

TOPRAK VE BİTKİ BESLEME

ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

HAZİRAN 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Oğuz Can TURGAY

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / HAZİRAN 2026 - Ankara
ISBN /978-625-321-154-7

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

**TOPRAK VE BİTKİ BESLEME
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

HAZİRAN 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Oğuz Can TURGAY

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

TARIMSAL EKOSİSTEMLERDE YEŞİL GÜBRE UYGULAMALARININ TOPRAK KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Güney AKINOĞLU, Mustafa SAĞLAM 7

BÖLÜM 2

NANOGÜBRELERİN TOPRAK MİKOORGANİZMALARINA ETKİLERİ

Lale YAZICI SUNGURTEKİN, Meral ÖDEMİŞ,
Çiğdem KÜÇÜK 31

BÖLÜM 3

WEPP MODELİ İÇİN GELECEK İKLİM VERİ SETLERİNİN HAZIRLANMASI: MARKSİM- CLİGEN ENTEGRASYONU VE UYGULAMA REHBERİ

Saniye DEMİR 49

BÖLÜM 1

TARIMSAL EKOSİSTEMLERDE YEŞİL GÜBRE UYGULAMALARININ TOPRAK KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Güney AKINOĞLU¹, Mustafa SAĞLAM²

¹ Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, guney.akinoglu@omu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-4624-2876

² Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, mustafa.saglam@omu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-7564-5079

1. Giriş

Tarım toprakları, tarımsal üretim sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olup gıda güvenliğinin sağlanması, doğal kaynakların korunması ve ekolojik dengenin sürdürülmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Davis ve ark., 2023). Ancak uzun süreli ve yoğun tarımsal yönetim uygulamaları, dünya genelinde birçok bölgede tarım topraklarının kalitesinde sürekli bir azalmaya neden olurken; bu durum küresel gıda güvenliği ve tarımsal sürdürülebilirlik açısından önemli bir risk faktörü haline gelmektedir (Xue ve ark., 2022).

Verimlilik potansiyeli yüksek, organik maddece zengin ve kalın üst toprak tabakasına sahip birçok tarım arazisinde, uzun yıllar süre gelen yoğun toprak işlemler, monokültür üretim sistemleri ve yüksek dış girdi kullanımları sonucunda toprak bozulması belirginleşmiştir. Bu bozulma; üst toprağın incilmesi, organik madde kaybı, besin elementi tükenmesi, yapısal bozulma ve toprak sıkışmasında artış gibi göstergelerle ortaya çıkmaktadır. Bazı bölgelerde uzun dönemli ekim faaliyetleri sonrasında toprak organik madde içeriğinde %50'ye varan azalmalar ve toprak yoğunluğunda %30'un üzerinde artışlar rapor edilmektedir (Li ve ark., 2025). Bu süreçler, üst toprak kaybı ve erozyonla birlikte değerlendirildiğinde, tarımsal üretim kapasitesinin uzun vadede zayıflamasına yol açmaktadır. Bu nedenle, toprak kalitesinin korunması ve iyileştirilmesine yönelik rasyonel ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Toprak bozulmasıyla mücadelede uygulanan yöntemler arasında yer alan yeşil gübreleme; doğal, ekonomik ve çevre dostu bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Uzun dönemli uygulama sonuçları, yeşil gübrelerin tarım topraklarında organik madde ve besin elementi içeriğini artırabildiğini; kimyasal gübre girdisini azaltabildiğini; toprak erozyonuna karşı direnci güçlendirebildiğini; zararlı, hastalık ve yabancı ot baskısını azaltabildiğini ve toprak mikrobiyal aktivitesini teşvik edebildiğini göstermektedir (Wang ve ark., 2025a).

Kimyasal gübre uygulamaları, yalnızca hasat sonrası bitki artıklarının toprağa geri kazandırılması veya ikili nadas sistemleri gibi geleneksel yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, yeşil gübreleme uygulamaları uzun vadeli ve çok boyutlu faydalar sunmaktadır. Bu uygulamalar, üretim maliyetlerini ve çevresel kirlilik risklerini azaltma potansiyeline sahip olup, toprak kalitesinin bütüncül olarak iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Cao ve ark., 2024). Bu bağlamda, yeşil gübrelemenin tarım topraklarının kalitesini iyileştirmedeki rolünün ve etki mekanizmalarının kapsamlı biçimde anlaşılması, uygulamaların rasyonel planlanması açısından önem taşımaktadır.

Tarımsal ekosistemlerde yeşil gübre uygulamaları; toprak agregat yapısını ve stabilitesini iyileştirebilmekte, gözenekliliği artırabilmekte, su ve besin maddelerinin tutulma

kapasitesini ykseltebilmekte ve erozyonu azaltabilmektedir (Wang ve ark., 2024a; Zhang ve ark., 2023). Farklı rn rotasyon sistemlerinde yrtlen çalışmalar, yeşil gübre uygulamalarının toprak organik karbon ve toplam azot stoklarını artırdığını; monokültür sistemlerine kıyasla toprak verimliliğini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır (Chang ve ark., 2024a; Yao ve ark., 2021).

Uzun dönemli tarla denemeleri, yeşil gübrenin toprağa karıştırılması veya mal olarak uygulanmasının, bazı üretim sistemlerinde N₂O emisyonlarını azaltabildiğini ve toprak agregatları ile ilişkili fraksiyonlarda mineral azotun tutulmasını artırabildiğini göstermektedir (Lyu ve ark., 2024). Bunun yanı sıra, yeşil gübre uygulamaları toprak pH'sının düzenlenmesine katkı sağlayabilmekte ve tuzluluk düzeylerinin hafifletilmesinde rol oynayabilmektedir (Wang ve ark., 2024a).

Yeşil gübre bitkileri, toprak mikroorganizmaları için çeşitli karbon ve enerji kaynakları sağlayarak mikrobiyal aktiviteyi desteklemekte; toprak havalanmasını ve su tutma kapasitesini iyileştirerek mikrobiyal yaşam için daha elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Bu süreçler, mikrobiyal çeşitliliğin artmasına ve toprakta besin döngüsü süreçlerinin daha etkin işlemesine katkı sağlamaktadır (Dong ve ark., 2024).

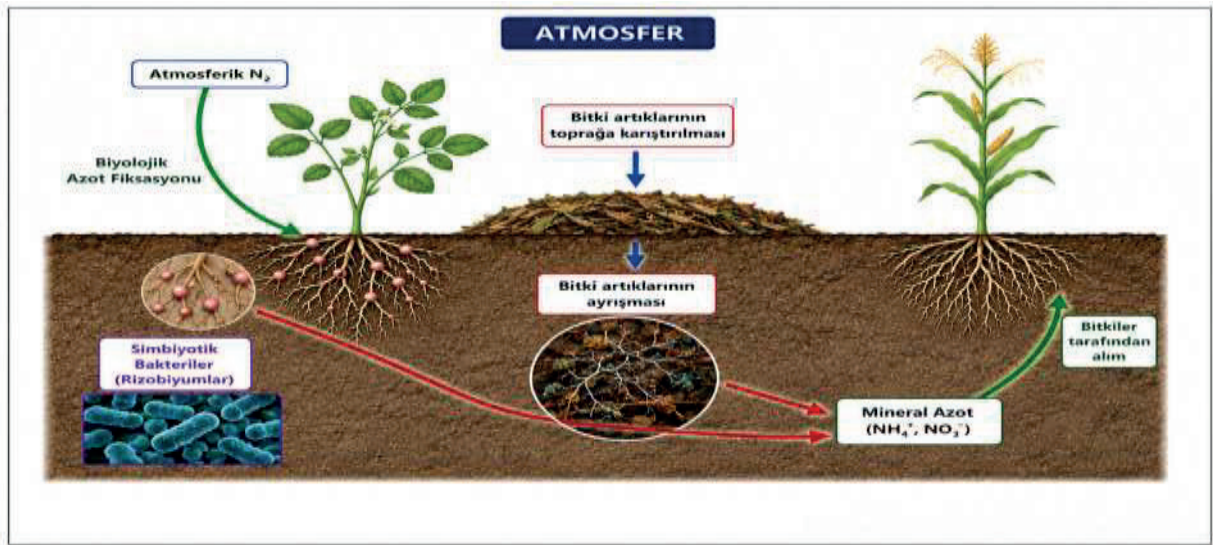
Bu bölümde, yeşil gübre uygulamalarının tarım topraklarının kalitesi üzerindeki etkileri mevcut literatür ışığında değerlendirilmekte; etki mekanizmaları, ekosistem düzeyindeki sonuçları ve sürdürülebilir üretim sistemlerine katkıları btncl bir çerçevede ele alınmaktadır.

2. Yeşil Gübre Bitkileri ve Temel zellikleri

Yeşil gübre, tarımsal üretim sistemlerinde toprağa karıştırılmak veya yüzeyde bırakılmak üzere yetiştirilen taze yeşil bitki materyalinden elde edilen organik gübre kaynağını ifade etmektedir. Botanik sınıflandırmaya göre yeşil gübre bitkileri, genel olarak baklagil ve baklagil olmayan türler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Wang ve ark., 2025b).

Baklagil yeşil gübre bitkileri, uygulamada en yaygın kullanılan grubu oluşturmaktadır. Baklagillerin temel özelliği, kök nodüllerinde *Rhizobium* bakterileri ile kurdukları simbiyotik ilişki sayesinde biyolojik azot fiksasyonu gerçekleştirebilmeleridir. Biyolojik azot fiksasyonu, baklagil bitkilerinin atmosferik azotu bitki tarafından kullanılabilir formlara dönüştürmesini sağlayan en önemli biyolojik süreçlerden birisidir (şekil 1). Bu süreç, özellikle azotlu gübre kullanımının sınırlı olduğu veya sürdürülebilir besin elementi yönetiminin hedeflendiği baklagil temelli tarım sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Farklı retim sistemlerine

entegre edilen baklagiller, yalnızca kendi azot gereksinimlerinin önemli bir kısmını karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda agroekosistemde kendisinden sonra yetiştirilecek bitkilerin azot ekonomisine de önemli katkılar sağlamaktadır (Meena ve ark., 2018; Lengwati ve ark., 2020). Fasulye, börülce, soya fasulyesi, bezelye ve yer fıstığı gibi baklagil türleri, biyolojik azot fiksasyonunu gerçekleştiren *Rhizobium* bakteri türleri için önemli konakçı bitkilerdir. Baklagiller, tarımsal üretim sistemlerine biyolojik olarak fikse edilmiş azot kazandırmalarının yanı sıra, toprakta çözünmeyen fosfor formlarının yararlılığını artırmakta, mikrobiyal aktiviteyi teşvik etmekte, toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirmekte, organik madde birikimine katkı sağlamakta ve yabancı ot baskısını azaltmaktadır (Giller, 2001; Stagnari ve ark., 2017).



Şekil 1. Baklagil yeşil gübrelerinde toprağa azot kazandırılması (biyolojik azot fiksasyonu) ve azotun mineralizasyon süreci (Meena ve ark., 2018'den uyarlanmıştır)

Bakla, mercimek, bezelye, nohut, yonca ve kırmızı yonca gibi farklı baklagil türlerinde biyolojik azot fiksasyonu miktarının 21 ile 389 kg ha⁻¹ arasında değiştiği bildirilmektedir (Vasconcelos ve ark., 2020). Bununla birlikte, biyolojik azot fiksasyonunun düzeyi ve tarımsal sisteme sağladığı katkı; baklagil türü, toprak özellikleri, iklim koşulları, yetiştirme sistemi (monokültür yetiştiriciliği, birlikte yetiştiricilik veya ürün rotasyonu, vb.) ve uygulanan toprak yönetim stratejileri gibi birçok faktöre bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir (Stagnari ve ark., 2017). Dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen baklagil türlerinin biyolojik azot fiksasyon kapasiteleri Çizelge 1'de sunulmuştur. Çizelge 1 incelendiğinde, biyolojik azot fiksasyonu kapasitesinin hem baklagil türüne hem de yetiştirme koşullarına ve lokasyona bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 1. Dünyada yaygın olarak yetiştirilen bazı baklagil türlerinin biyolojik azot fiksasyonu kapasitesi ve yetiştirildiği bölgeler (Vasconcelos ve ark., 2020'den uyarlanmıştır)

Bitki adı	Bilimsel adı	Biyolojik azot fiksasyonu (kg ha ⁻¹)	Yetiştirme alanı
Bakla	<i>Vicia faba</i> L.	118.6–311	Yunanistan, İtalya
Bezelye	<i>Pisum sativum</i> L.	36.6–125.3	Kanada, Yunanistan
Adi fiğ	<i>Vicia sativa</i> L.	107–131	İsviçre
Mürdümük	<i>Lathyrus sativus</i> L.	101–149	İsviçre
Beyaz acıbakla	<i>Lupinus albus</i> L.	53.1–64.1	İtalya
Nohut	<i>Cicer arietinum</i> L.	21.0–103.6	Kanada
Mercimek	<i>Lens culinaris</i> Medik.	23.0–86.8	İsviçre, Kanada
Fasulye	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	16.3–71.9	Kanada
Börülce	<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp.	36–75	Brezilya
Soya fasulyesi	<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	90–95	ABD
Yonca	<i>Medicago sativa</i> L.	103–209	Kanada, Çin
İskenderiye üçgülü	<i>Trifolium alexandrinum</i> L.	35–59	İsviçre
Kırmızı üçgül	<i>Trifolium pratense</i> L.	35.4–389	Danimarka, ABD

İkinci ana grubu temsil eden baklagil olmayan yeşil gübre bitkileri ise kolza, karabuğday, çavdar ve bazı hızlı gelişen yabancı türleri içermektedir. Bu bitkiler biyolojik azot fiksasyonu yapmamakla birlikte; toprak organik maddesinin artırılması, toprak yapısının iyileştirilmesi ve bazı toprak kaynaklı hastalıkların baskılanması açısından önemli katkılar sunmaktadır. Güçlü toprak örtüsü oluşturma kapasiteleri ve çevresel streslere dayanıklılıkları sayesinde belirli toprak koşullarında hedefe yönelik iyileştirme sağlamaktadırlar ve baklagil yeşil gübrelerle birlikte tamamlayıcı bir işlev görebilmektedirler (Wang ve ark., 2025b).

Yeşil gübre bitkilerinin seçimi; biyolojik özellikleri, ekolojik uyum yetenekleri ve toprak kalitesini iyileştirmedeki işlevleri dikkate alınarak yapılmalıdır. Türler arasında çevresel adaptasyon açısından da belirgin farklılıklar bulunmaktadır (Wang ve ark., 2025b). Örneğin, bazı türler kışlık yeşil gübre olarak değerlendirilirken, bazı türler yazlık üretim sistemlerine daha uygun özellikler göstermektedir. Uzun büyüme dönemine sahip türler, daha derin toprak katmanlarının iyileştirilmesinde etkili olabilirken; kısa büyüme döngüsüne sahip türler ise yüzey toprağında organik madde ve besin elementi içeriğinin hızlı biçimde artırılmasına katkı sağlayabilmektedir (Xu ve ark., 2024).

Yeşil gübre bitkilerinin besin elementi içeriği ve ayrışma özellikleri, toprakta besin sağlama etkinliğini doğrudan etkiler. Yüksek protein içeriğine sahip baklagil türleri toprağa karıştırıldıktan sonra nispeten hızlı azot mineralizasyonu sağlarken, baklagil olmayan türler daha yavaş ayrışarak uzun vadeli organik madde birikimine katkıda bulunabilmektedir (Li ve ark., 2017).

Tür çeşitliliği, yeşil gübre uygulamalarının farklı agroekolojik koşullara uyarlanmasına olanak tanır. Her tür; toprak kalitesinin iyileştirilmesi, karbon ve azot depolanmasının

artırılması ve ekolojik işlevlerin desteklenmesi bakımından farklı avantajlar sunmaktadır (Zhang ve ark., 2022). Bu nedenle uygulamada, toprak özellikleri, iklim koşulları ve ürün desenine bağlı olarak uygun türlerin seçilmesi ve diğer tarımsal uygulamalarla bütüncül biçimde entegre edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, tarım topraklarında kalitenin sürekliliğinin sağlanmasına ve sürdürülebilir tarımsal üretim sistemlerinin desteklenmesine katkı sunmaktadır.

3. Yeşil Gübrelemenin Tarım Topraklarının Kalitesi Üzerindeki Etkileri

Toprak kalitesi, belirli bir ekosistem ve arazi kullanım sistemi içerisinde toprağın biyolojik üretkenliği sürdürebilme, çevresel kaliteyi koruyabilme ve bitki, hayvan ile insan sağlığını destekleyebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (Joimel ve ark., 2017; Bünemann ve ark., 2018). Günümüzde toprak kalitesi kavramı yalnızca tarımsal üretim açısından değil, aynı zamanda ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği, doğal kaynakların korunması ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması açısından da önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Uzun süreli yoğun tarımsal faaliyetler, aşırı toprak işleme, yetersiz organik madde girdisi ve dengesiz gübreleme uygulamaları birçok bölgede toprak kalitesinin azalmasına neden olmakta; bu durum tarımsal sürdürülebilirlik ve küresel gıda güvenliği açısından önemli bir sorun haline gelmektedir (Schiefer ve ark., 2016; Xue ve ark., 2022).

Toprak kalitesi, doğrudan ölçülebilir bir toprak özelliği olmaması nedeniyle, kalite göstergesi adı verilen fiziksel, kimyasal ve biyolojik toprak özelliklerinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu, bileşke bir kavramdır. Bu nedenle toprak kalitesinin belirlenmesinde tek bir toprak özelliğinin kullanılması yeterli değildir. Toprak kalite değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılan kalite göstergeleri arasında toprak tekstürü, hacim ağırlığı, agregat stabilitesi, infiltrasyon hızı, su tutma kapasitesi ve porozite gibi fiziksel özellikler; pH, elektriksel iletkenlik, katyon değişim kapasitesi, organik karbon, toplam azot ve yarıyışlı besin elementi içerikleri gibi kimyasal özellikler; mikrobiyal biyokütle, enzim aktiviteleri, mikrobiyal çeşitlilik ve toprak solunumu gibi biyolojik özellikler yer almaktadır (Maurya ve ark., 2020; Chaudhry ve ark., 2024). Bu göstergeler yardımıyla hesaplanan toprak kalite indeksleri, farklı arazi kullanım ve yönetim uygulamalarının toprak üzerindeki etkilerinin bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Toprak kalitesi kavramı, ayrıca bitkisel üretim ve çevresel kalite süreçlerinde toprağın yerine getirdiği temel fonksiyonlarla da doğrudan ilişkilidir. Sağlıklı bir toprak; bitki büyümesi için uygun ortam sağlamak, suyun depolanmasını ve iletimini düzenlemek, besin

elementlerinin döngüsünü gerçekleştirmek, organik karbonu depolamak ve çok sayıda canlı organizma için yaşam alanı oluşturmak gibi çok sayıda işleve sahiptir. Bunun yanında; çevresel kirleticilerin filtrelenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve iklimin etkilerinin düzenlenmesi gibi önemli ekosistem hizmetlerini de yerine getirmektedir (Xu ve ark., 2017; De ve ark., 2022; Jia ve ark., 2022). Dolayısıyla toprak kalitesindeki değişimler yalnızca ürün gelişimini ve verimini değil, aynı zamanda tarımsal ekosistemlerin genel işleyişini de doğrudan etkilemektedir.

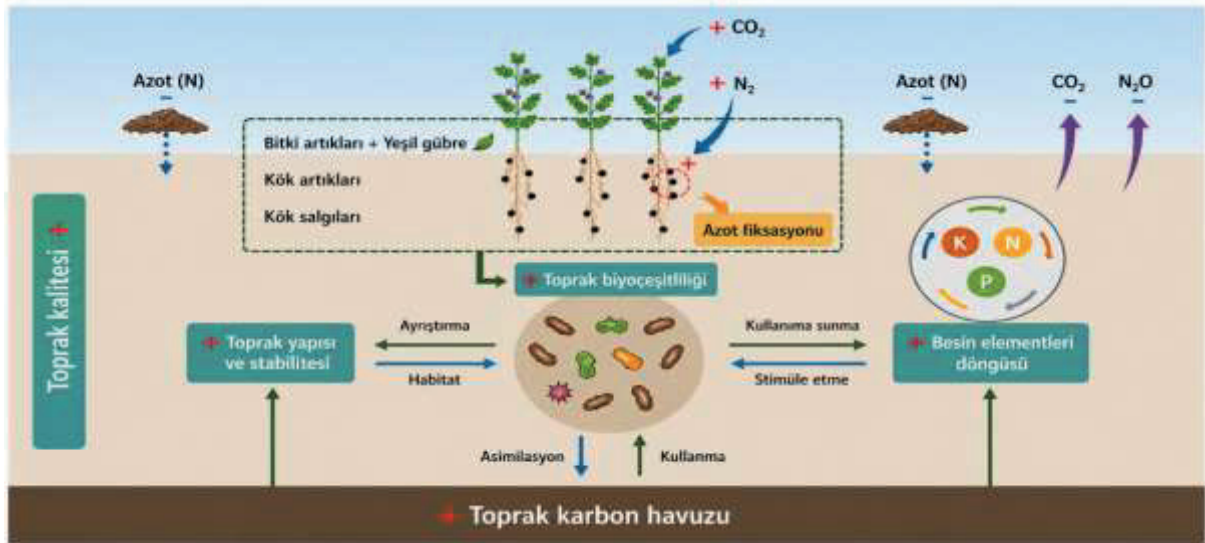
Toprak kalitesi, toprak verimliliği kavramıyla yakından ilişkili olmakla birlikte aynı anlamı taşımamaktadır. Toprak verimliliği, bitkilerin gereksinim duyduğu besin elementlerini yeterli miktarda ve uygun dengede sağlayabilme kapasitesini ifade ederken; toprak kalitesi, bitkinin yetiştirildiği çevresel ekosistemi de kapsayan daha geniş bir kavramı içermektedir. Toprağın fiziksel yapısı, kimyasal değişkenliği, biyolojik aktivitesi, çevresel işlevleri ve ekolojik dayanıklılığı toprak kalitesinin bileşenleri veya kapsamı arasında yer almaktadır (Winding ve ark., 2005). Bu nedenle günümüzde sürdürülebilir tarımsal üretim yaklaşımları sırasında yalnızca verim artışı hedeflenmemeli, aynı zamanda toprak kalitesinin korunması ve geliştirilmesi de temel hedeflerden biri olmalıdır.

Yeşil gübre uygulamaları, toprak kalitesinin iyileştirilmesine yönelik en etkili biyolojik yönetim stratejilerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Yeşil gübre bitkilerinin toprağa karıştırılması sonucunda sisteme önemli miktarlarda organik madde ve bitki besin elementi kazandırılmaktadır. Uzun dönemli araştırmalar, yeşil gübre uygulamalarının toprak kalite indekslerini ve sürdürülebilirlik göstergelerini iyileştirdiğini; su ve besin elementi kullanım etkinliğini artırdığını; kimyasal gübre kullanımını azaltabildiğini ve tarımsal sistemlerin çevresel dayanıklılığını güçlendirdiğini bildirmektedir (Xu ve ark., 2025; Wang ve ark., 2025a). Bu nedenle yeşil gübreleme, sürdürülebilir tarımsal üretim sistemlerinde toprak verimliliğini iyileştirmenin yanı sıra toprak kalitesinin korunması ve geliştirilmesi açısından önemli bir yönetim uygulaması olarak değerlendirilmelidir.

