture* 2010; 39: 17–24.
- Watts DB., Torbert HA., Prior SA., Huluka G. Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility. *Soil Science Society of America Journal* 2010; 74: 1239–1247.
- Whalen JK., Chang C., Clayton GW., Carefoot JP. Cattel manure amendments can increase the pH of acid soils. *Soil Science Society of America Journal* 2000; 64: 962–966.
- Whalen JK., Thomas BW., Sharifi M. Novel practices and smart technologies to maximize the nitrogen fertilizer value of manure for crop production in cold humid temperate regions. In: *Advances in Agronomy*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.
- Wu L., Zhang W., Wei W., He Z., Kuzyakov Y., Bol R., Hu R. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization. *Soil Biology and Biochemistry* 2019; 135: 383–391.
- Xia Y., Kwon H., Wander M. Developing county-level data of nitrogen fertilizer and manure inputs for corn production in the United States. *Journal of Cleaner Production* 2021; 309.

- Xun W., Zhao J., Xue C., Zhang G., Ran W., Wang B., Shen Q., Zhang R. Significant alteration of soil bacterial communities and organic carbon decomposition by different long-term fertilization management conditions of extremely low-productivity arable soil in South China. *Environmental Microbiology* 2016; 18: 1907–1917.
- Yu GH., Chen CM., He XH., Zhang XZ., Li LN. Unexpected bulk density and microstructures response to long-term pig manure application in a Ferralic Cambisol Soil: Implications for rebuilding a healthy soil. *Soil and Tillage Research* 2020; 203: 104668.
- Yu H., Ding W., Luo J., Geng R., Cai Z. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* 2012; 124: 170–177.
- Yu WT., Bi ML., Xu YG., Zhou H., Ma Q., Jiang CM. Microbial biomass and community composition in a Luvisol soil as influenced by long-term land use and fertilization. *Catena* 2013; 107: 89–95.
- Zeng J., Liu XJ., Song L., Lin XG., Zhang HY., Shen CC., Chu H. Nitrogen fertilization directly affects soil bacterial diversity and indirectly affects bacterial community composition. *Soil Biology and Biochemistry* 2016; 92: 41–49.
- Zhang W., Xu M., Wang X., Huang Q., Nie J., Li Z., Li S., Hwang SW., Lee KB. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China. *Journal of Soil and Sediment* 2012; 12: 457–470.
- Zhang Y., Zhang S., Wang R., Cai J., Zhang Y., Li H., Huang S., Jiang Y. Impacts of fertilization practices on pH and the pH buffering capacity of calcareous soil. *Soil Science and Plant Nutrition* 2016; 62: 432–439.
- Zhao J., Ni T., Li Y., Xiong W., Ran W., Shen B., Shen Q., Zhang R. Responses of bacterial communities in arable soils in a rice-wheat cropping system to different fertilizer regimes and sampling times. *PLoS ONE* 2014; 9: e85301.
- Zhao J., Wu X., Nie C., Wu T., Dai W., Liu H. Analysis of unculturable bacterial communities in tea orchard soils based on nested PCR-DGGE. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2012; 28: 1967–1979.
- Zheng Y., Jin J., Wang X., Clark GJ., Tang C. Increasing nitrogen availability does not decrease the priming effect on soil organic matter under pulse glucose and single nitrogen addition in woodland topsoil. *Soil Biology and Biochemistry* 2022; 172: 108767.
- Zhou M., Xiao Y., Xiao L., Li Y., Zhang X., Cruse RM., Liu X. Increased soil aggregate stability by altering contents and chemical composition of organic carbon fractions via seven years of manure addition in mollisols. *Agriculture* 2023; 13(1): 88.
- Zhu Z., Ge T., Liu S., Hu Y., Ye R., Xiao M., Tong C., Kuzyakov Y., Wu J. Rice rhizodeposits affect organic matter priming in paddy soil: the role of N fertilization and plant growth for enzyme activity, CO₂ and CH₄ emissions. *Soil Biology and Biochemistry* 2018; 116: 369–377.