3.1. Yeşil gübrenin toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri

Yeşil gübre, büyüme ve gelişme süreci boyunca toprak çözeltisindeki besin elementlerini alarak biyokütlesinde geçici olarak depolayan, hasat edilmeden toprağa karıştırıldığında ise bu elementleri yeniden toprak ekosistemine kazandıran ve önemli miktarda organik madde sağlayan bir uygulamadır (Şekil 2). Bu süreç, besin elementlerinin biyolojik immobilizasyonu ve ardından mineralizasyonu yoluyla gerçekleşmektedir. Kullanılan yeşil gübre bitki türlerinin çeşitliliği, toprağa kazandırılan organik maddenin

kimyasal bileşimini, C/N oranını ve ayrışma hızını belirlemektedir (Cao ve ark., 2024). Baklagil kökenli yeşil gübreler, atmosferik azotu simbiyotik yolla bağlayabilmeleri ve genellikle düşük C/N oranına sahip olmaları nedeniyle daha hızlı ayrışmakta ve kısa sürede mineral azot salınımı sağlamaktadır (Liu ve ark., 2022; Zhou ve ark., 2023). Buna karşılık tahıl ve diğer baklagil dışı türler nispeten daha yüksek C/N oranına sahip olup daha yavaş ayrışmakta; bu durum daha kararlı organik madde fraksiyonlarının (örneğin humifikasyon ürünlerinin) oluşumunu destekleyerek toprak organik maddesinin kalıcılığını artırmaktadır (Ai ve ark., 2024; Yang ve ark., 2023a). Toprak organik maddesindeki artış, yalnızca besin elementi arzını ve verimliliği iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini bütüncül biçimde geliştirmektedir (Al-Shammery ve ark., 2024; Liu ve ark., 2024). Yeşil gübre uygulamaları, çeşitli mekanizmalar aracılığıyla toprak yapısını ve agregat stabilitesini güçlendirir. Gelişmiş kök sistemleri, toprakta biyopor oluşumunu teşvik ederek toplam gözenekliliği artırmakta, hacim ağırlığını azaltmakta ve su infiltrasyonu ile hidrolik iletkenliği iyileştirmektedir (Wang ve ark., 2024b; Fan ve ark., 2020).



Şekil 2. Yeşil gübre kullanımının tarım arazilerinin toprak kalitesi üzerindeki etkilerinin şematik gösterimi (Wang ve ark., 2025(b)’ten uyarlanmıştır).

Yeşil gübrenin toprağa karıştırılmasının ardından bitki kalıntılarının ayrışması sürecinde oluşan mikrobiyal kökenli polisakkaritler ve diğer organik bağlayıcı maddeler, toprak agregatlarının oluşumunda temel rol oynamaktadır. Bu organik bağlayıcı bileşikler mineral parçacıklarla etkileşime girerek agregat stabilitesini artırmakta; böylece toprağın su tutma kapasitesini, besin elementi depolama potansiyelini ve erozyona karşı direncini güçlendirmektedir (Zhang ve ark., 2023; Si ve ark., 2024; Yang ve ark., 2023b). Yeşil gübre

uygulamaları ayrıca toprak reaksiyonunun düzenlenmesinde ve tuzluluk/alkalilik sorunlarının hafifletilmesinde de etkili olabilmektedir (Li ve ark., 2024; Xing ve ark., 2024). Bitki kalıntılarının ayrışması sırasında açığa çıkan düşük molekül ağırlıklı organik asitler ve artan mikrobiyal aktivite, özellikle alkali topraklarda pH'nın sınırlı düzeyde düşmesine katkı sağlayabilmektedir (Li ve ark., 2024).  alışmalar, kontrol uygulamasına kıyasla baklagil yeşil gübre uygulamalarının alkali topraklarda pH'yı yaklaşık 0.15–0.5 birim; baklagil dışı türlerin ise 0.2–0.4 birim azaltabildiğini göstermektedir (Lyu ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2024). Bunun yanı sıra, kök salgıları ve artan organik madde içeriği, toprakta iyon değişim süreçlerini etkileyerek sodyumun değişebilir fraksiyonunun azalmasına katkı sağlayabilmektedir. Yeşil gübre bitkileri, kök alımı ve rizosfer süreçleri aracılığıyla sodyum/potasyum dengesini iyileştirebilmekte; bu durum özellikle tuzlu-alkali topraklarda sodyumun toksik etkilerinin sınırlandırılmasına ve bitki yetiştirme koşullarının iyileştirilmesine katkıda bulunabilmektedir (Lian ve ark., 2023). Ayrıca organik madde artışı, katyon değişim kapasitesini ve tamponlama kapasitesini artırarak pH'daki ani dalgalanmaların bitki gelişimi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmaktadır (Hu ve ark., 2023; Rasmussen ve ark., 2018). Yeşil gübre uygulamaları toprak fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli avantajlar sunmakla birlikte, sağlanan etkinlik; toprak tipi, başlangıç organik madde düzeyi, iklim koşulları ve uygulama yönetimine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Hu ve ark., 2023). Bu nedenle, daha hedefli ve etkili toprak iyileştirme stratejileri geliştirmek amacıyla, yeşil gübre bitki türleri ile spesifik toprak ve  vre koşulları arasındaki uyumun optimize edilmesine yönelik araştırmaların sürdürülmesi gerekmektedir.

3.2. Yeşil gübrenin toprağın biyolojik özellikleri üzerindeki etkileri

Toprak mikroorganizmaları, toprak organik maddesinin ayrışması, besin elementlerinin döngüsü ve bitki gelişimi ile toprak kalitesini destekleyen diğer kritik agroekosistem süreçlerinin temel bileşenleridir (Bardgett ve van der Putten, 2014; Fierer, 2017). Yeşil gübre bitkileri, büyüme dönemleri boyunca kök salgıları (rizodepozisyon) ve toprak ile bitki arasındaki besin alışverişi yoluyla rizosfer mikrobiyomunu düzenleyebilmektedir (Pausch ve Kuzyakov, 2018; Saleem ve ark., 2020). Bunun yanı sıra, yeşil gübre bitkilerinin toprağa karıştırılması mikroorganizmalar için taze organik madde kaynağı sağlayarak tarımsal sistemlerde mikrobiyal biyokütlenin artmasına ve enzim aktivitelerinin yükselmesine katkıda bulunmaktadır (Khan ve ark., 2019; Brtnicky ve ark., 2021).

Biyolojik toprak kalitesinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan göstergelerden biri de toprak enzim aktiviteleridir. Toprak enzimleri büyük  l de toprak

mikroorganizmaları tarafından salgılandığından, enzim aktiviteleri mikrobiyal topluluklarda ve biyokimyasal süreçlerde meydana gelen potansiyel değişimlerin göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Sinsabaugh ve ark., 2008). Katalaz, β -glukozidaz ve üreaz gibi toprak enzimlerinin aktiviteleri, organik maddenin parçalanması ile karbon ve azot döngüsü süreçleriyle yakından ilişkilidir (Stott ve ark., 2010; Dharmakeerthi ve Thenabadu, 2013; Kolesnikov ve ark., 2019).

Yeşil gübre uygulamalarının toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Zheng ve ark. (2018), yeşil gübre uygulamasının β -glukozidaz, β -ksilozidaz ve sellobiyohidrolaz aktivitelerini önemli ölçüde artırdığını ve bunun yeşil gübre materyalinin ayrışmasını hızlandırabildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca bu durumun, Ruminococcaceae ve Lachnospiraceae familyalarının göreceli bolluklarındaki artışlarla ilişkili olduğu bildirilmiştir. Yeşil gübrenin farklı enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerinin kullanılan yeşil gübre türüne bağlı olarak değiştiği rapor edilmiş olup, bu durum farklı yeşil gübre türlerinin uygulanmasıyla toprakta farklı baskın mikrobiyal toplulukların şekillendiğini göstermektedir (Gao ve ark., 2016; Khan ve ark., 2019).

3.3. Yeşil gübrelemenin toprakta besin elementi döngüsü üzerindeki etkileri

Sürdürülebilir bir tarım uygulaması olarak yeşil gübreleme, toprak verimliliğini artırmakta, besin elementlerinin toprak içi dolaşımını desteklemekte ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Şekil 2) (Yao ve ark., 2021; Ren ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024c). Yeşil gübre biyokütlesinin toprağa karıştırılmasının ardından gerçekleşen ayrışma süreci, önemli miktarda organik madde girdisi sağlamakta; azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) başta olmak üzere makro besin elementlerinin mineral formlarının açığa çıkmasına olanak tanımaktadır (Yao ve ark., 2021). Bu süreç, bitkiler tarafından doğrudan alınabilir besin elementlerinin oluşumunu destekler. Baklagil kökenli yeşil gübreler, *Rhizobium* bakterileri ile kurdukları simbiyotik ilişki sayesinde atmosferik azotu biyolojik azot fiksasyonu yoluyla bağlamakta ve bitkiler tarafından kullanılabilir formlara dönüştürmektedir. Bu mekanizma yalnızca yeşil gübre bitkisinin azot gereksinimini karşılamakla kalmamakta, aynı zamanda sonraki ürünler için ek bir azot kaynağı da oluşturmaktadır (Koudahe ve ark., 2022). Bitki kalıntılarının ayrışması sırasında organik azot, mikrobiyal mineralizasyon süreçleri sonucunda önce amonyum (NH_4^+), ardından nitrifikasyon yoluyla nitrat (NO_3^-) formuna dönüşmekte ve bitkilerin alımına sunulmaktadır. Yeşil gübrenin uygun planlama ile uygulanması, kimyasal azotlu gübre gereksinimini azaltmakta; azotun yıkanması ve gaz formundaki kayıplar gibi çevresel riskleri sınırlandırarak azot kullanım etkinliğini artırmaktadır (Lyu ve ark., 2025). Yeşil gübre uygulamaları, toprak fosforunun

biyoyararlılığını çeşitli mekanizmalarla artırır. Kök salgılarında bulunan düşük molekül ağırlıklı organik asitler, özellikle kalsiyum fosfat gibi            düşük fosfor bileşiklerini        fosforun bitkiler tarafından alınabilirliğini artırabilmektedir. Ayrıca, ayrışma sürecinde açığa çıkan organik maddeler, fosfat iyonlarıyla etkileşime girerek fosforun toprakta daha dengeli bir şekilde tutulmasına katkı sağlamakta ve aşırı fiksasyonu sınırlayabilmektedir (Liu ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2022). Bunun yanı sıra, yeşil gübre uygulamaları fosfat       mikroorganizmaların aktivitesini teşvik ederek inorganik fosforun mobilizasyonunu desteklemekte ve fosfor kullanım verimliliğini artırmaktadır (Chang ve ark., 2024b). Potasyum döngüsü açısından da yeşil gübre önemli işlevler üstlenmektedir. Yonca ve  avdar gibi bazı türler, gelişmiş kök sistemleri ve rizosfer etkileri sayesinde toprak minerallerine bağlı potasyumun serbestleşmesini kolaylaştırabilmektedir. Kök salgıları ve iyon değişim süreçleri aracılığıyla potasyumun          fraksiyonu artmakta ve bitki gereksinimleri daha etkin biçimde karşılanabilmektedir (Cao ve ark., 2024). Bu durum, potasyumlu gübrelere olan bağımlılığın azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Yeşil gübre biyokütlesinin ayrışması sırasında  inko (Zn), demir (Fe), mangan (Mn) ve bakır (Cu) gibi mikro besin elementleri de kademeli olarak toprak        ine geçmektedir (Li ve ark., 2017). Ayrışma  r nleri ve artan organik madde içeriği, metal iyonlarıyla kompleksleşme (şelatlaşma) oluşturarak mikro besin elementlerinin yıkanma kayıplarını azaltmakta ve bitkiler için daha dengeli bir besin ortamı oluşturmaktadır (Fang ve ark., 2024). Aynı zamanda bu süreç, rizosfer mikroorganizmaları için enerji ve karbon kaynağı sağlayarak mikrobiyal aktiviteyi artırmakta ve besin döngüsünün biyolojik bileşenini güçlendirmektedir. Yeşil gübre uygulamaları karbon döngüsünde de kritik bir rol oynamaktadır. Bitki kalıntılarında bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi yapısal karbon bileşikleri, mikrobiyal ayrışma ve humifikasyon süreçleri sonucunda daha kararlı organik madde fraksiyonlarına dönüşmektedir (Lyu ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2023). Bu dönüşüm, toprak yapısını iyileştirmekte; su ve besin elementi tutma kapasitesini artırmakta ve toprak mikroorganizmaları için uzun vadeli bir enerji kaynağı oluşturmaktadır. Böylece karbon birikimi, yalnızca toprak verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda toprak besin döngüsü sistemlerinin istikrarına ve sürdürülebilirliğine de katkıda bulunmaktadır (Yao ve ark., 2021; Nazir ve ark., 2024). Yeşil gübre uygulamalarında besin salınım hızının bitki talebiyle senkronizasyonu, etkinliğin belirlenmesinde kritik bir faktördür (Li ve ark., 2017). Uygun tür seçimi ve toprağa karışırma zamanlaması ile besin salınımı, ürünün maksimum besin gereksinimi dönemleriyle uyumlu h le getirilebilir. Farklı yeşil gübre türleri, ayrışma hızları ve besin salınım desenleri bakımından farklılık gösterdiğinden, uygulamaların toprak

özellikleri ve ürün gereksinimleri dikkate alınarak optimize edilmesi gerekmektedir (Li ve ark., 2017; Wang ve ark., 2024c). Bununla birlikte, geniş ölçekli yeşil gübre üretimi ekilebilir alanın bir bölümünü geçici olarak kullanım dışı bırakabileceğinden, ekonomik ve ekolojik kazanımlar arasında dengeli bir planlama yapılması önem taşımaktadır. Gelecekteki araştırmaların; genomik ve metabolomik yaklaşımlar aracılığıyla yeşil gübrenin toprak besin döngüsünü düzenleyen mikrobiyal mekanizmalarının daha ayrıntılı olarak ortaya konulmasına, farklı ekosistem koşullarına uyumlu genetik kaynakların geliştirilmesine ve hassas tarım teknolojilerinin entegrasyonu ile tür ve zamanlama optimizasyonuna odaklanması gerekmektedir. Bu yaklaşımlar, yeşil gübrenin besin döngüsü üzerindeki etkinliğinin artırılmasına ve sürdürülebilir kullanımının güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

4. Yeşil Gübre Araştırmalarında Mevcut Sınırlamalar ve Uygulama Zorlukları

Yeşil gübre uygulamalarına ilişkin araştırmalar son yıllarda önemli ölçüde artmış ve bu uygulamaların toprak kalitesi üzerindeki etkilerine yönelik bilgi birikimi de önemli ölçüde gelişmiştir. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların kapsamı, etki mekanizmalarının açıklanma düzeyi ve uygulamaların üretim sistemlerine entegrasyonu açısından değerlendirilmesi gereken çeşitli hususlar bulunmaktadır. Ayrıca, farklı çevresel koşullar ve tarımsal sistemlerde elde edilen bulguların birlikte değerlendirilmesi, konuya ilişkin daha kapsamlı bir bakış açısı sunmaktadır. Bu bağlamda bu bölümde, yeşil gübre araştırmalarında öne çıkan sınırlamalar ile uygulama sürecinde karşılaşılan başlıca zorluklar ele alınmıştır.

4.1. Araştırmaların coğrafi ve agroekolojik kapsamına ilişkin sınırlamalar

Yeşil gübrenin toprak kalitesinin iyileştirilmesindeki rolü çok sayıda çalışma ile ortaya konulmuş olmakla birlikte, mevcut literatürün coğrafi dağılımı ve agroekolojik kapsamı bakımından önemli sınırlamalar bulunmaktadır. Örneğin, kışlık yeşil gübre uygulamalarının tropikal kurak arazi çeltik rotasyon sistemlerinde toprak kalitesini ve ekosistem çok işlevselliğini artırabildiği bildirilmektedir (Liu ve ark., 2025). Benzer şekilde, Çin'in kurak vaha sulama alanlarında yürütülen çalışmalar, yeşil gübrelemenin üretim sistemlerine entegre edilmesinin toprak kalite göstergelerini ve ürün verimini anlamlı düzeyde iyileştirdiğini; özellikle toprak işlemesiz uygulamalarla birlikte kullanıldığında yüzey örtüsü ve toprak koruma etkisini güçlendirdiğini göstermektedir (Lyu ve ark., 2025). Hetao Sulama Bölgesi'nde gerçekleştirilen araştırmalar ise, ürün rotasyon sistemlerinde yeşil gübre kullanımının, sera gazı emisyonlarında belirgin bir artışa yol açmaksızın pulluk tabakasındaki toprak kalite parametrelerini iyileştirebildiğini ve buğday ile mısır verimini artırabildiğini ortaya koymaktadır (Zhao ve ark., 2024). Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük bir

kısmı belirli üretim sistemleri ve sınırlı bölgesel koşullar üzerinde yoğunlaşmıştır. Kurak, yarı kurak, yüksek rakımlı, aşırı soğuk ya da iklim değişkenliğinin yüksek olduğu bölgelerde yürütölen araştırmalar görece azdır. Farklı iklim tipleri ve toprak özelliklerine sahip agroekosistemlerde yeşil gübre uygulamalarının etkilerine ilişkin veri eksikliği, mevcut bulguların küresel ölçekte genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Özellikle karmaşık iklim–toprak–yönetim etkileşimlerinin belirleyici olduğu sistemlerde, biyofiziksel ve mikrobiyal süreçlerin ayrıntılı biçimde ortaya konulamamış olması önemli bir bilgi boşluğu oluşturmaktadır. Zaman ölçeği açısından da literatürde dikkat çekici sınırlamalar bulunmaktadır. Çalışmaların çoğu tek bir vejetasyon dönemine veya kısa süreli denemelere dayanmaktadır. Oysa toprak kalitesi göstergelerindeki değişimler genellikle kademeli ve birikimli süreçler sonucunda ortaya çıkar. Bu nedenle kısa süreli deneyler, yeşil gübre uygulamalarının uzun vadeli etkilerini yeterince yansıtmayabilir; bazı durumlarda etkilerin olduğundan daha düşük ya da daha yüksek olarak değerlendirilmesine yol açabilir. Toprak organik maddesi birikimi, agregat stabilitesi, besin döngüsü dinamikleri ve sera gazı emisyonları gibi parametrelerin güvenilir biçimde değerlendirilmesi için uzun dönemli ve çok yıllık saha denemelerine ihtiyaç vardır. Ayrıca, farklı araştırmalarda kullanılan yeşil gübre türleri, ekim ve toprağa karıştırma zamanları, toprak işleme sistemleri ve diğer yönetim uygulamalarına ilişkin standartlaştırılmış seçim ve raporlama kriterlerinin bulunmaması gibi süreçlerde sonuçların karşılaştırılabilirliğini sınırlamaktadır. Yeşil gübre türlerinin ekolojik özellikleri, büyüme süresi, biyokötle üretim potansiyeli ve ayrışma hızları, toprak kalite parametreleri üzerindeki etkileri doğrudan belirlemektedir. Ancak bu değişkenlerin bölgesel ve sistematik karşılaştırmalarına yönelik çalışmalar sınırlı olup, meta-analizlere elverişli bütöncöl veri setleri, henüz yeterince oluşturulmamıştır. Bu çerçevede, gelecekteki araştırmaların daha geniş agroekolojik zonları kapsayacak şekilde planlanması gerekmektedir. Özellikle aşırı iklim koşullarına sahip tarım alanlarında yürütölecek uzun vadeli ve çoklu lokasyonlu çalışmalar, yeşil gübrelemenin uyarlanabilirliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek açısından önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, çok ölçekli analiz yaklaşımlarının (tarla, havza ve bölgesel ölçek) benimsenmesi ve disiplinlerarası araştırma tasarımlarının geliştirilmesi, yeşil gübrenin toprak kalitesi üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı ve güvenilir biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır. Bu yaklaşım, hem bilimsel sağlamlığı artıracak hem de uygulamaya dönük karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine temel oluşturacaktır (Wang ve ark., 2025b).

4.2. Etki mekanizmalarının açıklanmasına yönelik bilgi eksiklikleri

Yeşil gübrelemenin toprak kalitesini artırma ve sürdürülebilir tarımsal kalkınmayı destekleme potansiyeli geniş ölçüde ilgi görmüş olmakla birlikte, bu etkilerin temel mekanizmalarına ilişkin araştırmalar yetersizdir. Yeşil gübrenin toprak iyileştirmedeki temel süreçleri ve içsel mekanizmalarına odaklanan mevcut çalışmalar çoğunlukla betimleyici düzeyde kalmakta ya da tekil mekanizmalara yoğunlaşmakta; çok boyutlu ve çok düzeyli etkileşimlerin derinlemesine analizini yeterince içermemektedir. Yeşil gübrelemenin toprak üzerindeki temel işlevi, ayrışma sürecinde toprağa kazandırdığı organik maddeye dayanır. Mevcut çalışmalar, yeşil gübre kalıntılarının ayrışmasının toprak yapısını iyileştirebildiğini ve toprak organik karbon depolanmasını artırabildiğini ortaya koymuş olsa da, bu sürecin altında yatan özgül mikrobiyal süreçler ve mekanizmalar tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Farklı yeşil gübre türlerinde bulunan organik madde bileşenlerinin ayrışma hızları, mikrobiyal bozunma sürecinde değişiklik göstermektedir. Ancak bu farklılıkların, besin elementi salınım dinamikleri ve karbon tutulum süreçleri üzerindeki etkileri henüz yeterli düzeyde nicel olarak ortaya konulmamıştır. Ayrıca, yeşil gübre biyokütlesinde yüksek oranda bulunan ikincil metabolitlerin toprak agregat oluşumu ve stabilizasyonuna nasıl ve ne ölçüde katkı sağladığı belirsizliğini sürdürmektedir. Yeşil gübrelemenin etkileri yalnızca organik madde girdisi ile sınırlı değildir; toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin eşzamanlı düzenlenmesi yoluyla ortaya çıkan sinerjik etkileri de kapsamaktadır. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük bir bölümü yeşil gübrelemenin besin elementi sağlanmasına katkısı gibi tekil etkilere odaklanmakta; birden fazla mekanizma arasındaki potansiyel sinerjik ilişkileri yeterince ele almamaktadır (Wang ve ark., 2025b).

4.3. Yaygınlaştırma ve uygulamada karşılaşılan zorluklar

Yeşil gübrelemenin yaygınlaştırılması ve uygulamaya aktarılması sürecinde çeşitli ekonomik, teknik ve kurumsal zorluklar bulunmaktadır. Kısa vadeli ekonomik getirilerin sınırlı olması, çiftçilerin yeşil gübre uygulamalarını benimsemesini kısıtlayan temel faktörlerden biridir. Doğrudan pazarlanabilir nakit ürünlerin yetiştirilmesine kıyasla, yeşil gübre üretimi genellikle anında ekonomik gelir sağlamamakta; bu durum çiftçilerin kısa vadede somut bir fayda algılamasını güçleştirmektedir. Ayrıca, yeşil gübre yetiştiriciliği belirli bir süre için araziye ana ürün üretiminden alıkoyabilmekte ve birincil ürünlerin ekim alanını azaltarak potansiyel ekonomik getiriye sınırlayabilmektedir. Teknik bilgi ve yönetim gereksinimleri de yaygın benimseme için önemli bir engel oluşturmaktadır. Yeşil gübre türlerinin seçimi, ekim ve toprağa karıştırma zamanlaması, yetiştirme yöntemleri ve ürün

rotasyonuna entegrasyonu; toprak özellikleri ve iklim koşulları dikkate alınarak planlanmalıdır. Ancak birçok üretici, bu uygulamaların etkin biçimde yürütülmesi için gerekli teknik bilgiye ve eğitime yeterince sahip değildir. Bu durum, uygulamaların hatalı planlanmasına veya beklenen faydanın elde edilememesine yol açabilir. Buna ek olarak, destekleyici politika araçlarının yetersizliği de önemli bir sınırlayıcı faktördür. Birçok gelişmekte olan ülke ve bölgede yeşil gübre yetiştiriciliğini teşvik etmeye yönelik tohum destekleri, teknik eğitim programları, yayım hizmetleri ve finansal destek mekanizmaları sınırlıdır. Bu koşullarda uygulamalar çoğunlukla bireysel çiftçilerin kendi inisiyatifleri ve deneme-yanılma yaklaşımlarına dayanmaktadır; bu durum ise büyük ölçekli ve sistematik benimsemeyi güçleştirmektedir. Dolayısıyla, yeşil gübrelemenin sürdürülebilir tarım arazisi yönetiminin ayrılmaz bir bileşeni olarak yaygınlaştırılabilmesi için ekonomik teşvik mekanizmalarının güçlendirilmesi, uygulama ve yönetim süreçlerinin sadeleştirilmesi ve teknik destek ile politika altyapısının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu unsurların btncl biçimde ele alınması, yeşil gübrelemenin geniş ölçekte benimsenmesini ve etkin biçimde uygulanmasını kolaylaştıracaktır (Wang ve ark., 2025b).

5. Yeşil Gübre Uygulamalarının Desteklenmesine Yönelik Politikalar ve Stratejiler

Yeşil gübrelemenin yaygın biçimde kullanımı, tarım arazilerinde toprak kalitesinin iyileştirilmesi ve sürdürülebilir tarımsal kalkınmanın desteklenmesi açısından stratejik öneme sahiptir. Bununla birlikte, yeşil gübrelemenin uygulamaya aktarılması; teknik, ekonomik ve bilişsel düzeylerde çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu nedenle yaygın ve kalıcı benimsemenin sağlanabilmesi için güçlü politika desteği ve çok paydaşlı toplumsal katılım gereklidir.

Politika teşviklerinin geliştirilmesi, yeşil gübre kullanımının yaygınlaştırılmasında belirleyici bir unsurdur. Merkezi ve yerel yönetimler; doğrudan sübvansiyonlar, vergi indirimleri, gelir desteği ve verim açığı telafisi gibi ekonomik araçlar aracılığıyla çiftçileri yeşil gübre yetiştirmeye ve kullanmaya teşvik edebilir. Bunun yanında, yeşil gübre teknolojilerinin araştırılması, demonstrasyon alanlarının oluşturulması ve pilot uygulamaların desteklenmesi için özel fon mekanizmalarının geliştirilmesi, bilimsel ve etkin yönetim uygulamalarının sahaya aktarılmasını kolaylaştıracaktır. Politika düzeyinde, yeşil gübre ekimi ve kullanımına yönelik ödül ve değerlendirme sistemlerinin oluşturulması; uygulamanın tarımsal yeşil kalkınma göstergeleri ve sürdürülebilirlik kriterleri içine entegre edilmesi, uzun vadede kurumsal güvence sağlayabilir. Bu tür mekanizmalar, uygulamaların sürekliliğini ve ölçülebilirliğini artıracaktır. Teknik eğitim ve farkındalık çalışmalarının güçlendirilmesi de

önemli bir gerekliliktir. Tarımsal yayım birimleri; eğitim programları, teknik seminerler ve yerinde uygulama etkinlikleri yoluyla çiftçilerin yeşil gübrelemenin toprak kalitesi ve üretim performansı üzerindeki etkilerini daha iyi anlamalarını sağlayabilir. Başarılı uygulama örneklerinin paylaşılması ve yeni medya araçlarının kullanılması, çiftçilerin bilgi düzeyini ve güvenini artırarak taban düzeyinde benimsenme oranlarını yükseltebilir. Yeşil gübrelemenin etkin biçimde yaygınlaştırılabilmesi için endüstri–akademi–araştırma işbirliğinin güçlendirilmesi de kritik öneme sahiptir. Tarımsal araştırma kuruluşları, üniversiteler ve özel sektör temsilcileri; farklı agroekolojik koşullara uyum sağlayabilen yeşil gübre çeşitlerinin geliştirilmesi ve bölgesel toprak–iklim özelliklerine uygun ekim planlarının oluşturulması konusunda ortak çalışmalar yürütmelidir. Bununla birlikte, yeşil gübre tohumları ve ilgili mekanizasyon ekipmanlarının yeterli ve erişilebilir biçimde temin edilmesi için tarımsal tedarik zincirinin politika araçlarıyla desteklenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, politika desteği ile çok paydaşlı işbirliğinin bütüncül biçimde hayata geçirilmesi, yeşil gübre uygulamalarının etkin biçimde yaygınlaştırılmasına olanak sağlayacak; tarımsal yeşil dönüşümün güçlendirilmesi ve gıda güvenliğinin desteklenmesi açısından önemli katkılar sunacaktır (Wang ve ark., 2025b).

6. Sonuçlar ve Gelecek Perspektifleri

Yeşil gübre uygulamaları, toprak organik madde içeriğini artırma, agregat stabilitesini geliştirme, besin döngüsünü düzenleme ve mikrobiyal aktiviteyi destekleme yoluyla tarım arazilerinde toprak kalitesinin iyileştirilmesine bütüncül katkı sağlamaktadır. Bu etkiler; verimliliğin sürdürülmesi, su ve besin kullanım etkinliğinin artırılması, kimyasal gübre girdilerinin azaltılması ve çevresel etkilerin sınırlandırılması açısından önemli bir işlevsel çerçeve sunmaktadır. Bununla birlikte, uygulama sonuçlarının bölgesel farklılık göstermesi, uzun dönemli ve mekanizmaya dayalı çalışmaların sınırlı olması ve üretici düzeyinde benimsenmenin istenen düzeye ulaşmaması, yeşil gübrenin potansiyelinin tam olarak değerlendirilmesini güçleştirmektedir.

Gelecek dönemde, farklı agroekolojik koşullara uyum sağlayabilen yeşil gübre çeşitlerinin geliştirilmesi, uzun süreli ve çok lokasyonlu saha araştırmalarının artırılması ve ayrışma–besin salınım senkronizasyonunun daha iyi modellenmesi öncelikli araştırma alanları olacaktır. Ayrıca hassas tarım teknolojileriyle entegrasyon, yönetim uygulamalarının optimize edilmesi ve ekonomik–kurumsal destek mekanizmalarının güçlendirilmesi, yeşil gübrenin sürdürülebilir üretim sistemlerine daha etkin biçimde entegre edilmesini sağlayacaktır.

Bu çerçevede yeşil gübre, toprak kalitesinin korunması ve geliştirilmesi ile çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi açısından geleceğin tarım sistemlerinde stratejik öneme sahip bir yönetim bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- Ai, C., Zhao, Y. Z., Zhang, L. Y., Zhang, M. L., Huang, S. Y., Wang, S. Y., & Zhou, W. (2024). Research progress on associative nitrogen fixation of gramineous crops. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 30, 1307–1321.
- Al-Shammery, A. A. G., Al-Shihmani, S. S., Fernández-Gálvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364, 121487.
- Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515, 505–511.
- Brtnicky, M., Kintl, A., Hammerschmiedt, T., Mustafa, A., Elbl, J., Kucerik, J., et al. (2021). Clover species specific influence on microbial abundance and associated enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils. *Agronomy*, 11, 2214.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., Deyn, G. D., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuypers, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125.
- Cao, W. D., Zhou, G. P., & Gao, S. J. (2024). Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 30, 1274–1283.
- Chang, D. N., Song, Y. R., Liang, H., Liu, R., Cai, C., Lv, S. L., Liao, Y. L., Nie, J., Duan, T. Y., & Cao, W. D. (2024b). Planting Chinese milk vetch with phosphate-solubilizing bacteria inoculation enhances phosphorus turnover by altering the structure of the phoD-harboring bacteria community. *European Journal of Soil Biology*, 123, 103678.
- Chang, F. D., Zhang, H. Y., Zhao, N., Zhao, P. Y., Song, J. S., Yu, R., Kan, Z. R., Wang, X. Q., Wang, J., Liu, H. J., et al. (2024a). Green manure removal with reduced nitrogen improves saline-alkali soil organic carbon storage in a wheat-green manure cropping system. *Science of the Total Environment*, 926, 171827.
- Chaudhry, H., Vasava, H. B., Chen, S., Saurette, D., Beri, A., Gillespie, A., & Biswas, A. (2024). Evaluating the soil quality index using three methods to assess soil fertility. *Sensors*, 24, 864.
- Davis, A. G., Huggins, D. R., & Reganold, J. P. (2023). Linking soil health and ecological resilience to achieve agricultural sustainability. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21, 131–139.

- De, P., Deb, S., Deb, D., Chakraborty, S., Santra, P., Dutta, P., Hoque, A., & Choudhury, A. (2022). Soil quality under different land uses in eastern India: Evaluation by using soil indicators and quality index. *PLoS ONE*, 17, e0275062.
- Dharmakeerthi, R. S., & Thenabadu, M. W. (2013). Urease activity in soils: A review. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 24, 159-195.
- Dong, M., Zhou, H., Wang, J., et al. (2024). Responses of soil microbial metabolism, function and soil quality to long-term addition of organic materials with different carbon sources. *Biochar*, 6, 80.
- Fan, Z. L., Chai, Q., Cao, W. D., Yu, A. Z., Zhao, C., Xie, J. H., Yin, W., & Hu, F. L. (2020). Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 1389–1402.
- Fang, C. Y., Li, P., Zhang, J. L., Lu, Y. H., Tang, Y. Y., Tu, N. M., Liao, Y. L., & Nie, J. (2024). Soil Cd bioavailability response characteristics to microbes in paddy fields with co-incorporation of milk vetch, rice straw and amendments. *Science of the Total Environment*, 935, 173306.
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15, 579–590.
- Gao, X., Shi, D., Lv, A., Wang, S., Yuan, S., Zhou, P., et al. (2016). Increase phosphorus availability from the use of alfalfa (*Medicago sativa* L.) green manure in rice (*Oryza sativa* L.) agroecosystem. *Scientific Reports*, 6, 36981.
- Giller, K. E. (2001). *Nitrogen fixation in tropical cropping systems* (2nd ed.). Wallingford, UK: CABI Publishing.
- Hu, Q. J., Thomas, B. W., Powlson, D., Hu, Y. X., Zhang, Y., Jun, X., Shi, X. J., & Zhang, Y. T. (2023). Soil organic carbon fractions in response to soil, environmental and agronomic factors under cover cropping systems: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 355, 108591.
- Jia, R., Zhou, J., Chu, J. C., Shahbaz, M., Yang, Y. D., Jones, D. L., Zang, H. D., Razavi, B. S., & Zeng, Z. H. (2022). Insights into the associations between soil quality and ecosystem multifunctionality driven by fertilization management: A case study from the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132265.
- Joimel, S., Schwartz, C., Hedde, M., Kiyota, S., Krogh, P. H., Nahmani, J., Peres, G., Vergnes, A., & Cortet, J. (2017). Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Science of the Total Environment*, 584–585, 614–621.

- Khan, M. I., Gwon, H. S., Alam, M. A., Song, H. J., & Kim, P. J. (2019). Short term effects of different green manure amendments on the composition of main microbial groups and microbial activity of a submerged rice cropping system. *Applied Soil Ecology*, 147, 103400.
- Kolesnikov, S. I., Kazeev, K. S., & Akimenko, Y. V. (2019). Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 544.
- Koudahe, K., Allen, S. C., & Djaman, K. (2022). Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research*, 10, 343–354.
- Lengwati, D. M., Mathews, C., & Dakora, F. D. (2020). Rotation benefits from N₂-fixing grain legumes to cereals: From increases in seed yield and quality to greater household cash-income by a following maize crop. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 94.
- Li, P., Jia, L., Chen, Q. Q., Zhang, H. J., Deng, J. J., Lu, J. Y., Xu, L., Li, H. X., Hu, F., & Jiao, J. G. (2024). Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of the Total Environment*, 908, 168170.
- Li, R., Hu, W. Y., Jia, Z. J., Liu, H. Q., Zhang, C., Huang, B., Zhao, Y. G., Zhao, Y. C., Shukla, M. K., et al. (2025). Soil degradation: A global threat to sustainable use of black soils. *Pedosphere*, 35, 264–279.
- Li, Z. Q., Wang, J. H., & Zhang, X. (2017). A review on the research of decomposition and nutrients release of green manure. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 240, 331–342.
- Lian, X. D., Zhang, L., Liu, S. R., Cai, Z. J., Zheng, L., Zhang, Q., Zhou, J. L., & Xu, M. G. (2023). Response of crop yield to soil pH and the influencing factors. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 29, 1618–1629.
- Liu, Q., Yao, W., Zhou, J., Peixoto, L., Qi, Z. Q., Mganga, K. Z., Yang, Y. D., Zeng, Z. H., & Zang, H. D. (2025). Winter green manure cultivation benefits soil quality and ecosystem multifunctionality under upland paddy rotations in tropics. *Plant and Soil*, 504, 395–407.
- Liu, R., Zhou, G. P., Chang, D. N., Gao, S. J., Han, M., Zhang, J. D., Sun, X. F., & Cao, W. D. (2022). Transfer characteristics of nitrogen fixed by leguminous green manure crops when intercropped with maize in northwestern China. *Journal of Integrative Agriculture*, 21, 1177–1187.

- Liu, Y., Wang, P. X., Yu, T. B., Zang, H. D., Zeng, Z. H., & Yang, Y. D. (2024). Manure replacement of chemical fertilizers can improve soil quality in the wheat-maize system. *Applied Soil Ecology*, 200, 105453.
- Lyu, H. Q., Li, Y., Wang, Y. L., Wang, F., Fan, Z. L., Hu, F. L., Yin, W., Zhao, C., Yu, A. Z., & Chai, Q. (2024). No-tillage with total green manure mulching: A strategy to lower N₂O emissions. *Field Crops Research*, 306, 109238.
- Lyu, H. Q., Yu, A. Z., Chai, Q., Wang, F., Wang, Y. L., Wang, P. F., Shang, Y. P., & Yang, X. H. (2025). Enhancing soil quality and crop yield by increasing dominant bacterial abundance and reducing bacterial diversity under no-tillage with total green manure incorporation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 378, 109303.
- Maurya, S., Abraham, J. S., Somasundaram, S., Toteja, R., Gupta, R., & Makhija, S. (2020). Indicators for assessment of soil quality: A mini-review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 604.
- Meena, B. P., Fagodiya, R. K., Prajapat, K., Dotaniya, M., Kaledhonkar, M., Sharma, P., et al. (2018). Legume green manuring: An option for soil sustainability. In R. Meena, A. Das, G. Yadav, & R. Lal (Eds.), *Legumes for soil health and sustainable management* (pp. 387–408). Singapore: Springer.
- Nazir, M. J., Li, G. L., Nazir, M. M., Zulfikar, F., Siddique, K. H. M., Iqbal, B., & Du, D. L. (2024). Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. *Soil and Tillage Research*, 237, 105959.
- Pausch, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global Change Biology*, 24, 1–12.
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W. R., Keiluweit, M., Lawrence, C. R., Berhe, A. A., Blankinship, J. C., Crow, S. E., Druhan, J. L., Pries, C. E. H., et al. (2018). Beyond clay: Towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry*, 137, 297–306.
- Ren, H. L., Lv, H. S., Xu, Q., Yao, Z. Y., Yao, P. W., Zhao, N., Wang, Z. H., Huang, D. L., Cao, W. D., Gao, Y. J., et al. (2024). Green manure provides growth benefits for soil mesofauna by promoting soil fertility in agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 238, 106006.
- Saleem, M., Pervaiz, Z., Contreras, J., Lindenberger, J., Hupp, B., Chen, D., et al. (2020). Cover crop diversity improves multiple soil properties via altering root architectural traits. *Rhizosphere*, 16, 100248.

- Schiefer, J., Lair, G. J., & Blum, W. E. H. (2016). Potential and limits of land and soil for sustainable intensification of European agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 283–293.
- Si, A., Xiao, Y. X., Chen, J., Du, M. L., Hu, J. X., Zou, X. C., Wan, R. P., Jiang, M. Z., Li, Z., Zhou, S. X., et al. (2024). Effects of nitrogen addition on soil aggregate stability and nutrient contents in an evergreen broad-leaved forest in the Rainy Area of Western China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 30, 879–885.
- Sinsabaugh, R. L., Lauber, C. L., Weintraub, M. N., Ahmed, B., & Zeglin, L. H. (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*, 11, 1252–1264.
- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., & Pisante, M. (2017). Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: An overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4, 1–13.
- Stott, D. E., Andrews, S. S., Liebig, M. A., Wienhold, B. J., & Karlen, D. L. (2010). Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal*, 74, 107–119.
- Vasconcelos, M. W., Grusak, M. A., Pinto, E., Gomes, A., Ferreira, H., Balázs, B., et al. (2020). The biology of legumes and their agronomic, economic, and social impact. In M. Hasanuzzaman, K. Araújo, & T. Gill (Eds.), *The plant family Fabaceae* (pp. 3–25). Singapore: Springer.
- Wang, F., Wang, Y. L., Lyu, H. Q., Fan, Z. L., Hu, F. L., He, W., Yin, W., Zhao, C., Chai, Q., & Yu, A. Z. (2024a). No-tillage mulch with leguminous green manure retention reduces soil evaporation and increases yield and water productivity of maize. *Agricultural Water Management*, 290, 108573.
- Wang, G. C., Hu, F. L., Li, H. T., Yin, F. Z. L., Fan, H., Chai, Q., & Cao, W. D. (2024c). Research advances on the effect and mechanism of green manure on improving soil carbon sequestration in cropland. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 30, 1185–1198.
- Wang, P., Yu, A., Wang, F., Shang, Y., Wang, Y., Yin, B., et al. (2025a). Mechanistic insights into farmland soil carbon sequestration: A review of substituting green manure for nitrogen fertilizer. *Agronomy*, 15, 1042.
- Wang, P. F., Yu, A. Z., Li, Y., Wang, Y. L., Lyu, H. Q., Wang, F., Shang, Y. P., Yang, X. H., & Chai, Q. (2024b). Reducing nitrogen application by 20% under the condition of multiple cropping using green manure after wheat harvesting can mitigate carbon

- emission without sacrificing maize yield in arid areas. *Field Crops Research*, 306, 109232.
- Wang, Y., Yu, A., Shang, Y., Wang, P., Wang, F., Yin, B., Liu, Y., Zhang, D., & Chai, Q. (2025b). Research progress on the improvement of farmland soil quality by green manure. *Agriculture*, 15, 768.
- Winding, A., Hund-Rinke, K., & Rutgers, M. (2005). The use of microorganisms in ecological soil classification and assessment concepts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 62, 230–248.
- Xing, J., Li, X. Y., Li, Z. Q., Wang, X. T., Hou, N., & Li, D. P. (2024). Remediation of soda-saline-alkali soil through soil amendments: Microbially mediated carbon and nitrogen cycles and remediation mechanisms. *Science of the Total Environment*, 924, 171641.
- Xu, Q., Yao, Z. Y., Chen, Y. P., Liu, N., Teng, Z. R., Huang, D. L., Cao, W. D., Kuzyakov, Y., Shah, T., Zhao, N., et al. (2024). Priming and balance of soil organic carbon differ with additive C ratios and long-term green manuring. *Applied Soil Ecology*, 201, 105495.
- Xu, Y., Hou, Q., Xiang, J., Gao, M., Shao, P., Chen, S., Fu, Z., Long, P., & Huang, C. (2025). Evaluation of soil quality and system sustainability in ratoon rice paddy field under green manure application in central China. *Field Crops Research*, 333, 110087.
- Xu, Y., Zhan, M., Cao, C. G., Ge, J. Z., Ye, R. Z., Tian, S. Y., & Cai, M. L. (2017). Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools. *Plant and Soil*, 421, 337–351.
- Xue, R., Wang, C., Zhao, L., Sun, B. R., & Wang, B. L. (2022). Agricultural intensification weakens the soil health index and stability of microbial networks. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 339, 108118.
- Yang, L., Luo, Y., Lu, B. L., Zhou, G. P., Chang, D. N., Gao, S. J., Zhang, J. D., Che, Z. X., & Cao, W. D. (2023a). Long-term maize and pea intercropping improved subsoil carbon storage while reduced greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108444.
- Yang, Y., Zhang, Y. G., Yu, X. X., & Jia, G. D. (2023b). Soil microorganism regulated aggregate stability and rill erosion resistance under different land uses. *Catena*, 228, 107176.
- Yao, Z. Y., Xu, Q., Chen, Y. P., Liu, N., Li, Y. Y., Zhang, S. Q., Cao, W. D., Zhai, B. N., Wang, Z. H., Zhang, D. B., et al. (2021). Leguminous green manure enhances the soil

- organic nitrogen pool of cropland via disproportionate increase of nitrogen in particulate organic matter fractions. *Catena*, 207, 105574.
- Zhang, C. Z., Xue, W. F., Xue, J. R., Zhang, J., Qiu, L. J., Chen, X. Y., Hu, F., Kardol, P., & Liu, M. Q. (2022). Leveraging functional traits of cover crops to coordinate crop productivity and soil health. *Journal of Applied Ecology*, 59, 2627–2641.
- Zhang, T. Y., Yang, F., Wang, Z. C., Shao, X. W., Zhou, J., Miao, Y., Nie, Z. Y., Zhang, L., Ma, L., Guo, L. Y., et al. (2024). Effects of planting and overturning green manure crops on improvement of saline-sodic soils. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 42, 225–233.
- Zhang, Z. H., Nie, J., Liang, H., Wei, C. L., Wang, Y., Liao, Y. L., Lu, Y. H., Zhou, G. P., Gao, S. J., & Cao, W. D. (2023). The effects of co-utilizing green manure and rice straw on soil aggregates and soil carbon stability in a paddy soil in South China. *Journal of Integrative Agriculture*, 22, 1529–1545.
- Zhao, N., Wang, X. Q., Ma, J., Li, X. H., Cao, J. F., Zhou, J., Wu, L. M., Zhao, P. Y., & Cao, W. D. (2024). Co-incorporating green manure and crop straw increases crop productivity and improves soil quality with low greenhouse-gas emissions in a crop rotation. *The Crop Journal*, 12, 1233–1241.
- Zheng, W., Gong, Q., Zhao, Z., Liu, J., Zhai, B., Wang, Z., et al. (2018). Changes in the soil bacterial community structure and enzyme activities after intercrop mulch with cover crop for eight years in an orchard. *European Journal of Soil Biology*, 86, 34–41.
- Zhou, G. P., Fan, K. K., Li, G. L., Gao, S. J., Chang, D. N., Liang, T., Li, S., Liang, H., Zhang, J. D., Che, Z. X., et al. (2023). Synergistic effects of diazotrophs and arbuscular mycorrhizal fungi on soil biological nitrogen fixation after three decades of fertilization. *iMeta*, 2, e81.

BÖLÜM 2

NANOGÜBRELERİN TOPRAK MİKROORGANİZMALARINA ETKİLERİ

*Lale YAZICI SUNGURTEKİN¹, Meral ÖDEMİŞ²,
Çiğdem KÜÇÜK³*

¹ Harran Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye, E-mail:laleyazici4@gmail.com Orcid No:0009-0000-8287-4972

² Dr Öğrenci Harran Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye, E-mail:meralodemis53@gmail.com Orcid No:0000-0001-8750-8154

³ Prof.Dr. Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye E-mail: ckucuk@harran.edu.tr Orcid No: 0000-0001-5688-5440

Harran Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şanlıurfa

1.GİRİŞ

Gıda güvenliği, insan nüfusunun hızlı artışı ve iklim krizinin etkisiyle günümüzde küresel bir problem haline gelmiştir. Artan nüfusu desteklemek için ürün verimliliğini arttırmanın geleneksel yolu, çoğunlukla tarımda kimyasal gübrelerin (sentetik, inorganik veya mineral gübreler) ve pestisitlerin toprağa uygulanmasıdır. Bu gübrelerin bilinçsiz bir şekilde ve fazla miktarda kullanımı ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Seleiman ve ark., 2021; Adnan ve ark., 2020). Optimum ürün verimliliğini sağlamak için kullanılan tarım ürünleri kimyasal gübrelerdir (Guo ve ark., 2018). Bu gübrelerin aşırı kullanımı, toprağın kimyasal yapısını değiştirmekte ve topraktaki mikrobiyal canlıların çeşitliliğini ve miktarını da etkilemektedir. Kimyasal gübrelerin aşırı uygulanmalarının, topraktaki bakteri ve fungi türlerinin metabolik aktivitelerini olumsuz etkileyebildiği açıklanmıştır (Seleiman ve ark., 2021). Pestisitler ise, hedefinde olmayan mikroorganizmaları ve toprak biyotasının yaşamsal süreçlerini engelleyebilir, bu da toprağın kimyasal ve biyolojik verimliliğinde azalmaya sebep olabilmektedir (Kalwani ve ark., 2022).

Hassas tarım için uygun tekniklerin ve sensörlerin tanımlanması, patojenlerin ve gıda ürünlerindeki kirleticilerin erken tespiti, gübreler ve pestisitler gibi tarımsal kimyasalların etkili dağıtım sistemleri gibi birçok alanda nanoteknolojinin kullanıldığı bildirilmiştir (Sheoran ve ark., 2021). Nano gübreler, bitkilerde biyotik ve abiyotik stres koşullarına karşı koruma kalkanı oluşturduğundan besin kullanım verimliliğini arttırdığı belirtilmiştir (Gupta ve Prakash, 2020). Bu gübrelerin biyolojik kaynak kullanımını arttıran çevre dostu gübreler olduğu açıklanmıştır (Preetha and Balakrishnan, 2017). Karbon alımını iyileştirdikleri gibi toprak agregasyonunu artırdıkları, besinlerin yavaş ve hedefe yönelik etkili bir şekilde salınmasını sağlamak amacıyla tasarlandığı bildirilmiştir (Gupta ve Prakash, 2020). Bu bölümde Nanogübrelerin kullanımlarının avantaj ve dezavantajları, topraktaki mikroorganizmalar üzerine etkileri ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

2. Nanogübrelerin avantaj ve dezavantajları

Nanogübreler, nesillerin artan gıda talebini karşılamak için umut vadetmektedirler (Shukla ve ark., 2019). İstenilen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip nanoparçacıklar sentezlenebilmiştir (Abdel-Aziz ve ark., 2018). Genellikle bakır, manganez ve demir gibi mikro besinler Nanogübre araştırmalarının odak noktasını oluşturmuştur. Ayrıca, karbon nanotüpler, gümüş (Ag), titanyum dioksit (TiO₂), seryum oksit (CeO₂), alüminyum (Al) gibi tarımda gübre olarak kullanılan nanomalzemeler de bitki büyümesi üzerinde olumlu etkiler göstermiştir (Dimpka ve Bindrabab, 2017).

Nanogübrelerin besin maddelerini kontrollü bir şekilde bırakması önemli özelliklerinden biridir. Bu durum, besin maddelerinin yetersizliğini önemli ölçüde engelleyebilmiştir (Abdel-Aziz ve ark., 2018). Örnek olarak; zeolitler veya kitosan bazlı nanomalzemeler, azotun kontrollü salınımını sağlayarak bitkiler tarafından daha iyi absorbe edilmesini sağlamıştır (Chhowalla, 2017). Hidroksiapatit:üre (1:6) nano-hibritleri, saf üre gübresine göre ürenin yaklaşık 12 kat daha yavaş salınımını sağlamıştır. Bunun dışında nanogübrelerle yapılan çalışmalarda, geleneksel yöntemlerde kullanılan miktardan %50 daha az azotla eş değer

verimlerin elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Grafen oksit nanomalzemeleri ise azotun uzun süreli salınımını sağlayarak besin maddelerinin kaybolmasını önlemiştir (Kumar ve ark., 2020).

Nano gübreler ve nano kompozitler, gübre granüllerinden besinlerin salınımını kontrol etmek, besinlerin kullanım verimliliğini artırmak, besin kaybını önlemek ve istenilen miktarda besin alınmasını sağlamada etkili bulunmuştur (Dimpka ve ark., 2015). Nano-gözenekli zeolit, tarımda yavaş salınımlı bir gübre olarak kullanılmakta; üre, potasyum sülfat ve kalsiyum hidroksiapatit gibi bileşiklerle birlikte uzun vadede besin elde edilmesini sağladığı bildirilmiştir (Seleiman ve ark., 2021). Nano gübre formülasyonlarının, sera koşullarında bitkilerin besin kullanım verimliliğini artırma potansiyelinin olduğu açıklanmıştır (Iqbal, 2019). Ancak bu formülasyonlar, yetiştirilecek ürünlerin, fungal ve bakteriyel hastalıklara karşı korusa da, bitkinin beslenmesinde etkili olan mikorizal gruplar veya azot fikse eden bakteriler gibi hedefinde olmayan mikroorganizmaları olumsuz etkileyebilmiştir (Rajput ve ark., 2018).

3. Bitki büyümesi üzerine nanogübrelerin etkisi

Nanogübrelerin bitkilerin üzerindeki etkileri; kullanılan nanomalzemenin özellikleri, toprak yapısı, çevrenin etkisi, nanoparçacıkların iletim şekli ve bitkinin türü gibi faktörlere bağlı olduğu bildirilmiştir (Mahil ve ark., 2019). Yapraklardan giriş yapan nanogübreleri bitkiye daha çok fayda vermektedir. Nanomalzemeler, kök tüycükleriyle simplastik ve apoplastik hareketlerle ksilem ve gövdeye ulaşılabilirdiği, ancak, nanoparçacıkların ana kök yüzeylerinde toplanarak, su taşınmasının engellenmesi gibi olumsuz etkilerinin olduğu açıklanmıştır (Martinez-Fernandez ve ark., 2016).

Her nanogübrenin, büyüme ve verim üzerinde farklı etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Şelatlı ve basit azot nanogübreleri, *Solanum tuberosum* (patates) verimini artırmıştır (Al-juthery ve Shami, 2019). NPK; nanogübreleri, *Coffea arabica* (kahve) bitkisinin klorofil ve net fotosentez miktarında iyileştirme yapmıştır. Fosforlu nanogübre, *Glycine max* (soya fasulyesi) bitkisinde fosforun 40-50 gün boyunca kontrollü salınımını sağlamış, besin özelliklerinin kullanım alanını artırmıştır (Liu ve Lal, 2014). Potasyumlu nanogübreler, yaprak uygulaması ile *Cucurbita pepo* (kabak) bitkisinin büyümesine olumlu katkı yapmıştır (Gardini, 2016). Makro besin elementlerine dayalı nanogübrelerin yanı sıra, mikro besin elementlerini içeren nanogübreler de bitkiler için önemli yarar sağlamıştır. Örneğin; oksit nanoparçacıkları yerfıstığı tohumlarının (*Arachis Hypogaea*) çimlenmesini iyileştirmiş, gümüş nanoparçacıkları çeltik (*Oryza sativa*) tohumlarının çimlenmesini hızlandırmıştır (Nagesh ve ark., 2019).

Nanoparçacık uygulaması, bitkide hem büyümeyi teşvik etmiş, hem de stres koşullarına karşı dirençliliklerini artırmıştır (Kalwani ve ark., 2022). Nanomalzemeler, bitkilerde strese bağlı olarak oluşan reaktif oksijen türlerini (ROS) etkisiz hale getirebilmiştir. Örneğin; poliakrilik asit nanoseriyası *Arabidopsis thaliana* bitkisinde fotosentez miktarını artırmış, silisyum dioksit (SiO₂), oksit (ZnO) ve grafen gibi nanomalzemeler şeker kamışında (*Saccharum officinarum*) soğuk strese karşı koruyucu etki göstermiştir (Palmqvist ve ark., 2017). Bitkilerin biyotik streslere karşı direncini de artırabilmişlerdir. Örneğin; *Alternaria brassicicola*'nın *Arabidopsis thaliana* bitkisinde siyah leke hastalığına sebep olurken, gümüş nanoparçacıklarının uygulanması ile %70–80 oranında bu riskin azaldığı incelenmiştir (Kumari

ve ark., 2020).

4.Nanogübrelerin bitki gelişimini destekleyen toprak mikroorganizmalarına etkileri

Toprak pH'ı, iyonik güç, organik madde ve fosfat konsantrasyonu gibi faktörlerin, nanopartiküllerin kimyasal özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Dimpka, 2018). Düşük pH, çözünmeyi arttırarak zararlı reaktif oksijen türlerinin oluşumuna yol açabilmektedir. Nanopartiküllerin doğal organik madde ile etkileşimi sonucunda toprakta stabil hale gelmesi, yüzey kimyasını değiştirerek mikroorganizmalar ve bitkiler üzerinde etkili olmuştur (Parada ve ark., 2019). Rajput ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, nanogübrelemenin toprakların besin maddesi konsantrasyonunu arttırdığı, toprak ekolojik ortamını iyileştirdiği ve topraktaki mikrobiyal popülasyonu arttırdığı tespit edilmiştir.

Nanogübre, yavaş salınım sürecinde büyük miktarda hümik asit üretmektedir. Hümik asit, toprak verimliliğinin temel bileşeni olup, toprak mikroorganizmaları için karbon ve azot kaynağı oluşturduğundan toprakta mikroorganizmaların miktar ve çeşitliliği arttırmıştır (VandeVoort ve Arai, 2019).

Yavaş salınımlı nanogübre kullanımı, toprak besin içeriğini, enzim aktivitesini ve mikrobiyal popülasyonu artırırken, besin kaybını azaltarak toprak ekolojik ortamını iyileştirmiştir (Rajput ve ark., 2018).Yapılan bir araştırmada, organik nano-NPK formülasyonlarının toprak ve yapraktan uygulanmasının mikrobiyal popülasyon üzerindeki etkileri ve bu mikroorganizmaların enzimatik aktivitelerindeki (dehidrogenaz, asit fosfataz, alkali fosfataz ve üreaz) rolü incelenmiştir. Nano NPK uygulaması topraktan ve yapraktan uygulandığında; bakteri sayısında %0.4 oranında dehidrogenaz, üreaz ve asit fosfataz aktivitelerinde artış olduğu incelenmiştir (Nibin ve ark., 2019). Gümüş partiküllerinin 550 mg/kg konsantrasyonunun gümüş nanopartiküllerinin mikroorganizmalar üzerinde herhangi bir toksik etki göstermediğini, aksine *Bradyrhizobium*, *Nitrospira* ve *Nitrosovibrio* gibi azot fiksasyonunda rol oynayan bakterilerin popülasyonunu artırarak tür zenginliği üzerinde olumlu bir etki gösterdiğini tespit etmişlerdir (Shah ve ark., 2014). Yeşil biber bitkisi üzerine yapılan bir çalışmada, yavaş salınımlı nanogübre uygulamasının toprak enzim aktivitesini ve mikrobiyal popülasyonunu önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir (Kalwani ve ark., 2022).

Nanopartiküllerin türü ve konsantrasyonu nanogübrelerin veya diğer nanopartiküllerin toprak biyolojik özellikleri üzerinde büyük ölçüde etkisi bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, 1–100 mg/kg konsantrasyonundaki titanyum oksit nanopartiküllerinin toprak mikrobiyal topluluğu için toksik olmadığı, ancak benzer konsantrasyonlardaki bakır oksit, çinko oksit ve gümüş nanopartiküllerinin toksik olduğu tespit edilmiştir (Asadishad ve ark., 2018). Shah ve ark. (2014), dört farklı nanomalzemenin (gümüş, titanyum oksit, çinko oksit ve bakır oksit) toprak mikrobiyal topluluğunun yapısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma sonunda, çinko oksit ve bakır oksidin mikrobiyal topluluk yapısını önemli ölçüde değiştirmediklerini, ancak gümüş nanomalzemelerin mikrobiyal toplulukta değişikliklere yol açtığı saptanmıştır (Shah ve ark., 2014).

Titanyum dioksit (TiO₂) nanopartiküllerinin yüksek konsantrasyonlarda yonca ile nodül bakterileri arasındaki simbiyozu engellediği ve yonca büyümesi üzerinde olumsuz etkilere yol açtığı gözlemlenmiştir (Morales-Díaz ve ark., 2017). Ancak, doğal toprak koşullarında

nanopartiküllerin hareketliliğinin yavaş olduğu ve bitkiler tarafından titanyum dioksit alımında bir artış olmadığı saptanmıştır (Nibin ve ark., 2019). Nanogübre ile muamele edilen toprakta, dehidrogenaz enzim aktivitesinin %37.4 ve katalaz enzim aktivitesinin %21.3 oranında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, toprak bakterilerinde %50, aktinomisetlerde %72 ve fungide %208’lik bir artış kaydedilmiştir (Nibin ve ark., 2019). Xu ve ark. (2015) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, TiO₂ ve CuO nanoparçacıkları, çeltik toprağında mikrobiyal biyokütleyi ve enzimatik aktiviteleri azaltmış ve mikrobiyal topluluk yapıları üzerinde olumsuz etkilere neden olmuştur.

Aynı konsantrasyonda uygulanan gümüş nanomalzemeler, *Acidobacteria*’nın topraktaki sayısını %14’ten %6.5’e, *Verrucomicrobia*’nın sayısını %7.4’ten %1.2’ye ve *Planctomycetes*’in bolluğunu %2.3’ten %1.3’e düşürmüştür (McGee ve ark., 2017). Gümüş nanopartikülleri *Bacteroidetes*’i %0.4’ten %1.8’e, *Proteobacteria* çeşitliliğini ise %16.8’den %37.9’a yükseltmiştir (McGee ve ark., 2017). Bu bulgular, nanopartiküllerin mikrobiyal toplulukların yapısını önemli ölçüde değiştirebileceğini ve belirli bakteri gruplarının gelişimini teşvik ederken diğerlerini baskılayabileceğini göstermektedir (McGee ve ark., 2017). Yüksek konsantrasyonlarda (10–100 mg/kg toprak) gümüş nanopartikülleri (AgNP) *Acidobacteria* türleri üzerinde olumsuz etkilemiş, daha düşük konsantrasyonlarda ise (0.01 mg/kg) bu bakterilerin gelişimini teşvik etmiştir (Grün ve Emmerling, 2018). *Acidobacteria*’nın düşük konsantrasyonlardaki AgNP’lere karşı tolerans göstermesi, gümüş tolerans genlerinin ekspresyonuna, hücre dışı polisakkarit üretimine, güçlü metal iyon taşıyıcılarının varlığına bağlanmıştır (Yang ve ark., 2014). Benzer şekilde, *Bacteroidetes* türlerinin de gümüş direnç genlerine sahip olduğu ve bu özelliklerinin AgNP’ye tolerans geliştirerek büyümenin teşvik edilmesine katkıda bulunduğu bildirilmiştir (Yang ve ark., 2014). Ayrıca, gümüş duyarlı mikroorganizmaların ölmesi karbon kaynağı açısından zengin bir ortam oluşturduğundan *Bacteroidetes*’in besin ihtiyacını karşılayarak popülasyonlarının artırmıştır (Grün ve ark., 2019). Gümüş nanopartikülleri 1–100 mg/kg aralığında uygulandığında; azot bağlayan bakteriler ve amonyum oksitleyiciler üzerinde herhangi bir olumsuz etki gözlemlenmemiştir (Grün ve ark., 2018). Demir (III)-Gümüş nanomalzemesi (1 mg/g) uygulandığında, *Verrucomicrobia* ve *Chloroflexi* miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Araştırmacılar bu durumu bakterilerin dış zarlarının bulunmasından dolayı gümüşe karşı yüksek derecede duyarlı olmalarına bağlamışlardır (Li ve ark., 2020). Ancak, Fe(III)-AgNP’lere (10 mg/g) maruz kalındığında, gümüşün biyoyararlanabilirliğinin azalması ve demirin biyoyararlanabilirliğinin artması nedeniyle toksisitenin azaldığı gözlemlenmiştir (Li ve ark., 2020). Aynı konsantrasyondaki Fe(III)-AgNP’ler altında *Nitrosomonadaceae* ve *Nitrospiraceae* popülasyonlarını azaltmıştır (Li ve ark., 2020). Yapılan bir çalışmada; 50 mg/kg konsantrasyonunda uygulanan gümüş nanopartikülleri, *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Cyanobacteria* ve *Nitrospirae* popülasyonlarını azalttığı, buna karşın *Proteobacteria* ve *Planctomycetes* popülasyonlarını artırmıştır (Wang ve ark., 2017). *Proteobacteria* türlerinin bolluğundaki artış, gümüş tolerans genlerinin varlığı, güçlü metal direnç mekanizmaları aracılığıyla stabil biyofilm geliştirme yetenekleri ile ilişkilendirilmiştir (Alizadeh ve ark., 2019). Ayrıca, 1 mg/l’nin üzerindeki konsantrasyonlarda siyanobakteri popülasyonunun azalması, hem vejetatif hem de heterosist hücrelerinde zarf yapısının zarar görmesi sonucunda azot fiksasyonunun azalmasına neden olmuştur (Huang ve ark., 2020). Bazı nanomalzemeler, özellikle karbon nanotüpler, toksik maddelerin zararlı etkilerini maskeleyerek mikrobiyal

işlevleri iyileştirebilmiştir. Örneğin, çok katmanlı karbon nanotüpler (MWCNT), poli-aromatik hidrokarbonların (PAH) adsorpsiyonu için ek yüzey alanı sağlayarak, PAH'lara duyarlı gram-pozitif bakterilerin popülasyonunu artırabilmiştir (Shrestha ve ark., 2015). Nanogübrelerin etkili olma süreleri de mikrobiyal topluluğun şekillenmesinde önemli bir rol oynayabilmiştir. Nanogübrelere daha uzun süreli maruz kalma, toprak mikrobiyal popülasyon yapısını önemli ölçüde değiştirebilmiştir. Mishra ve ark. (2020), gümüş nanomalzemelerinin bakteri toplulukları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, organik madde ayrışması, azot döngüsü, polisakkaritlerin bozunumu, bitki büyümesinin teşviki ve savunma mekanizmaları gibi ekosistem işlevlerinde rol oynayan *α-proteobacteria*, *β-proteobacteria*, *Bacteroidetes* ve *Actinobacteria* gruplarına ağırlık verilmiştir. Gümüş nanopartiküllerine maruz kalma sürecinde, 30. güne kadar bakteriyel bollukta herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiş, bu sürenin ardından *α-proteobacteria* popülasyonunda azalma, buna karşın *β-proteobacteria* popülasyonunda artış tespit edilmiştir. Ayrıca *Actinobacteria*'nın bolluğunda da nanomalzemelere maruz kalmanın 30. gününe kadar azaldığı gözlemlenmiştir (Mishra ve ark., 2020).

Cu nanopartikülleri toprağa güçlü bir şekilde bağlanmış, 1-100 mg/l konsantrasyon aralığında nitrifikasyon kinetiği üzerinde olumsuz etkiler göstermiştir (Simonin ve ark., 2018). Bu negatif etkinin Cu^{2+} iyonlarının çözünmesi ve reaktif oksijen türleri (ROS) üretimi ile ilişkili olabileceği belirtilmiştir (Simonin ve ark., 2018). Toprak nitrifikasyonunda yararlı $Cu^{2+}(aq)$ konsantrasyon aralığının oldukça dar olduğu saptanmıştır. Bu sonuçlar, bakır içeren nano-gübrelerin tarım topraklarındaki mikroorganizmalara olan iz metal toksisitesi açısından daha dikkatli değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir (VandeVoort & Arai, 2019). Kocide 3000 adlı $Cu(OH)_2$ (bakır(II) hidroksit) nano-pestisitinin bir yıl boyunca mera ekosistemine olan etkilerini araştırılmıştır (Simonin ve ark., 2018). Kocide uygulamalarının, ot verimi, bitki mineral besin içeriği, bitkiyle ilişkili hedef dışı mikroorganizmalar ve altı farklı toprak enzim aktivitesi üzerindeki etkileri izlenmiştir. Üç ardışık Kocide uygulamasının, ot biyokütlesi, kök mikorizal kolonizasyonu veya toprakta azot fiksasyon oranları üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, düşük ve yüksek gübreleme uygulamalarında, ikinci Kocide maruziyetinden sonra toprak üstü bitki biyokütlesinde anlamlı bir artış gözlemlenmiştir (Simonin ve ark., 2018). Concha-Guerrero ve ark. (2014), CuO nanoparçacıklarının yerel toprak bakterileri için oldukça toksik olduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar, toprak bakterilerinin hücrelerinde boşluk oluşumu, membran dejenerasyonu ve lizis gibi yapısal bozulmalar tespit edilmiştir. Simonin ve ark. (2018) tarafından yürütülen çalışmada, $Cu(OH)_2$ (bakır(II) hidroksit) bazlı nano-pestisitinin toprak mikrobiyal enzim aktiviteleri üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkileri incelenmiştir. Yüksek gübreleme yapılan konvansiyonel tarım sistemlerinde Kocide kullanımının yem bitkisi üretimi ve bitki-mikroorganizma etkileşimleri üzerinde belirgin bir olumsuz etki yaratmadığı incelenmiştir. Buna karşılık, düşük girdili organik tarım sistemlerinde Kocide kullanımının, özellikle karbon ve fosfor döngüsünde rol oynayan mikrobiyal süreçler üzerinde istenmeyen olumsuz etkiler oluşturabileceği belirlenmiştir. Pradhan ve ark. (2011), CuO ve Ag nanoparçacıklarının, yaprakta mikrobiyal ayrışması üzerindeki etkisini araştırmış ve bu nanoparçacıklara maruz kalmanın yaprak ayrışma hızını azalttığını rapor etmiştir.

Jiling ve ark. (2016) tarafından yapılan araştırmalarda, yüksek konsantrasyondaki Fe_3O_4 (demir(II,III) oksit) nanoparçacıklarının topraktaki bakteri içeriğini önemli ölçüde azalttığı

incelenmiştir. Buna karşılık, biyolojik ve kimyasal yöntemlerle sentezlenen ZnO nanoparçacıklarının klinik izolatlar (*Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhi* ve *Staphylococcus aureus*) üzerinde antibakteriyel aktivite gösterdiği rapor edilmiştir (Lakshmi ve ark., 2012). Toprağa doğrudan uygulanan bakır oksit nanopartikülünün 10–1000 mg/kg uygulama dozlarının pıkan cevizi ağaçlarının fotosentez hızının arttığı buna karşın nitrifikasyon ve denitrifikasyonda azalma belirlenmiştir (Salas-Leiva ve ark., 2021). Titanyum Dioksitnanopartikülünün 1–1000 mg/kg, toprağa doğrudan uygulaması ile Aktinobakteri ve Planctomycetes sayısında artış, buğdayın sürgün, kök ağırlığı ile klorofil içeriğinin arttığı tespit edilmiştir (Moll ve ark., 2017). Çinko oksitin yapraktan 0.3–0.9 g/l dozlarında spreyleme şeklinde uygulanması ile soya fasulyesinde azot fiksasyonunun arttığı, köklerde *Bradyrhizobium japonicum*, *Pseudomonas putida*, *Azospirillum lipoferum* çeşitliliğinde artış belirlenmiş, uygulama bitki boyu, nodülasyon, tane verimi ve tane ağırlığını artırmıştır (Sharifi ve Khoramdel, 2016).

Nanogübrelerin topraktaki azot ve karbon döngüleri üzerinde olumlu etkiler yarattığı bildirilmiştir (Mgadi ve ark., 2024). Nanogübrelerin toprak mikrobiyal topluluğu üzerindeki etkisinin, toprak türüne ve fizikokimyasal özelliklerine bağlı olduğu açıklanmıştır. Nanogübre, toprak pH'na bağlı olarak mikroorganizmaları farklı şekillerde etkilemektedir. Düşük pH koşullarında, çinko oksit nanopartikülleri daha hızlı bir şekilde iyonik türlere dönüşürken, yüksek pH seviyelerinde nanopartikülleri aglomerasyon eğilimi göstermiştir (Read ve ark., 2016). pH aralığı 4.5 ile 7.2 arasında olan çoğu nanomalzemenin mikrobiyal topluluk için ölümcül olduğu tespit edilmiştir (Read ve ark., 2016). Dört farklı nanomalzeme (çinko oksit, titanyum dioksit, seryum dioksit ve manyetit nanopartikülleri) üzerine yapılan bir araştırmada, çinko oksit nanopartiküllerinin, hafif asidik topraklara kıyasla tuzlu-alkali topraklarda, daha olumlu etkiler yarattığı ortaya konmuştur. Bu etkinin, tuzlu-alkali topraklarda mikrobiyal çeşitliliğin daha yüksek olmasından kaynakladığı açıklanmıştır (You ve ark., 2018). Çinko oksit nanopartikülleri uygulanan toprakların mikrobiyal enzim aktiviteleri kireçli topraklara göre asidik topraklarda daha olumsuz etkilendiği belirlenmiştir (You ve ark., 2018).

Mikroorganizmalar için toksik olmayan (optimal koşullarda), toprağın biyolojik özelliklerine karşı nötr olan, yararlı mikrofloranın zenginleşmesini teşvik eden Nanopartiküllerin, nanogübre olarak uygun olduğu kabul edilmiştir (Rajput ve ark., 2018). You ve ark. (2018), çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO₂), seryum dioksit (CeO₂) ve demir(II,III) oksit (Fe₂O₃) nanoparçacıklarının tuzlu-alkali topraklardaki toprak enzim aktiviteleri (invertaz, üreaz, katalaz ve fosfataz) ve bakteriyel topluluklar üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacılar, çalışmalar sonunda toprak enzim aktivitelerinde azalma, toprak bakteriyel topluluklarında değişiklikler ve biyolojik azot fiksasyonu üzerinde olumsuz etkiler olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle ZnO ve CeO₂ nanoparçacıklarının, *Azotobacter* popülasyonunu, fosfor ve potasyum çözücü bakterileri etkilediği ve enzimatik aktiviteleri baskıladığı bildirilmiştir (Chai ve ark., 2015).

4.1. Nanogübrelerin mikorizaya etkileri

Mikorizal simbiyoz, bitkilerin kökleri tarafından doğrudan alınamayan fosfor ve çinko gibi besin elementlerinin alımını artırarak bitki gelişimini teşvik etmekte ve stres koşullarına karşı toleranslarını artırmaktadır (Nanjundappa ve ark., 2019). Ayrıca, bu mikorizal mantarların, bitki büyümesi ve hayatta kalmasını desteklemek amacıyla rizosferde bulunan diğer mikroorganizmalar ile dinamik etkileşimler içinde olduğu da bilinmektedir (Nanjundappa ve ark., 2019).

Nanopartiküllerin mikorizal mantarlarla etkileşimi oldukça çeşitlidir. Toprağa nanopartikül uygulanmasının, *Pinus muricata* köklerinde bulunan ektomikorizal mantar çeşitliliği üzerinde olumsuz etkiler yarattığı rapor edilmiştir (Sweet ve Singleton, 2015). Gümüş nanopartiküllerinin uygulanması, AM mantar kolonizasyonunda ve büyümesinde azalmaya neden olmuş, bu azalış, mısır bitkisinde fosfor mineralizasyonu ve besin alımı ile ilişkilendirilmiştir (Cao ve ark., 2017). Benzer şekilde, Feng ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, demir oksit nanopartiküllerinin (3,2 mg/kg) yonca bitkisinde mikorizal biyokütleyi ve glomalin içeriğini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte 0,01 mg/kg konsantrasyonundaki gümüş nanopartikülleri herhangi bir olumsuz etkiye yol açmamıştır.

Nanopartiküllerin topraktan uygulamalarının mikorizal mantarlar üzerindeki olumsuz etkilerinin aksine, nanopartiküllerin yapraktan uygulanmasının ektomikorizalar üzerinde olumlu etkilerinin olduğu bildirilmiştir. Aleksandrowicz-Trzcińska ve ark. (2019), 25 ppm gümüş nanopartikül uygulamasının özellikle *Sphaerospora brunnea* türü üzerinde kolonizasyonu artırarak *Quercus robur* fidanlarında ektomikoriza oluşumunu teşvik ettiğini rapor etmiştir. Benzer şekilde, Aleksandrowicz-Trzcińska ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, 25 ppm bakır oksit nanopartiküllerinin fidanların yapraklarına püskürtülmesi, *Thelephora terrestris*, *Suillus bovinus* ve *Sphaerospora brunnea* gibi mikorizal mantar türlerinin kolonizasyonunda artış sağlamış, bunun sonucunda *Pinus sylvestris* (sarı çam) fidanlarının büyümesini teşvik etmiştir. Buna ek olarak, titanyum dioksit nanopartiküllerinin *Phaseolus vulgaris* (fasulye) bitkisinde arbusküler mikorizal mantar (*Funneliformis mosseae*) kolonizasyonunu artırdığı ve bu simbiyotik ilişki ile bitki büyümesini iyileştirdiği belirlenmiştir (El-Gazzar ve ark., 2020).

Dikkat çekici bir diğer bulgu, mikorizal mantarların nanopartiküllerin bitkiler üzerindeki toksik etkilerini nötralize edebilme veya azaltabilme potansiyeline sahip olmasıdır. Örneğin, *Glomus intraradices* ile inoküle edilen çemen otu (*Trigonella foenum-graecum*), çinko oksit (ZnO) nanopartiküllerinin zararlı etkilerini hafifletmiş ve iyi bilinen bir metal şelatlayıcı olan glomalin salgısını artırarak kökler tarafından çinko alımını yaklaşık %50 oranında azaltmış, böylece çinkonun bitkinin gövdesine taşınmasını sınırlandırmıştır (Siani ve ark., 2017). Benzer şekilde, *Rhizophagus irregularis*'in nano sıfır değerlikli demirin fizyolojik stresleri hafiflettiği ve nZVI'nin bitkilerde metal alımını azaltmadaki etkinliğinin artırılmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir (Wu ve ark., 2018).

4.2. Nanogübrelerin topraktaki algilere etkileri

Algler, toprak florasının baskın bir grubu olmamakla birlikte, toprağın fiziksel ve biyolojik sağlığının korunmasında önemli roller üstlenmekte olup, toprak agregasyonunda önemli rol oynamaktadır. Diğer toprak mikroflorası ile etkileşimleri de toprak sağlığının sürdürülmesi açısından oldukça önemlidir. Toprakta mikroalg gelişiminin genel mikrobiyal aktiviteyi artırabileceği bildirilmiştir (Crouzet ve ark., 2019). Heterotrofik mikrobiyal toplulukların, hücre dışı polimerik maddelerin (EPS) salınımı ile uyarıldığı ve bu maddelerin kolayca erişilebilir karbon kaynakları olarak kullanılabildiği belirtilmiştir (Mager ve Thomas, 2011).

Nanopartikül hücre zarını geçtikten sonra periplazmik boşlukta birikmektedir. Sitoplazmaya girdikten sonra ise hücresel organellerle etkileşime girerek ya organellerin işlevini değiştirmekte ya da onlara zarar vermektedir (Crouzet ve ark., 2019). Nanomateriyallerin kloroplasta zarar vererek grana ve tilakoidleri tahrip edebildiğini bildirmiştir (Wang ve ark., 2019). Bazı ağır metallerin *Chlamydomonas acidophila*'nın vakuollerinde birikebildiği bildirilmiştir (Wang ve ark., 2019). Bunun yanı sıra, nanotüplerin endoplazmik retikulumda şişmeye ve mitokondride işlev bozukluğuna yol açtığı incelenmiştir (Nishikawa ve ark., 2003). Bu nanomateriyaller, hücre çekirdeğine girdiklerinde kromozomal değişikliklere neden olarak genetik materyalin bozulmasına ve hücre bölünmesinin aksamasına yol açabilmektedir (Wang ve ark., 2019). Dolayısıyla, nanopartiküllerin hücreye girdikten sonra hücre içinde geniş çapta dağıldığı ve metabolik süreçler üzerinde önemli etkiler yarattığı bildirilmiştir (Melegari ve ark., 2013). Örneğin, gümüş nanomateriyallere (1–50 mg/kg) maruz bırakılan *Chlamydomonas reinhardtii* türünde fotosentetik aktivitenin kısmen baskılandığı ve biyokütleinin azaldığı belirlenmiştir (Nam ve ark., 2018).

Titanyum oksit nanomateriyallerinin *Anabaena variabilis* ile etkileşime girmesi, reaktif oksijen türleri (ROS) ve protein kristallerinin oluşumuna neden olarak hücre zarına zarar vermiştir (Cherchi ve ark., 2011). Ayrıca, *Scenedesmus bijugus* türünde titanyum oksit nanomateriyalleri, fotosistemlerin işlevini engellemiştir (Barreto ve Lombardi, 2016). Alüminyum oksit, *Chlorella* ve *Scenedesmus* türleri ile etkileşime girdiğinde klorofil pigment sentezinde azalmaya yol açmıştır (Sadiq ve ark., 2011). Benzer şekilde, silikon dioksit nanoparçacıkları klorofil içeriğini azaltırken *Scenedesmus* türlerinde karotenoid seviyelerini artırmıştır (Wei ve ark., 2010). CuO nanomateriyallerinin PSII'nin ışık enerjisini elektron taşıma zincirine dönüştürme kapasitesini azalttığı bildirilmiştir (Zhao ve ark., 2016). ZnO, CuO ve Fe₂O₃ nanoparçacıkları arasında, *Nannochloropsis oculata* üzerinde en yüksek inhibitör etkiyi CuO nanoparçacıkları göstermiştir (Fazelian ve ark., 2020).

4.3. Nanogübrelerin aktinomisetlere etkileri

Nanoteknoloji temelli gübreler (nanogübreler), bitki besleme sistemlerinde yüksek yüzey alanı, kontrollü salınım ve artmış besin kullanım etkinliği gibi özellikleri sayesinde geleneksel gübrelerle karşılaştırıldıklarında önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle nanopartiküllerin (NP'ler) 1–100 nm boyut aralığında olması, onların toprak mikroorganizmalarıyla etkileşimini artırarak rizosfer süreçlerini direkt olarak etkileyebilmektedirler. Bu bağlamda, toprak mikrobiyotasının önemli üyelerinden biri olan aktinomisetler ile nanogübreler arasındaki

ilişkinin, sürdürülebilir tarım bakımından oldukça önemli olduğu açıklanmıştır (Arora ve Khosla, 2025).

Aktinomisetler, özellikle *Streptomyces* türleri başta olmak üzere, organik madde parçalanması, antibiyotik üretimi ve bitki büyümesini teşvik edici maddelerin sentezinde rol oynayan Gram-pozitif bakterilerdir. Bu mikroorganizmalar, toprakta karmaşık karbon bileşiklerinin mineralizasyonunu sağlayarak besin döngüsünü hızlandırmakta ve bitki kök çevresinde (rizosfer) aktif bir biyokimyasal ortam oluşturmuştur. Nanogübreler doğrudan mikrobiyal aktivite üzerine etki ettiği gibi besin elementlerinin mikrobiyal aracılı dönüşüm süreçlerine katkısında bulunmaktadır. Nanogübrelerin en önemli özelliklerinden biri kontrollü ve hedefli besin salınımıdır. Bu durum, özellikle fosfor (P) gibi düşük hareketliliğe sahip elementlerin biyoyararlanımını artırmaktadır. Geleneksel fosfor gübrelerinde %80–90’a varan kayıplar görülürken, nanogübreler bu kayıpları azaltarak daha stabil bir besin kaynağı sağlamıştır (Arora ve Khosla, 2025). Aktinomisetler, fosfatı çözme ve organik asit üretimi yoluyla bu besinlerin bitkiye aktarımını kolaylaştırmıştır. Dolayısıyla nanogübrelerin sağladığı stabil besin havuzu, aktinomisetlerin metabolik faaliyetleriyle birleştiğinde sinerjik bir etki ortaya çıkarmıştır (Arora ve Khosla, 2025). Nanogübreler besin elementlerinin etkinliğini artırırken, aktinomisetler bu besinlerin biyoyararlanımını optimize eder ve toprak ekosisteminin sürdürülebilirliğini desteklemiştir. Fakat bu ilişkinin maksimum yarar sağlayabilmesi için nanopartikül türü, konsantrasyonu ve uygulama stratejilerinin dikkatle optimize edilmesi gereklidir. Yapılacak çalışmaların, nanogübre–mikrobiyal etkileşimlerin moleküler seviyede anlaşılmasına odaklanmasının, tarımsal verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik bakımından önemli katkılar sağlayacağı belirtilmiştir (Ghasal ve ark., 2025). Ayrıca, nanomalzemelerin yüksek yüzey reaktivitesi ve adsorpsiyon kapasitesi, mikroorganizmalar için uygun bir mikrohabitat meydana getirmişlerdir. Özellikle silika, grafen ve metal oksit temelli nanokompozitlerin, besin maddelerini taşıyıcı olarak kullanılması ve kontrollü salım sağlaması, toprakta mikrobiyal çeşitliliği ve aktivitesini artırabilmektedir. Bu durum aktinomisetlerin çoğalmasını ve metabolik aktivitesini teşvik ederek, organik madde ayrışması ve humus oluşumunu hızlandırmıştır (Ram ve ark., 2022).

SONUÇ

Nanogübreler, besin elementlerinin kullanım etkinliğini artırmaları, kontrollü salınım sağlamaları ve çevresel kayıpları azaltmaları nedeniyle modern tarımda önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, nanogübrelerin toprak mikroorganizmaları üzerindeki etkilerinin oldukça karmaşık olduğu ve nanopartikül türü, konsantrasyonu, toprak özellikleri ve uygulama yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. Düşük konsantrasyonlarda bazı nanomalzemelerin mikrobiyal aktiviteyi ve enzimatik süreçleri teşvik edebildiği, buna karşın yüksek konsantrasyonlarda özellikle metal bazlı nanopartiküllerin mikrobiyal çeşitlilik ve fonksiyonlar üzerinde toksik etkiler oluşturabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, mikorizal mantarlar ve azot fikse eden bakteriler gibi yararlı mikroorganizmaların bazı durumlarda olumsuz etkilenmesi, nanogübre kullanımında dikkatli olunması gerektiğini göstermiştir. Nanogübrelerin sürdürülebilir tarım sistemlerine entegrasyonu açısından, optimum dozların belirlenmesi, uzun vadeli ekolojik etkilerin araştırılması ve farklı toprak koşullarındaki davranışlarının detaylı olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların, nanogübre–mikroorganizma

etkileşimlerini moleküler düzeyde araştırılması, hem tarımsal verimliliğin artırılması hem de çevresel risklerin azaltılması açısından önemli katkılar sağlayacaktır. Sonuç olarak, nanogübreler büyük bir potansiyele sahip olmakla birlikte, bilinçli ve kontrollü kullanım gerektiren bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdel-Aziz, H., Hasaneen, M.N., Omar, A. (2018). Effect of foliar application of nano chitosan NPK fertilizer on the chemical composition of wheat grains. *Egypt. J. Bot.* 58 (1), 87–95. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2018.1907.1137>.
- Adnan, N., Nordin, S.M., Anwar, A. (2020). Transition pathways for Malaysian paddy farmers to sustainable agricultural practices: an integrated exhibiting tactics to adopt Green fertilizer. *Land Use Pol.* 90, 104255 <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104255>.
- Aleksandrowicz-Trzcinska, M., Bederska-Błaszczuk, M., Szaniawski, A., Olchowik, J., Studnicki, M. (2019). The effects of copper and silver nanoparticles on container-grown Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) seedlings. *Forests* 10 (3), 269.
- Al-juthery, H.W.A., Al-Shami, Q.M.N. (2019). The effect of fertigation with nano NPK fertilizers on some parameters of growth and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Al-Qadisiyah J. Agric. Sci.* 9 (2), 225–232. <https://doi.org/10.33794/qjas.2019.167061>.
- Alizadeh, S., Abdul Rahim, A., Guo, B., Hawari, J., Ghoshal, S., Comeau, Y., (2019). Impacts of continuous inflow of low concentrations of silver nanoparticles on biological performance and microbial communities of aerobic heterotrophic wastewater biofilm. *Environ. Sci. Technol.* 53 (15), 9148–9159. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01214>.
- Arora, V., Khosla, B. (2025). Synthesis of phosphorus nano-fertilisers, their strategic applications and effect on plant growth. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 6161–6180. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06110-9>
- Asadishad, B., Chahal, S., Akbari, A., Cianciarelli, V., Azodi, M., Ghoshal, S., Tufenkji, N., (2018). Amendment of agricultural soil with metal nanoparticles: effects on soil enzyme activity and microbial community composition. *Environ. Sci. Technol.* 52 (44), 908–1918. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05389>.
- Barreto, D.M., Lombardi, A.T. (2016). Environmentally relevant concentrations of TiO₂ nanoparticles affected cell viability and photosynthetic yield in the Chlorophyceae *Scenedesmus bijugus*. *Water, Air & Soil Pollution*, 227, 450. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3139-x>
- Buzea C., II Pacheco and K. Robbie, (2007). Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases* 2, 7.
- Cao, J., Feng, Y., He, S., Lin, X., (2017). Silver nanoparticles deteriorate the mutual interaction between maize (*Zea mays* L.) and arbuscular mycorrhizal fungi: a soil microcosm study. *Appl. Soil Ecol.* 119, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.04.011>.
- Chai H., Yao, J., Sun, J., Zhang, C., Liu, W., Zhu, M., Ceccanti, B. (2015). The effect of metal oxide nanoparticles on functional bacteria and metabolic profiles in agricultural soil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 94, 490–495. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1485-9>
- Cherchi, C., Chernenko, T., Diem, M., Gu, A.Z. (2011). Impact of nano titanium dioxide exposure on cellular structure of *Anabaena variabilis* and evidence of internalization.

- Environ. Toxicol. Chem. 30 (4), 861–869. <https://doi.org/10.1002/etc.445>.
- Chhowalla, M., (2017). Slow Release Nanofertilizers for Bumper Crops. ACS Cent Sci., 22, 156-157. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00091>.
- Concha-Guerrero, S.I., Brito, E.M.S., Piñón-Castillo, H.A. (2014). Effect of CuO nanoparticles over isolated bacterial strains from agricultural soil. Journal of Nanomaterials, 9, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2014/148743>
- Crouzet, O., Consentino, L., P'etraud, J.P., Marraud, C., Aguer, J.P., Bureau, S., Bourvellavac, C., Toulomet, L., Berard, A. (2019). Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil. Front. Microbiol. 10, 1319 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01319>.
- Dimkpa, C.O. (2018). Soil properties influence the response of terrestrial plants to metallic nanoparticles exposure. Curr. Opin Environ. Sci. Health. 6, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.06.007>.
- Dimkpa, C.O., McLean, J.E., Britt, D.W., Anderson, A.J. (2015). Nano-CuO and interaction with nano-ZnO or soil bacterium provide evidence for the interference of nanoparticles in metal nutrition of plants. Ecotoxicology 24 (1), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1364-x>.
- Dimkpa, C.O., Bindraban, P.S. (2017). Nanofertilizers: new products for the industry? J. Agric. Food Chem. 66 (26), 6462–6473. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02150>.
- El-Gazzar, N., Almaary, K., Ismail, A., Polizzi, G. (2020). Influence of Funneliformis mosseae enhanced with titanium dioxide nanoparticles (TiO₂NPs) on Phaseolus vulgaris L. under salinity stress. PloS One 15 (12), e0243491. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243491>.
- Fazelian, N., Yousefzadi, M., Movafeghi, A. (2020). Algal response to metal oxide nanoparticles: analysis of growth, protein content, and fatty acid composition. Bioenergy Res 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10099-7>.
- Feng, Y., Cui, X., He, S., Dong, G., Chen, M., Wang, J., Lin, X. (2013). The role of metal nanoparticles in influencing arbuscular mycorrhizal fungi effects on plant growth. Environ. Sci. Technol. 47 (16), 9496–9504. <https://doi.org/10.1021/es402109n>.
- Gerdini, F.S. (2016). Effect of nano potassium fertilizer on some parchment pumpkin (*Cucurbita pepo*) morphological and physiological characteristics under drought conditions. Int. J. Farm. Alli. Sci. 5 (5), 367–371.
- Ghasal, P. C., Shivay, Y. S., Choudhary, M., Kumar, A., Choudhary, J., Kumar, K., Narwal, E., Meena, A. L. (2025). Improving soil fertility and productivity through sustainable nutrient management in cereals. Indian Journal of Fertilisers, 21(11), 1144–1158.
- Guo, H., White, J.C., Wang, Z., Xing, B. (2018). Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. Curr. Opin. Environ. Sci. Health. 6, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.009>.

- Gupta, C., and Prakash, D. (2020). Effect of nano-fertilizers on soil microflora. *Annals of Plant Sciences*, 9, 3846-3859. <http://dx.doi.org/10.21746/aps.2020.9.5.3>
- Grün, A.L., Emmerling, C. (2018). Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on major soil bacterial phyla of a loamy soil. *Environ. Sci. Eur.* 30 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0160-2>.
- Grün, A.L., Manz, W., Kohl, Y.L., Meier, F., Straskraba, S., Jost, C., Drexel, R., Emmerling, C., (2019). Impact of silver nanoparticles (AgNP) on soil microbial community depending on functionalization, concentration, exposure time, and soil texture. *Environ. Sci. Eur.* 31 (1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0196-y>.
- Huang, M., Keller, A.A., Wang, X., Tian, L., Wu, B., Ji, R., Zhao, L. (2020). Low concentrations of silver nanoparticles and silver ions Perturb the antioxidant defense system and nitrogen metabolism in N₂-fixing Cyanobacteria. *Environ. Sci. Technol.* 54 (24), 15996–16005. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05300>.
- Iqbal, M.A. (2019). Nano-fertilizers for Sustainable Crop Production under Changing Climate: A Global Perspective. *Sustainable Crop Production* London, U.K: IntechOpen, pp. 293–303.
- Jiling C., Youzhi, F., Xiangui, L., Junhua, W. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate the negative effects of iron oxide nanoparticles on bacterial community in rhizospheric soils. *Front. Environ. Sci.* 4, 10
- Kalwani, M., Chakdar, H., Srivastava, A., Pabbi, S., Shukla, P. (2022). Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives, *Chemosphere* 287, 132107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132107>
- Kumar, Y., Towari, K.N., Nayak, R.K., Rai, A., Singh, S.P., Singh, A.N., Kumar, Y., Tomar, H., Singh, T., Raliya, R. (2020). Nanofertilizers for increasing nutrient use efficiency, yield and economic returns in important winter season crops of Uttar Pradesh. *Ind. J. Fertil.* 16 (8), 772–786.
- Kumari, M., Pandey, S., Mishra, S.K., Giri, V.P., Agarwal, L., Dwivedi, S., Pandey, A.K., Nautiyal, C.S., Mishra, A. (2020). Omics-Based mechanistic insight into the role of bioengineered nanoparticles for biotic stress amelioration by modulating plant metabolic pathways. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 8, 242 <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00242>.
- Lakshmi J.V., Sharath, R., Chandraprabha, M.N., Neelufar, E., Abhishikta, H., Malyasree, P. (2012). Synthesis, characterization and evaluation of antimicrobial activity of zinc oxide nanoparticles. *J. Biochem. Technol.* 3: S151–S154, Print.
- Li, Y., Zhao, R., Wang, L., Niu, L., Wang, C., Hu, J., Wu, H., Zhang, W., Wang, P. (2020). Silver nanoparticles and Fe (III) co-regulate microbial community and N₂O emission in river sediments. *Sci. Total Environ.* 706, 135712 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135712>.
- Mager, D.M., Thomas, A.D. (2011). Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil

- crusts: a review of their role in dryland soil processes. *J. Arid Environ.* 75 (2), 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.001>.
- Mahil, E.I., Kumar, B.N. (2019). Foliar application of nanofertilizers in agricultural crops—A review. *J. Farm Sci* 32 (3), 239–249.
- McGee, C.F., Storey, S., Clipson, N., Doyle, E. (2017). Soil microbial community responses to contamination with silver, aluminium oxide and silicon dioxide nanoparticles. *Ecotoxicology* 26 (3), 449–458. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1776-5>.
- Melegari, S.P., Perreault, F., Costa, R.H.R., Popovic, R., Matias, W.G., (2013). Evaluation of toxicity and oxidative stress induced by copper oxide nanoparticles in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Aquat. Toxicol.* 142, 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.09.015>.
- Mgadi, K., Ndaba, B., Roopnarain, A., Rama, H., Adeleke, R. (2024). Nanoparticle applications in agriculture: overview and response of plant-associated microorganisms. *Front. Microbiol.* 15:1354440. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1354440>
- Mishra, S., Yang, X., Singh, H.B., (2020). Evidence for positive response of soil bacterial community structure and functions to biosynthesized silver nanoparticles: an approach to conquer nanotoxicity? *J. Environ. Manag.* 253, 109584 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109584>.
- Morales-Díaz A.B., H. Ortega-Ortíz, A. Juárez-Maldonado, Cadenas-Pliego G., S. González-Morales and A. Benavides-Mendoza. (2017). Application of nano-elements in plant nutrition and its impact in ecosystems. *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* 8, 1-3, <https://doi.org/10.1088/2043-6254/8/1/013001>
- Nagesh, A.K.B. (2019). Foliar application of nanofertilizers in agricultural crops—a review. *J. Farm. Sci.* 32, 239–249. <https://doi.org/10.18805/BKAP650>
- Nam, S.H., Kwak, J.I., An, Y.J. (2018). Quantification of silver nanoparticle toxicity to algae in soil via photosynthetic and flow-cytometric analyses. *Sci. Rep.* 8 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18680-5>.
- Nanjundappa, A., Bagyaraj, D.J., Saxena, A.K., Kumar, M., Chakdar, H., (2019). Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants. *Fungal Biol. Biotechnol.* 6 (1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0086-5>.
- Nibin P.M., Ushakumari K. Ishrath P.K. (2019). Organic Nano NPK Formulations on Soil Microbial and Enzymatic Activities on Post harvest Soil of Bhindi. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 8, 1814-1819,
- Nishikawa, K., Yamakoshi, Y., Uemura, I., Tominaga, N. (2003). Ultrastructural changes in *Chlamydomonas acidophila* (Chlorophyta) induced by heavy metals and polyphosphate metabolism. *FEMS Microbiol. Ecol.* 44 (2), 253–259. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(03\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00049-7).
- Palmqvist, N.M., Seisenbaeva, G.A., Svedlindh, P., Kessler, V.G. (2017). Maghemite nanoparticles acts as nanozymes, improving growth and abiotic stress tolerance in

Brassica napus. Nanoscale Res. Lett. 12 (1), 1–9.
<https://doi.org/10.1186/s11671-017-2404-2>.

- Parada, J., Rubilar, O., Fernández-Baldo, M.A., Bertolino, F.A., Durán, N., Seabra, A.B., Tortella, G.R. (2019). The nanotechnology among US: are metal and metal oxides nanoparticles a nano or mega risk for soil microbial communities? Crit. Rev. Biotechnol. 39 (2), 157–172. <https://doi.org/10.1080/07388551.2018.1523865>.
- Pradhan A., Seenaa, S., Pascoal, C., Cássio, F. (2011). Can metal nanoparticles be a threat to microbial decomposers of plant litter in streams?. Microb. Ecol. 62, 58–68. <https://doi.org/10.1007/s00248-011-9861-4>
- Preetha, S., Balakrishnan, N. (2017). A review of nano fertilizers and their use and functions in soil. International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 6(12), 3117–3133.
- Rajput, V.D., Minkina, T., Sushkova, S., Tsitsuashvili, V., Mandzhieva, S., Gorovtsov, A., Gromakova, N. (2018). Effect of nanoparticles on crops and soil microbial communities. J. Soils Sediments 18 (6), 2179–2187doi. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1793-2>.
- Ram, S., Sadiq, M., Durgude, S. A., Singh, V. (2022). Synthesized nano composites of nano silica and reduced graphene with urea for nitrogen fertilizer capsule production and their evaluation. Journal of Nanomaterials, 1, 1–13<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2003723/v1>
- Read, D.S., Matzke, M., Gweon, H.S., Newbold, L.K., Heggelund, L., Ortiz, M.D., Lahive, E., Spurgeon, D., Svendsen, C. (2016). Soil pH effects on the interactions between dissolved zinc, non-nano-and nano-ZnO with soil bacterial communities. Environ. Sci. Pollut. Res. 23 (5), 4120–4128. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4538-z>.
- Sadiq, I.M., Pakrashi, S., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A. (2011). Studies on toxicity of aluminum oxide (Al₂O₃) nanoparticles to microalgae species: *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp. J. Nanopart. Res. 13 (8), 3287–3299. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0243-0>.
- Salas-Leiva, J., Salas-Leiva, D.E., Tovar-Ramírez, D., Herrera-Pérez, G., Tarango-Rivero, S., Luna-Velasco, A., Orrantia-Borunda, E. (2021). Copper oxide nanoparticles slightly affect diversity and metabolic profiles of the prokaryotic community in pecan tree (*Carya illinoensis*) rhizospheric soil. Appl. Soil Ecol. 157, 103772 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103772>.
- Seleiman, M.F., Almutairi, K.F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B.A., Battaglia, M.L. (2021). Nano-Fertilization as an emerging fertilization technique: why can modern agriculture benefit from its use? Plants 10 (1), 2. <https://doi.org/10.3390/plants10010002>.
- Sharifi, R., Khoramdel, R. (2016). Effects of Nano-zinc oxide and seed inoculation by plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, yield components and grain filling period of soybean (*Glycine max* L). Iran. J. Field. Crop. Res. 13 (4), 738–753. <https://doi.org/10.22067/gsc.v13i4.32491>.

- Shah, V., Collins, D., Walker, V.K., Shah, S. (2014). The impact of engineered cobalt, iron, nickel and silver nanoparticles on soil bacterial diversity under field conditions. *Environ. Res. Lett.* 9 (2), 024001 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/2/024001>.
- Sheoran, P., Grewal, S., Kumari, S., Goel, S. (2021). Enhancement of growth and yield, leaching reduction in *Triticum aestivum* using biogenic synthesized zinc oxide nanofertilizer. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 32, 101938 <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101938>
- Shrestha, B., Anderson, T.A., Acosta-Martinez, V., Payton, P., Casas-Carrell, J.E. (2015). The influence of multiwalled carbon nanotubes on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) bioavailability and toxicity to soil microbial communities in alfalfa rhizosphere. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 116, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.03.005>.
- Shukla, P., Chaurasia, P., Younis, K., Qadri, O.S., Faridi, S.A., Srivastava, G., (2019). Nanotechnology in sustainable agriculture: studies from seed priming to post-harvest management. *Nanotechnol. Environ. Eng.* 4 (1), 11. <https://doi.org/10.1007/s41204-019-0058-2>.
- Siani, N.G., Fallah, S., Pokhrel, L.R., Rostamnejadi, A. (2017). Natural amelioration of zinc oxide nanoparticle toxicity in fenugreek (*Trigonella foenum-gracum*) by arbuscular mycorrhizal (*Glomus intraradices*) secretion of glomalin. *Plant Physiol. Biochem.* 112, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.001>.
- Simonin, M., Cantarel, A.A., Crouzet, A., Gervais, J., Martins, J.M., Richaume, A. (2018). Negative effects of copper oxide nanoparticles on carbon and nitrogen cycle microbial activities in contrasting agricultural soils and in presence of plants. *Front. Microbiol.* 9, 3102.
- Sweet, M.J., Singleton, I. (2015). Soil contamination with silver nanoparticles reduces bishop pine growth and ectomycorrhizal diversity on pine roots. *J. Nanopart. Res.* 17, 448 <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3246-4>.
- Vandervoort A.R. and Y. Arai. (2019). The Role of Nanotechnology in the Fortification of Plant Nutrients and Improvement of Crop Production. *Appl. Sci.* 9: 499.
- Wang, J., Shu, K., Zhang, L., Youbin, S.Y., 2017. Effects of silver nanoparticles on soil microbial communities and bacterial nitrification in suburban vegetable soils. *Pedosphere* 27, 482–490. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60344-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60344-8).
- Wang, F., Guan, W., Xu, L., Ding, Z., Ma, H., Ma, A., Terry, N. (2019). Effects of nanoparticles on algae: adsorption, distribution, ecotoxicity and fate. *Appl. Sci.* 9(8), 1534 <https://doi.org/10.3390/app9081534>.
- Wei, C., Zhang, Y., Guo, J., Han, B., Yang, X., Yuan, J. (2010). Effects of silica nanoparticles on growth and photosynthetic pigment contents of *Scenedesmus obliquus*. *J. Environ. Sci.* 22 (1), 155–160. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60087-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60087-5).
- Wu, S., Vosátka, M., Vogel-Mikus, K., Kavcic, A., Kelemen, M., Sepec, L., Pelicon, P., Skala, R., Teodora, M., Michalkova, L., Komárek, M., (2018). Nano zero-valent iron mediated metal (loid) uptake and translocation by arbuscular mycorrhizal symbioses.

Environ. Sci. Technol. 52 (14), 7640–7651. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05516>.

Xu C., C. Peng, L. Sun, S. Zhang, H. Huang, Y. Chen and J. Shi., (2015). Distinctive effects of TiO₂ and CuO nanoparticles on soil microbes and their community structures in flooded paddy soil..Soil Biol. Biochem. 86, 24–33
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.03.011>

Yang, Y., Quensen, J., Mathieu, J., Wang, Q., Wang, J., Li, M., Tiedje, J.M., Alvarez, P.J. (2014). Pyrosequencing reveals higher impact of silver nanoparticles than Ag on the microbial community structure of activated sludge. Water Res. 48, 317–325.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.046>.

You, T., Liu, D., Chen, J., Yang, Z., Dou, R., Gao, X., Wang, L. (2018). Effects of metal oxide nanoparticles on soil enzyme activities and bacterial communities in two different soil types. J. Soils Sediments 18 (1), 211–221. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1716-2>.

Zhao, J., Cao, X., Liu, X., Wang, Z., Zhang, C., White, J.C., Xing, B., (2016). Interactions of CuO nanoparticles with the algae *Chlorella pyrenoidosa*: adhesion, uptake and toxicity. Nanotoxicology 10 (9), 1297–1305. <https://doi.org/10.1080/17435390.2016.1206149>.

BÖLÜM 3

WEPP MODELİ İÇİN GELECEK İKLİM VERİ SETLERİNİN HAZIRLANMASI: MARKSİM-CLIGEN ENTEGRASYONU VE UYGULAMA REHBERİ

Saniye DEMİR¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü saniye.140100@gmail.com

1.1. İklim Değişikliği Çalışmalarında Gelecek İklim Verilerinin Elde Edilmesi

Küresel iklim değişikliği, hem doğal süreçler hem de insan faaliyetleri sonucunda atmosferik bileşimin bozulmasıyla ortaya çıkan ve dünya genelinde tarımsal verimlilikten hidrolojik döngüye kadar pek çok sistemi tehdit eden bir olaydır ([Zounemat-Kermani et al., 2021](#)). Nüfus artışıyla birleşen bu çevresel değişimler, gıda güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için bilimsel temelli öngörü araçlarına ve tekniklerine olan ihtiyacı her zamankinden daha kritik hale getirmiştir ([Oo et al., 2020](#); [Zounemat-Kermani et al., 2021](#)). Bu bağlamda, gelecekteki iklim senaryolarının analizi, tarımsal planlama ve afet yönetimi gibi stratejik alanlarda temel bir gereklilik olarak kabul edilmektedir.

1.2. Küresel İklim Modelleri ve Çözünürlük Sorunu

İklim sisteminin gelecekteki davranışını anlamak ve sera gazı emisyon senaryolarının etkilerini simüle etmek için kullanılan temel araçlar Küresel İklim Modelleridir ([Gebrechorkos et al., 2023](#); [Giorgi & Mearns, 1991](#)). GCM'ler, küresel ölçekteki iklimsel değişkenleri ve büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonları başarıyla temsil edebilse de, yerel ölçekteki etki değerlendirme çalışmaları için ciddi kısıtlılıklara sahiptir. Bu modellerin mekânsal çözünürlükleri genellikle oldukça kaba (yüzlerce kilometre) olup, bu durum yerel ölçekteki topografik etkilerin ve termal kontrastların (dağlık sistemler, kıyı şeritleri vb.) modele doğru şekilde yansıtılmasını engellemektedir ([Giorgi & Mearns, 1991](#); [Solman & Núñez, 1999](#)).

GCM verilerinin düşük çözünürlüğü ve beraberinde getirdiği belirsizlikler, bu verilerin yerel düzeydeki karar alma süreçlerinde veya havza ölçekli hidrolojik modellerde doğrudan kullanılmasını imkânsız kılmaktadır ([Gebrechorkos et al., 2023](#)). Özellikle uç iklim olaylarının (aşırı yağışlar, sıcaklık dalgaları) yerel ölçekteki temsiliyetinde, küreselden yerele inildikçe hata payı ve sapmalar (bias) artış göstermektedir ([Gebrechorkos et al., 2023](#)). Bu noktada, büyük ölçekli GCM çıktıları ile yerel ölçekli ihtiyaçlar arasındaki boşluğu kapatacak bir mekanizmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

1.2.1. Gelecek İklim Verilerinin Yerel Ölçekte Üretilmesi

Gelecek iklim verilerinin yerel ölçekte üretilmesi, küresel iklim modelleri (GCM'ler) tarafından sağlanan geniş ölçekli iklim projeksiyonlarının belirli bir bölge, havza veya meteoroloji istasyonu ölçeğine uyarlanması sürecidir. Bu süreç, küresel modellerin düşük mekânsal çözünürlüğe sahip çıktıları ile yerel ölçekte gerçekleştirilen etki değerlendirmelerinin ihtiyaç duyduğu yüksek çözünürlüklü iklim verileri arasında bir bağlantı kurmaktadır (Wilby &

Wigley, 1997). Böylece GCM'lerden elde edilen sıcaklık, yağış ve diğer iklim değişkenlerine ait projeksiyonlar, yerel koşulları daha iyi temsil edecek şekilde dönüştürülerek kullanım için hazır hale getirilmektedir (Racines et al., 2020).

Gelecek iklim verilerinin yerel ölçekte üretilmesinde kullanılan yöntemler genel olarak **istatistiksel** ve **dinamik yöntemler** olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir.

- **Dinamik yöntemler**, Bölgesel İklım Modelleri (Regional Climate Models, RCM) kullanılarak küresel iklim modeli çıktılarından daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip iklim verilerinin üretilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşımda, küresel iklim modellerinden elde edilen veriler sınır koşulu olarak kullanılır ve atmosferik süreçler fiziksel temelli sayısal denklemler yardımıyla simüle edilir. Böylece genellikle 10–50 km çözünürlüğe sahip iklim verileri elde edilebilmektedir (Chisanga et al., 2017). Bölgesel iklim modelleri topografya ve arazi kullanımındaki mekânsal farklılıkları daha ayrıntılı temsil edebilse de, yüksek hesaplama gücü ve uzun işlem süreleri gerektirmektedir (Racines et al., 2020; Noto et al., 2023). **İstatistiksel yöntemler**, küresel iklim modeli çıktılarından yararlanarak belirli bir konum için günlük iklim verilerinin üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, büyük ölçekli iklim bilgileri ile yerel iklim özellikleri arasındaki ilişkileri kullanarak geleceğe yönelik sıcaklık ve yağış serileri oluşturmaktadır (Chisanga et al., 2017). Dinamik yaklaşımlara göre daha düşük hesaplama maliyetine sahip olmaları ve kısa sürede sonuç üretebilmeleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca yeterli gözlem verisinin bulunması durumunda yerel koşulları başarılı bir şekilde temsil edebilmektedir (Giorgi & Mearns, 1991; Chisanga et al., 2017).

Bu yöntemler içerisinde yer alan stokastik hava durumu reteleri, günlük yağış, maksimum ve minimum sıcaklık gibi meteorolojik değişkenlerin istatistiksel özelliklerini kullanarak sentetik iklim serileri üretmektedir. Bu amaçla geliştirilen **MarkSim DSSAT Hava Durumu reteci**, tarımsal ve hidrolojik modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan araçlardan biridir. Model tabanlı erozyon ve hidrolojik değerlendirmelerde kullanılacak iklim verilerinin hazırlanmasında, küresel iklim modellerinden elde edilen projeksiyonların günlük meteorolojik verilere dönüştürülmesi gerekmektedir. MarkSim, küresel iklim modeli ıktıları ile yerel iklim özelliklerini bir araya getirerek günlük yağış, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık serileri üretmektedir. Elde edilen bu veri setleri, özellikle WEPP ve SWAT gibi süreç tabanlı modellerin gereksinim duyduğu yüksek zamansal çözünürlüklü iklim girdilerinin oluşturulmasına olanak

sağlamaktadır. Böylece gelecekteki iklim koşullarının toprak kaybı, yüzey akışı, sediment taşınımı ve su kaynakları üzerindeki olası etkileri daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

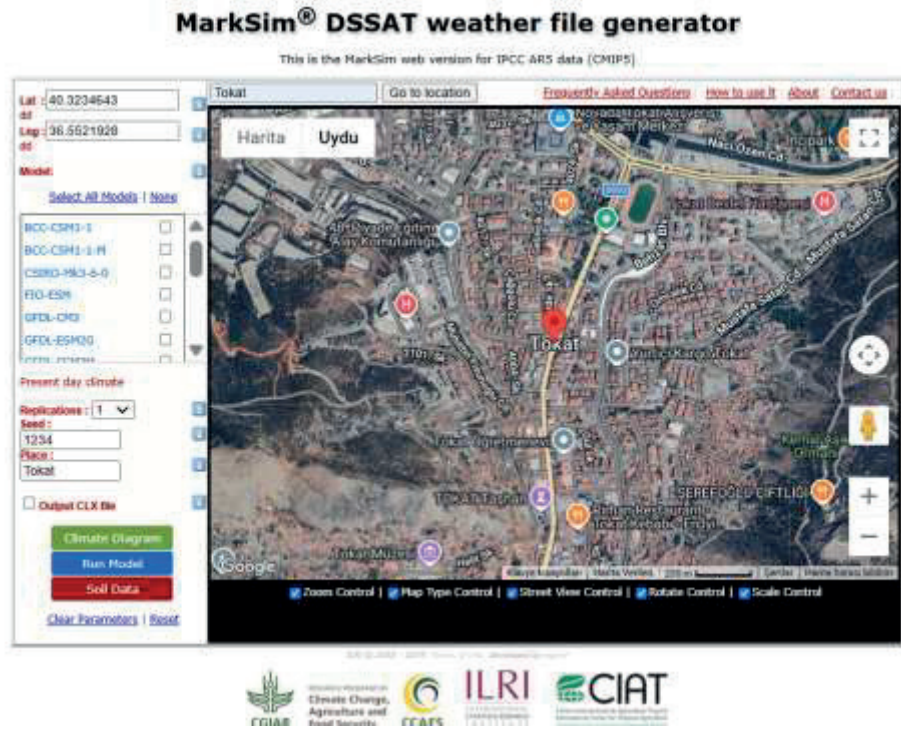
1.3. Gelecek İklim Verilerinin Model Girdilerine Dönüştürülmesi

WEPP modelinde geleceğe yönelik erozyon tahminlerinin gerçekleştirilebilmesi için, öncelikle gelecekteki iklim koşullarını temsil eden günlük meteorolojik verilerin oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla, DSSAT platformu kapsamında geliştirilen MarkSim Hava Durumu Üreteci yaygın olarak kullanılmaktadır. MarkSim, küresel iklim modelleri (GCM'ler) ve farklı iklim senaryolarını temel alarak belirli bir konuma ait uzun dönemli günlük meteorolojik veri serileri üretmektedir.

MarkSim web arayüzünde ilk olarak çalışma alanının konumu harita üzerinden veya koordinatlar kullanılarak belirlenir. Daha sonra kullanılacak iklim modeli, emisyon senaryosu ve projeksiyon dönemi seçilir. Belirlenen parametrelere bağlı olarak sistem, günlük yağış, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık gibi meteorolojik değişkenleri içeren veri setleri oluşturur ve kullanıcıya indirme olanağı sunar.

MarkSim çıktıları genellikle birden fazla tekrar (replication) halinde üretilmektedir. Bu tekrarlar, gelecekteki iklim koşullarında ortaya çıkabilecek doğal değişkenliği ve belirsizliği temsil etmek amacıyla kullanılmaktadır. Böylece farklı iklim gerçekleştirmelerinin model sonuçları üzerindeki etkileri değerlendirilebilmektedir.

İndirilen veri dosyalarının uygun bir klasör yapısı içerisinde düzenlenmesi ve kullanılacak modele uygun formata dönüştürülmesi gerekmektedir. Özellikle WEPP modelinde CLIGEN tabanlı iklim dosyalarının, SWAT modelinde ise günlük meteorolojik veri dosyalarının oluşturulabilmesi için MarkSim çıktılarının sistematik bir şekilde organize edilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle her iklim modeli, senaryo ve zaman dönemi için ayrı klasörler oluşturulması önerilmektedir. Düzenli bir dosya yapısı, modelleme sürecinin yönetimini kolaylaştırmakta, hata riskini azaltmakta ve çalışmaların tekrar edilebilirliğini artırmaktadır.



MarkSim uygulamasında gelecek iklim verilerinin oluşturulması sırasında, farklı küresel iklim modellerinin sonuçlarını temsil eden "**AVERAGE**" seçeneğinin kullanılması önerilmektedir. Bu seçenek, birden fazla iklim modelinden elde edilen projeksiyonların ortalamasını kullanarak tek bir modele bağlı kalınmasından kaynaklanabilecek belirsizliklerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Böylece farklı modeller tarafından öngörülen iklim değişikliği eğilimleri ortak bir çerçevede değerlendirilmekte ve daha dengeli iklim projeksiyonları elde edilebilmektedir. Çoklu model ortalamalarının kullanımı, iklim değişikliği etki çalışmalarında yaygın olarak önerilen bir yaklaşım olup gelecekteki iklim koşullarının daha güvenilir şekilde temsil edilmesine olanak tanımaktadır (Wilby et al., 2004). Ayrıca, çok sayıda iklim modeli çıktısının ayrı ayrı işlenmesi yerine tek bir veri seti üzerinden çalışılabilmesi, veri yönetimini kolaylaştırmakta ve analiz sürecinin daha etkin yürütülmesini sağlamaktadır.

MarkSim tarafından oluşturulan iklim verileri, kullanıcı tarafından belirlenen tekrar (**replication**) sayısına bağlı olarak birden fazla dosya halinde indirilmektedir. Her tekrar, aynı iklim senaryosu ve zaman dilimi için üretilmiş bağımsız bir günlük meteorolojik veri serisini temsil etmektedir. Bu dosyalar günlük yağış, maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık ve güneş radyasyonu verilerini içermektedir. Birden fazla tekrarın kullanılması, gelecekteki iklim koşullarında ortaya çıkabilecek doğal değişkenliğin ve belirsizliklerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece iklim değişikliğinin neden olabileceği farklı meteorolojik

koşulların erozyon, yüzey akışı ve diğer hidrolojik süreçler üzerindeki etkileri daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilmektedir.

Üretilen iklim verilerinin düzenli bir şekilde organize edilmesi, sonraki analiz ve modelleme aşamalarının etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla geliştirilen makro tabanlı çalışma kitabı, MarkSim çıktılarının sistematik olarak düzenlenmesine, kontrol edilmesine ve WEPP ile SWAT modellerinde kullanılabilecek formatlara dönüştürülmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca çalışma kitabında yer alan grafiksel karşılaştırma ve kalite kontrol araçları sayesinde oluşturulan iklim verilerinin tutarlılığı değerlendirilebilmekte, eksik veya hatalı veriler erken aşamada tespit edilebilmektedir. Böylece veri hazırlama süreci standartlaştırılarak model uygulamalarında karşılaşılabilecek hata kaynakları azaltılmakta ve analizlerin güvenilirliği artırılmaktadır.

MarkSim tarafından oluşturulan iklim verileri, farklı çevresel ve hidrolojik modelleme uygulamalarında kullanılabilecek şekilde düzenlenebilmektedir. Araştırmanın amacı ve kullanılacak modelin veri gereksinimlerine bağlı olarak, bu veriler uygun formatlara dönüştürülebilmekte ve model girdisi olarak kullanılabilmektedir. Bu esneklik sayesinde aynı iklim veri seti, WEPP ve SWAT gibi farklı süreç tabanlı modellerde değerlendirilerek iklim değişikliğinin toprak kaybı, yüzey akışı ve su kaynakları üzerindeki olası etkilerinin analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece farklı modelleme yaklaşımlarının aynı iklim senaryoları altında karşılaştırılması ve yorumlanması mümkün hale gelmektedir.

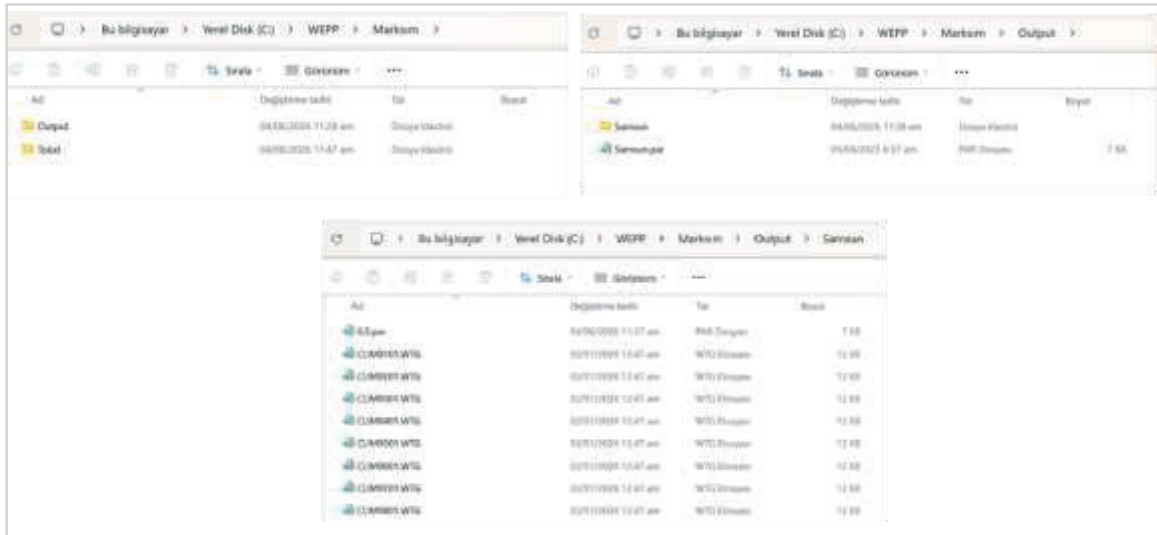
MarkSim tarafından üretilen iklim verileri, her tekrar (**replication**) için ayrı dosyalar halinde oluşturulmaktadır. Veri işleme, kalite kontrol ve modelleme aşamalarının sorunsuz yürütülebilmesi için bu dosyaların standart bir klasör yapısı içerisinde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, aynı senaryo ve projeksiyon dönemine ait tüm çıktı dosyalarının tek bir klasörde saklanması, dosya adlarının değiştirilmemesi ve çıktı klasörü içerisinde analizle ilişkili olmayan dosya veya alt klasörlerin bulundurulmaması önerilmektedir. Dosya adlarında veya klasör yapısında yapılacak değişiklikler, veri işleme araçlarının dosyaları doğru şekilde tanımlamasını engelleyebilmekte ve veri dönüştürme ile model hazırlama süreçlerinde hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, MarkSim tarafından oluşturulan orijinal dosya yapısının korunması, veri bütünlüğünün sağlanması ve analizlerin güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle MarkSim çıktılarının orijinal dosya adları korunarak saklanması ve düzenli bir klasör yapısı içerisinde yönetilmesi, veri bütünlüğünün korunması ve sonraki analizlerin sorunsuz yürütülmesi açısından önem taşımaktadır.

1.3.1. MarkSim Çıktılarının Düzenlenmesi ve Klasör Yapısı

MarkSim uygulaması kullanılarak farklı iklim modelleri, emisyon senaryoları ve projeksiyon dönemlerine ait çok sayıda iklim veri seti oluşturulabilmektedir. Özellikle kapsamlı iklim değişikliği çalışmalarında üretilen veri miktarının artması, veri yönetimini ve analiz süreçlerini zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle oluşturulan veri dosyalarının sistematik bir klasör yapısı içerisinde saklanması önerilmektedir.

Dosya ve klasör adlarında kullanılan iklim modeli, senaryo, projeksiyon dönemi ve çalışma alanına ilişkin bilgilerin açık bir şekilde belirtilmesi, veri setlerinin kolaylıkla tanımlanmasına ve olası karışıklıkların önlenmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca standart bir klasör organizasyonunun kullanılması, veri işleme sürecinin daha etkin yürütülmesine, çalışmaların izlenebilirliğinin artırılmasına ve analiz sonuçlarının tekrarlanabilirliğinin sağlanmasına yardımcı olmaktadır.

Bu nedenle MarkSim çıktılarının düzenlenmesinde tutarlı bir adlandırma sistemi benimsenmeli ve her veri seti ait olduğu iklim modeli, senaryo ve zaman dönemini yansıtacak şekilde arşivlenmelidir. Böyle bir yaklaşım, hem veri yönetimini kolaylaştırmakta hem de gelecekte gerçekleştirilecek modelleme ve değerlendirme çalışmalarında veri erişimini hızlandırmaktadır.



Şekil X. WEPP modeli için oluşturulan iklim dosyalarının klasör yapısı ve çıktı dosyaları.

1.3.2. Gözlenen İklim Verilerinin Kullanımı

MarkSim tarafından üretilen gelecek iklim projeksiyonları, başta yağış, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık olmak üzere birçok temel meteorolojik değişkeni sağlamaktadır. Bununla birlikte, bazı çevresel ve hidrolojik modelleme uygulamalarında ihtiyaç duyulan tüm iklim parametreleri MarkSim tarafından doğrudan üretilmemektedir. Bu nedenle eksik değişkenlerin tamamlanabilmesi amacıyla çalışma alanına ait gözlenen iklim verilerinden yararlanılabilmektedir.

Bu yaklaşımda, geleceğe yönelik iklim projeksiyonları ile tarihsel iklim kayıtları birlikte değerlendirilerek daha kapsamlı veri setleri oluşturulmaktadır. Özellikle rüzgâr hızı ve yönü gibi bazı meteorolojik değişkenler için güvenilir gelecek projeksiyonlarının sınırlı olduğu durumlarda, gözlenen verilerin çalışma alanının iklim özelliklerini temsil ettiği kabul edilmektedir (Trotochaud, 2014). Böylece geleceğe ait projeksiyon verileri ile tarihsel gözlemler bir araya getirilerek modelleme çalışmalarında kullanılabilecek bütünlüklü iklim veri setleri elde edilmektedir.

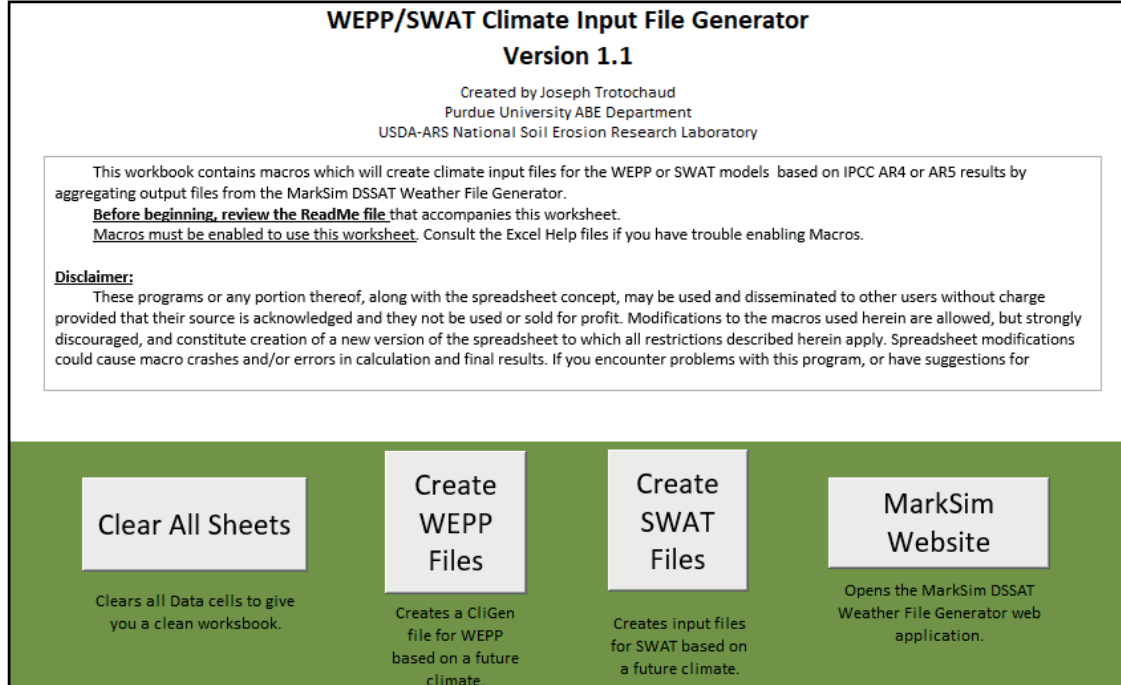
Gözlenen iklim verilerinin ve MarkSim çıktılarının aynı çalışma dizini içerisinde düzenli bir şekilde saklanması, veri yönetimini kolaylaştırmakta ve veri işleme sürecinde oluşabilecek hataların azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca standart bir dosya organizasyonunun kullanılması, veri kaynaklarının izlenebilirliğini artırmakta ve modelleme çalışmalarının tekrarlanabilirliğini desteklemektedir.

1.3.2. Makro Tabanlı Çalışma Kitabının Yapısı ve İşleyişi

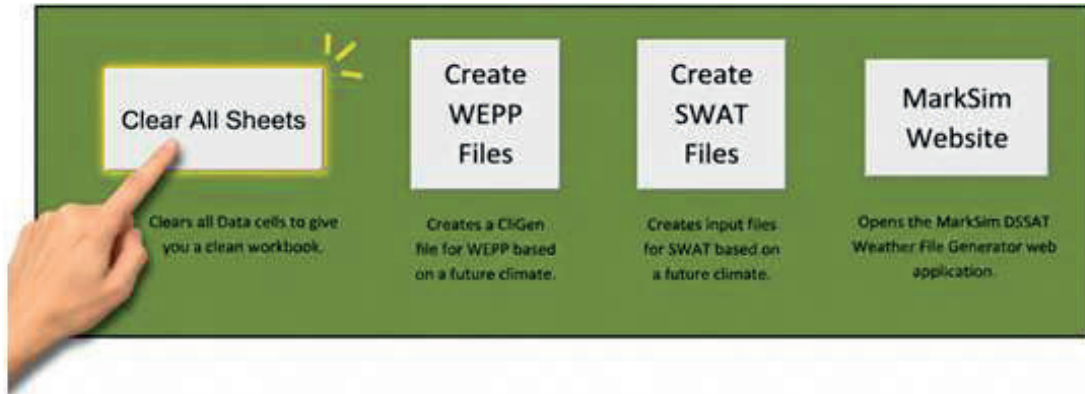
Makro tabanlı çalışma kitabı, MarkSim tarafından üretilen iklim verilerinin düzenlenmesi, dönüştürülmesi ve farklı modelleme uygulamalarında kullanılabilecek formatlara hazırlanması amacıyla geliştirilmiştir. Çalışma kitabı, kullanıcı dostu bir arayüz aracılığıyla veri işleme sürecini kolaylaştırırken, arka planda gerçekleştirilen veri dönüştürme, dosya yönetimi ve kalite kontrol işlemlerini otomatik olarak yürütmektedir.

Çalışma kitabının yapısının ve temel işleyiş prensiplerinin anlaşılması, özellikle veri işleme sürecini özelleştirmek, farklı senaryoları değerlendirmek veya olası hata kaynaklarını belirlemek isteyen kullanıcılar açısından yararlı olabilmektedir. Bununla birlikte, yalnızca gelecek iklim verilerini oluşturmak ve bu verileri WEPP veya SWAT modellerinde kullanmak isteyen kullanıcıların çalışma kitabının teknik ayrıntılarını bilmesi zorunlu değildir.

Bu nedenle, sonraki bölümlerde çalışma kitabının genel yapısı, temel fonksiyonları ve veri işleme sürecindeki rolü özetlenerek kullanıcıların uygulama adımlarını daha kolay takip edebilmesi amaçlanmıştır.



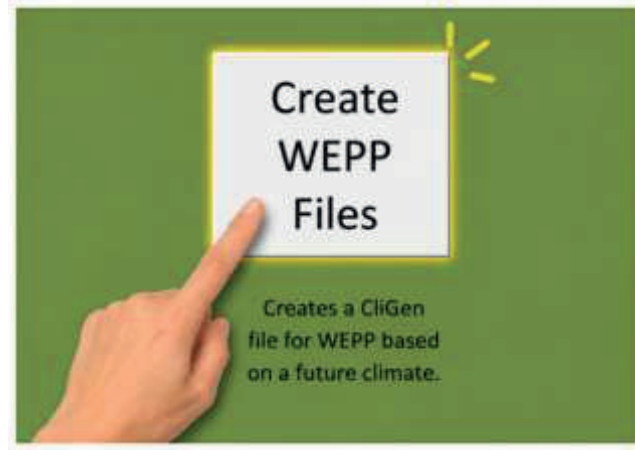
Makro alışma kitabında yeni bir senaryo oluşturmadan önce mevcut verilerin temizlenmesi amacıyla **"Clear All Sheets"** düğmesine tıklanır. Bu işlem, çalışma sayfalarındaki kullanıcı tarafından girilmiş tüm veri hücrelerini sıfırlayarak temiz bir çalışma ortamı sağlar. Böylece farklı iklim senaryoları veya model çalışmaları sırasında önceki verilerden kaynaklanabilecek hataların önüne geçilir.



şekil X. Makro alışma kitabında verilerin temizlenmesi için kullanılan "Clear All Sheets" düğmesi.

Gerekli iklim ve senaryo bilgilerinin çalışma kitabına girilmesinin ardından, WEPP modeli için kullanılacak iklim dosyalarının oluşturulması amacıyla **"Create WEPP Files"** düğmesi kullanılır (Şekil X). Bu fonksiyon, çalışma sayfalarında yer alan gelecek iklim verilerini işleyerek WEPP modelinin ihtiyaç duyduğu CLIGEN formatındaki iklim dosyalarını otomatik olarak üretir. Oluşturulan dosyalar, WEPP ortamında doğrudan kullanılabilecek şekilde düzenlenmekte ve kullanıcıya manuel veri dönüştürme işlemleriyle uğraşmadan gelecek iklim senaryolarını modele aktarma imkânı sağlamaktadır.

Bu işlem sayesinde farklı iklim değişikliği senaryolarına ait veriler standart bir formatta hazırlanarak WEPP modeline entegre edilmekte, böylece erozyon ve hidrolojik süreçlerin gelecekteki iklim koşulları altında değerlendirilmesi kolaylaştırılmaktadır.



Şekil X. WEPP modeli için gelecek iklim verilerine ait CLIGEN dosyasının oluşturulmasını sağlayan "Create WEPP Files" düğmesi.

MarkSim DSSAT Hava Durumu Üretici, gelecekteki iklim koşullarını temsil eden günlük meteorolojik verilerin oluşturulmasında kullanılan çevrimiçi bir hava durumu üreticisidir. Çalışma kitabında yer alan **"MarkSim Website"** düğmesi, kullanıcıyı doğrudan MarkSim web uygulamasına yönlendirerek seçilen konum, iklim modeli ve emisyon senaryolarına ait iklim verilerinin oluşturulmasını sağlar (Şekil X). Kullanıcılar bu platform üzerinden farklı Küresel İklim Modelleri (GCM'ler) ve iklim değişikliği senaryoları için günlük yağış, maksimum ve minimum sıcaklık gibi meteorolojik verileri üretebilmektedir. Elde edilen çıktılar daha sonra çalışma kitabına aktararak WEPP ve SWAT gibi modeller için gerekli iklim dosyalarının hazırlanmasında kullanılmaktadır.

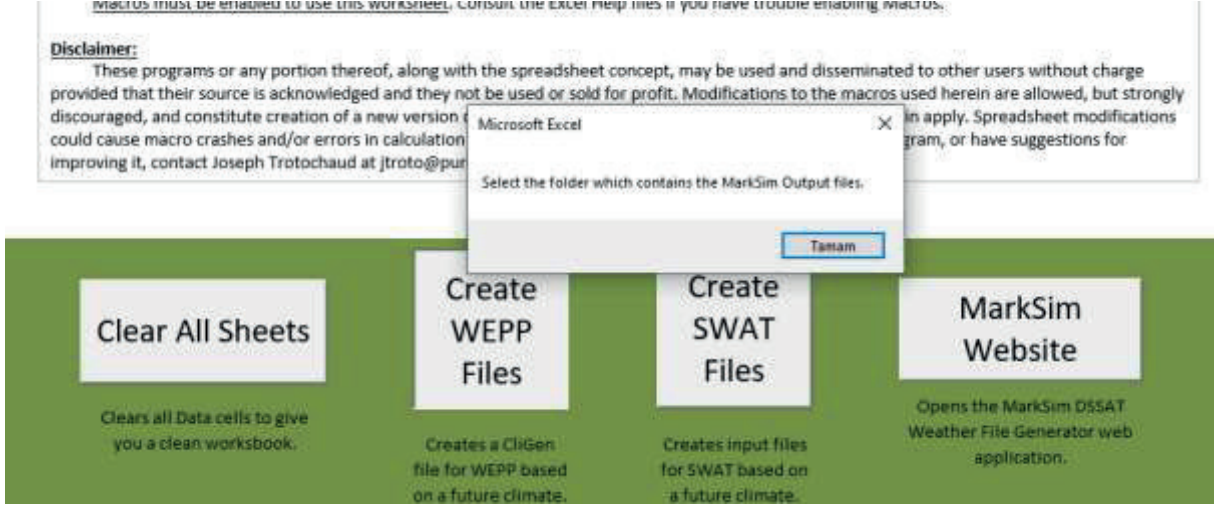


şekil X. MarkSim DSSAT Hava Durumu Üretecı web uygulamasına erişim sağlayan "MarkSim Website" fonksiyonu.

1.3.3. MarkSim Çıktı Klasörünün Seçilmesi

"Create WEPP Files" düğmesine tıklandıktan sonra program, geleceğe yönelik iklim verilerinin bulunduğu klasörün seçilmesini istemektedir. Bu aşamada ekranda ***"Select the folder which contains the MarkSim Output files"*** mesajını içeren bir ileti penceresi görüntülenmektedir. Kullanıcının, MarkSim DSSAT Weather Generator uygulamasından indirilen ve proje klasörü içerisinde açılmış bulunan çıktı dosyalarının yer aldığı dizini seçmesi gerekmektedir.

Seçilen klasör içerisinde MarkSim tarafından oluşturulan günlük meteorolojik veri dosyaları ve ilgili CLIGEN parametre dosyaları bulunmaktadır. Kullanıcı klasör seçimini onayladıktan sonra makrolar otomatik olarak çalışmaya başlamakta ve veri aktarım süreci başlatılmaktadır. Veriler öncelikle **Intermediate** çalışma sayfasına aktarılmakta, ardından meteorolojik değişken türlerine göre ayrıştırılarak **Precip**, **TMax**, **TMin** ve **SolRad** çalışma sayfalarına dağıtılmaktadır. Veri aktarım ve düzenleme işlemlerinin tamamlanmasının ardından, gelecekteki iklim koşullarını temsil edecek yeni CLIGEN dosyasının oluşturulması için gerekli hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle klasör seçiminin doğru yapılması büyük önem taşımaktadır. Eksik veya hatalı bir klasörün seçilmesi durumunda makrolar gerekli dosyalara erişemeyecek, veri aktarım süreci tamamlanamayacak ve yeni iklim dosyalarının oluşturulması mümkün olmayacaktır. Bu nedenle kullanıcıların, MarkSim tarafından oluşturulan tüm çıktı dosyalarını içeren klasörü seçtiklerinden emin olmaları gerekmektedir.



Şekil X. *Create WEPP Files* komutu çalıştırıldıktan sonra görüntülenen ve MarkSim çıktı dosyalarının bulunduğu klasörün seçilmesini isteyen ileti penceresi.

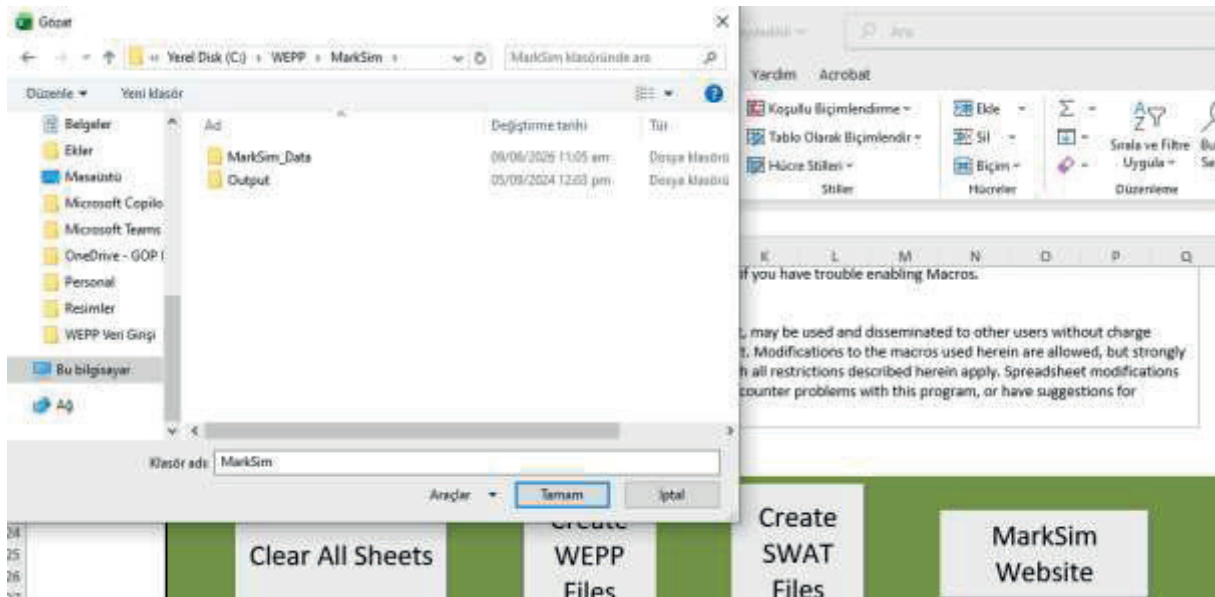
1.3.4. MarkSim Çıktı Klasörünün Seçilmesi

Kullanıcı, ****Create WEPP Files**** komutunu çalıştırdıktan sonra açılan dosya seçim penceresi aracılığıyla MarkSim tarafından oluşturulan iklim verilerinin bulunduğu klasörü seçmektedir. Şekilde görüldüğü üzere sistem, kullanıcıdan MarkSim çıktı dosyalarının yer aldığı dizini belirtmesini istemektedir.

Şekil çalışma dizini ****C:\WEPP\MarkSim**** klasörü altında oluşturulmuş olup, ****MarkSim_Data**** ve ****Output**** adlı iki alt klasör bulunmaktadır. MarkSim tarafından oluşturulan iklim verileri genellikle ****MarkSim_Data**** klasöründe saklanırken, oluşturulan yeni CLIGEN dosyaları belirtilen çıktı klasörüne kaydedilmektedir.

Kullanıcı ilgili klasörü seçip işlemi onayladıktan sonra program, seçilen dizindeki MarkSim çıktı dosyalarını okuyarak veri aktarım sürecini başlatmaktadır. Aktarılan veriler daha sonra çalışma kitabındaki ilgili sayfalara dağıtılmakta ve WEPP modeli için gerekli iklim parametrelerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

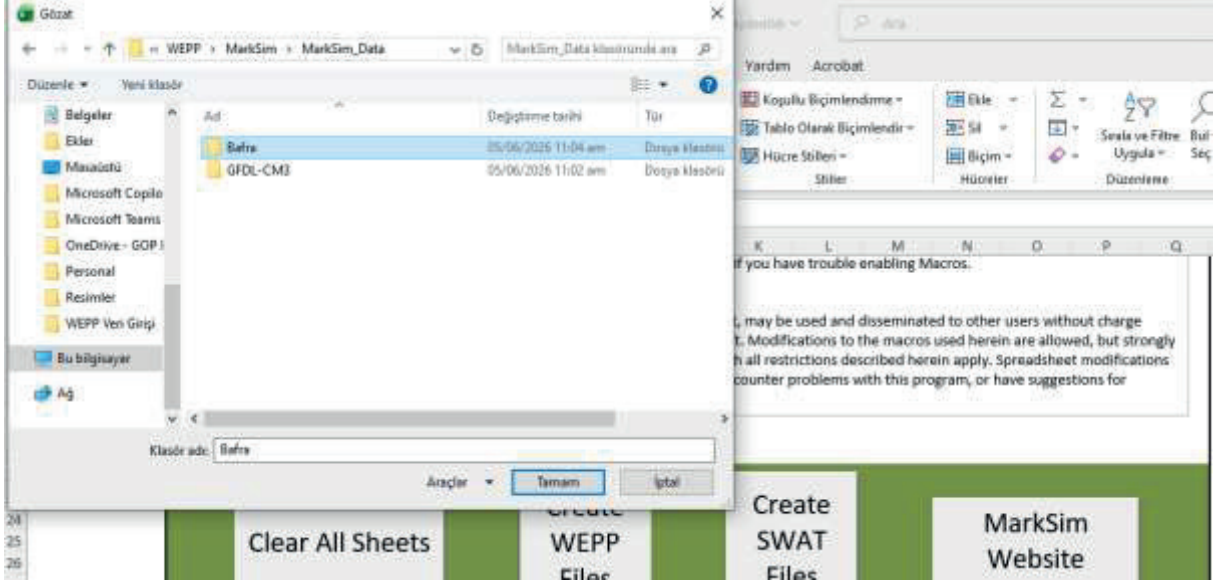
Dosya seçim işleminin doğru yapılması büyük önem taşımaktadır. Seçilen klasörün MarkSim tarafından oluşturulan günlük meteorolojik verileri eksiksiz olarak içermesi gerekmektedir. Aksi halde veri aktarım süreci tamamlanamayacak ve gelecekteki iklim koşullarını temsil eden yeni CLIGEN dosyalarının oluşturulması mümkün olmayacaktır.



Şekil X. MarkSim çıktı dosyalarının bulunduğu klasörün seçilmesi için görüntülenen dosya tarama penceresi. Kullanıcı bu aşamada MarkSim tarafından oluşturulan iklim verilerinin yer aldığı klasörü seçerek veri aktarım sürecini başlatmaktadır.

1.3.5. Çalışma Alanı ve İklim Modeli Klasörünün Seçilmesi

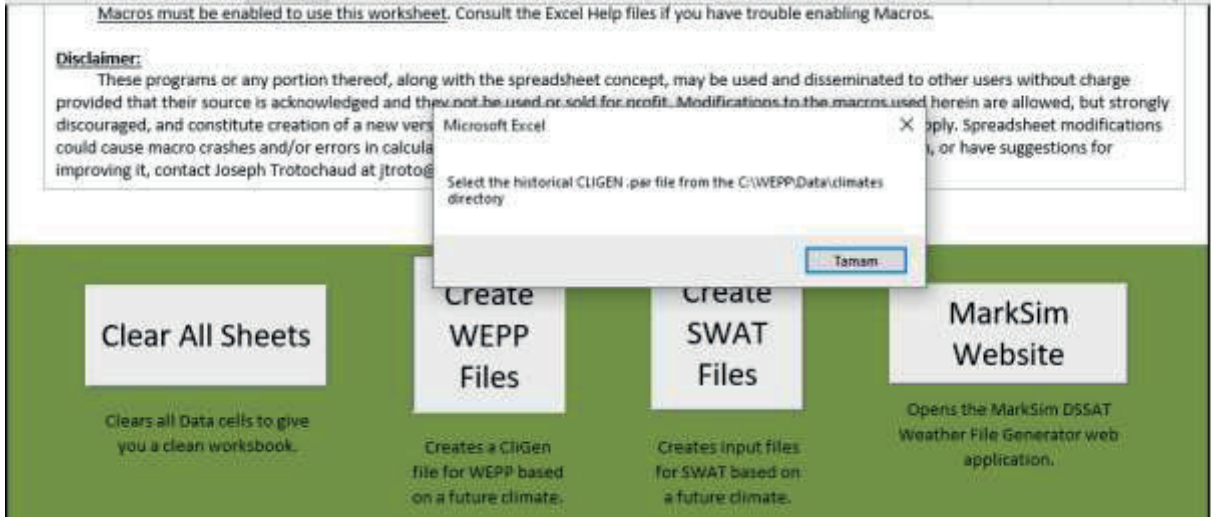
MarkSim çıktı klasörü seçildikten sonra kullanıcı, analiz yapılacak çalışma alanına ve kullanılacak iklim modeline ait klasörleri belirlemektedir. Şekilde görüldüğü üzere ****MarkSim_Data**** dizini içerisinde çalışma alanını temsil eden ****Bafra**** klasörü ile küresel iklim modeline ait ****GFDL-CM3**** klasörü bulunmaktadır. Bu aşamada öncelikle çalışma alanını temsil eden klasör seçilmektedir. Örnekte seçilen ****Bafra**** klasörü, gelecekteki iklim koşullarının değerlendirileceği araştırma alanına ait verileri içermektedir. Kullanıcı ilgili klasörü seçerek analiz sürecinin bir sonraki aşamasına geçmektedir. MarkSim veri yapısında genellikle ilk klasör çalışma alanını veya koordinat noktasını, alt klasörler ise farklı Küresel İklim Modellerini (Global Climate Models, GCM) temsil etmektedir. Bu yapı sayesinde aynı çalışma alanı için birden fazla iklim modeli kullanılarak geleceğe yönelik iklim projeksiyonları oluşturulabilmekte ve model kaynaklı belirsizlikler değerlendirilebilmektedir. Klasör seçimi tamamlandıktan sonra makro programı ilgili model verilerini okumaya başlamakta ve günlük meteorolojik değişkenleri çalışma kitabına aktarmaktadır. Daha sonraki aşamalarda bu veriler kullanılarak istatistiksel özetler hazırlanmakta ve WEPP modelinde kullanılacak yeni CLIGEN .par) dosyası oluşturulmaktadır.



Şekil X. *MarkSim_Data* dizini içerisinde çalışma alanına ait klasörün seçilmesi. Bu aşamada kullanıcı analiz yapılacak lokasyona ait klasörü belirleyerek iklim verilerinin aktarım sürecini başlatmaktadır.

1.3.6.Çalışma Alanı ve İklim Modeli Klasörünün Seçilmesi

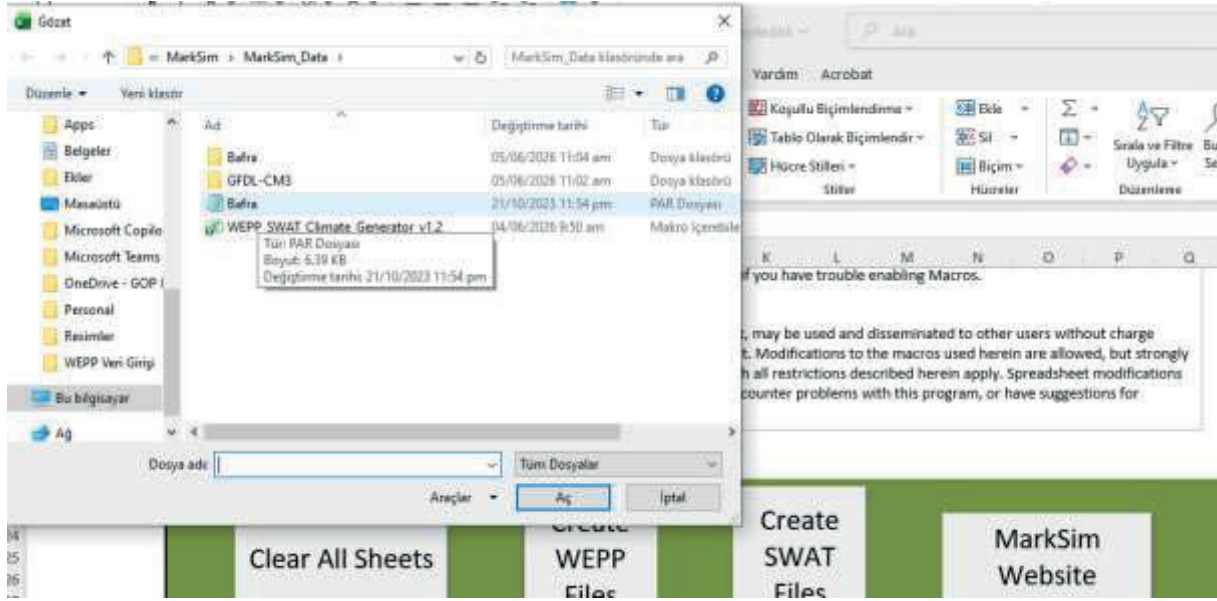
MarkSim çıktı klasörü seçildikten sonra program, kullanıcıdan WEPP modelinde kullanılan tarihsel iklim dosyasını (**CLIGEN .par dosyası**) seçmesini istemektedir. Bu aşamada ekranda **“Select the historical CLIGEN .par file from the C:\WEPP\Data\climates directory”** mesajını içeren bir ileti penceresi görüntülenmektedir. Seçilen CLIGEN dosyası, geleceğe yönelik iklim senaryolarının oluşturulmasında temel referans veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Dosya içerisinde aylık yağış istatistikleri, maksimum ve minimum sıcaklık değerleri, yağış karakteristikleri, rüzgâr parametreleri ve diğer CLIGEN iklim değişkenlerine ait bilgiler yer almaktadır. Makro programı bu bilgileri kullanarak MarkSim tarafından üretilen gelecek iklim verilerini mevcut iklim koşullarıyla ilişkilendirmektedir. Tarihsel CLIGEN dosyasının seçilmesi özellikle önemlidir çünkü MarkSim tarafından doğrudan üretilmeyen bazı meteorolojik değişkenler (örneğin rüzgâr özellikleri ve yağış dağılım parametreleri) bu dosyadan alınmaktadır. Böylece geleceğe yönelik yeni iklim dosyaları oluşturulurken eksik parametreler tarihsel kayıtlar kullanılarak tamamlanabilmektedir. Kullanıcı ilgili .par dosyasını seçip işlemi onayladıktan sonra program gerekli parametreleri çalışma kitabına aktarmakta ve gelecekteki iklim koşullarını temsil edecek yeni CLIGEN dosyasının hazırlanması sürecine geçmektedir.



Şekil X. MarkSim verileri ile ilişkilendirilecek gözlenen CLIGEN (.par) dosyasının seçilmesini isteyen ileti penceresi. Bu aşamada kullanıcı, WEPP modelinde kullanılan referans iklim dosyasını belirleyerek geleceğe yönelik iklim senaryolarının oluşturulması için gerekli temel verileri programa tanıtmaktadır.

1.3.7. CLIGEN Dosyasının Programa Aktarılması

Bu aşamada kullanıcı, çalışma alanına ait tarihsel iklim verilerini temsil eden **CLIGEN (.par)** dosyasını seçmektedir. Şekilde görüldüğü üzere dosya seçim penceresinde yer alan **Bafra.par** dosyası seçilerek programa tanıtılmaktadır. Bu dosya, çalışma alanına ait uzun dönemli iklim istatistiklerini içermekte ve geleceğe yönelik iklim senaryolarının oluşturulmasında referans veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Kullanıcı ilgili dosyayı seçip **Aç (Open)** düğmesine bastığında program, CLIGEN dosyasında yer alan meteorolojik parametreleri okuyarak çalışma kitabına aktarmaktadır. Aktarılan veriler daha sonraki aşamalarda MarkSim tarafından üretilen iklim projeksiyonları ile birleştirilmekte ve WEPP modelinde kullanılacak yeni iklim dosyasının oluşturulmasında kullanılmaktadır. Bu işlem sayesinde çalışma alanına ait mevcut iklim özellikleri ile geleceğe yönelik iklim projeksiyonları ilişkilendirilmekte ve WEPP modelinin ihtiyaç duyduğu meteorolojik parametreleri içeren bütünlüklü bir iklim veri seti oluşturulmaktadır.



Şekil X. Araştırma alanına ait tarihsel CLIGEN (.par) dosyasının seçilmesi. Bu aşamada kullanıcı, gelecekteki iklim projeksiyonlarının oluşturulmasında referans olarak kullanılacak tarihsel iklim dosyasını programa tanıtmaktadır.

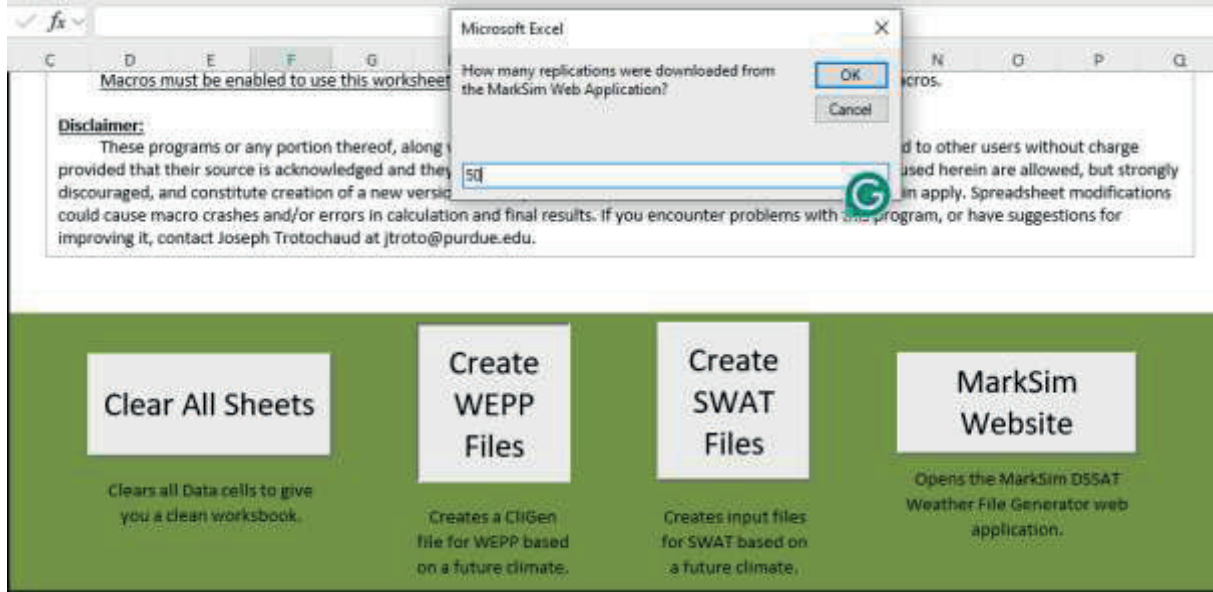
1.3.8. İklim Tekrarlarının (Replications) Sayısının Girilmesi

Gözlenen CLIGEN dosyasının seçilmesinin ardından program, MarkSim web uygulamasından indirilen iklim verilerine ait tekrar (**replication**) sayısını kullanıcıdan istemektedir. Bu aşamada ekranda “**How many replications were downloaded from the MarkSim Web Application?**” mesajı görüntülenmekte ve kullanıcıdan indirilen tekrar sayısını girmesi beklenmektedir.

MarkSim DSSAT Weather Generator, aynı iklim senaryosu için birden fazla stokastik iklim serisi üretebilmektedir. Bu tekrarlar, gelecekteki iklim koşullarında ortaya çıkabilecek doğal değişkenliğin temsil edilmesine olanak sağlamakta ve model sonuçlarının belirsizliklerinin değerlendirilmesine katkıda bulunmaktadır. Kullanıcı bu aşamada MarkSim'den indirdiği tekrar sayısını ilgili kutuya girerek veri aktarım sürecinin doğru şekilde yürütülmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada tekrar sayısı olarak **50** değeri kullanılmıştır. Farklı tekrar sayılarının değerlendirildiği çalışmalarda, 50 tekrarın iklim değişkenliğini temsil etmede yeterli olduğu ve güvenilir sonuçlar sağladığı bildirilmiştir (Trotochaud, 2014). Bu nedenle geleceğe yönelik WEPP iklim dosyalarının oluşturulmasında 50 tekrar kullanılması önerilmektedir. Kullanıcı tekrar sayısını girdikten sonra **OK** düğmesine basarak işlemi onaylamaktadır. Program daha sonra belirtilen sayıdaki iklim serisini okuyarak çalışma kitabındaki ilgili sayfalara aktarmakta ve istatistiksel değerlendirme sürecini başlatmaktadır. Bu adımın doğru şekilde gerçekleştirilmesi önemlidir. Girilen tekrar sayısının, MarkSim'den indirilen veri setindeki

gerçek tekrar sayısı ile aynı olması gerekmektedir. Aksi durumda veri aktarımında eksiklikler oluşabilir veya bazı iklim serileri işlenemeyebilir.



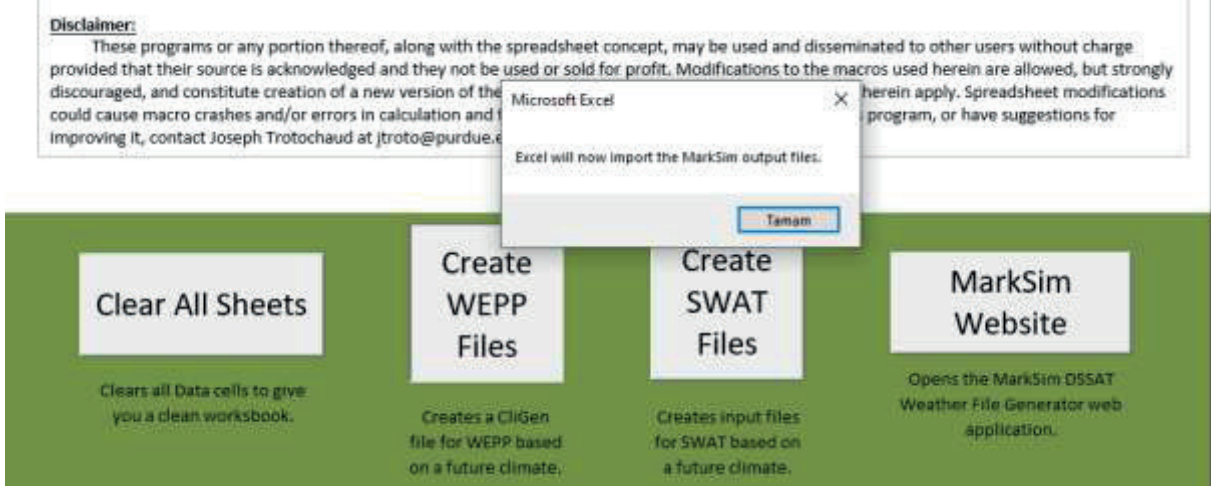
Şekil X. MarkSim web uygulamasından indirilen iklim tekrarlarının (replications) sayısının girildiği ileti penceresi. Bu örnekte analizlerde kullanılmak üzere 50 tekrar değeri seçilmiştir.

1.3.9. MarkSim Çıktılarının Excel Çalışma Kitabına Aktarılması

Tekrar (**replication**) sayısının girilmesinin ardından program veri aktarım aşamasına geçmektedir. Bu aşamada ekranda “**Excel will now import the MarkSim output files.**” mesajı görüntülenerek kullanıcıya MarkSim tarafından oluşturulan iklim verilerinin çalışma kitabına aktarılacağı bildirilmektedir. Bu işlem sırasında makrolar, daha önce seçilen MarkSim klasöründe bulunan tüm iklim dosyalarını okuyarak verileri Excel çalışma kitabına aktarmaktadır. Aktarılan veriler öncelikle **Intermediate** çalışma sayfasına yüklenmekte, ardından meteorolojik değişken türlerine göre ayrıştırılarak **Precip**, **TMax**, **TMin** ve **SolRad** çalışma sayfalarına dağıtılmaktadır.

Veri aktarım süreci boyunca program, her bir tekrara ait günlük meteorolojik kayıtları okuyarak düzenlemekte ve sonraki analizlerde kullanılabilecek standart bir veri yapısı oluşturmaktadır. Böylece geleceğe yönelik iklim senaryolarına ait günlük yağış, sıcaklık ve güneş radyasyonu verileri çalışma kitabı içerisinde sistematik bir şekilde depolanmaktadır. Veri aktarım işleminin tamamlanmasının ardından program, iklim verilerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, tarihsel CLIGEN parametreleriyle ilişkilendirilmesi ve gelecekteki iklim koşullarını temsil edecek yeni CLIGEN dosyasının oluşturulması aşamalarına otomatik olarak geçmektedir.

Bu aşama, MarkSim–WEPP entegrasyon sürecinin temel veri işleme adımını oluşturmaktadır. Veri aktarımının başarıyla tamamlanması, sonraki analizlerin doğru şekilde yürütülebilmesi ve güvenilir iklim dosyalarının oluşturulabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



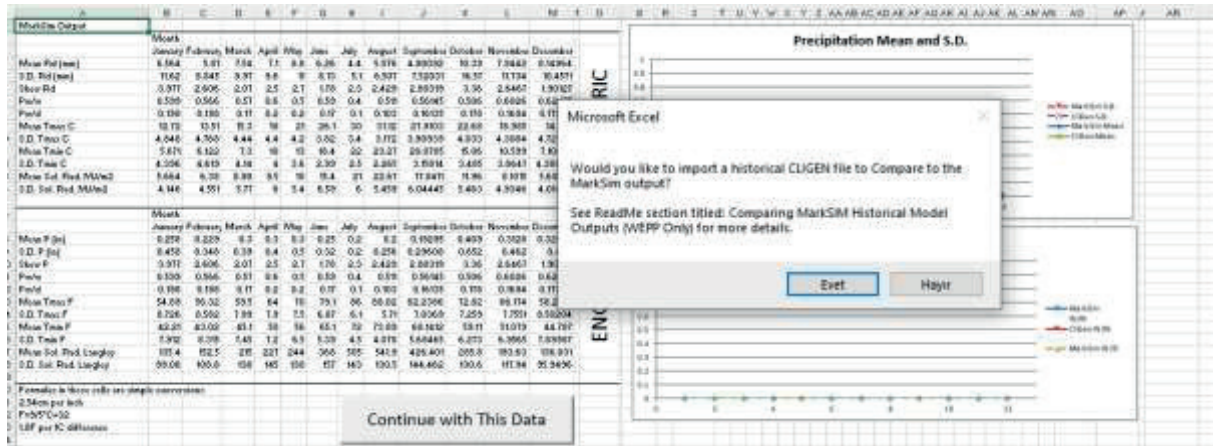
Şekil X. MarkSim çıktı dosyalarının Excel çalışma kitabına aktarılacağını bildiren ileti penceresi. Kullanıcının onay vermesinin ardından program, seçilen klasördeki tüm iklim verilerini okuyarak çalışma sayfalarına aktarmaya başlamaktadır.

1.3.10. MarkSim ve Gözlenen CLIGEN Verilerinin Karşılaştırılması

MarkSim çıktı dosyalarının çalışma kitabına aktarılması ve istatistiksel özetlerin oluşturulmasının ardından program, kullanıcıya gelecekteki iklim verilerinin tarihsel CLIGEN verileri ile karşılaştırılıp karşılaştırılmayacağını sormaktadır. Bu aşamada ekranda **“Would you like to import a historical CLIGEN file to compare to the MarkSim output?”** mesajı görüntülenmektedir.

Bu seçenek, MarkSim tarafından üretilen iklim verilerinin tarihsel iklim koşullarıyla karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Kullanıcının **“Yes”** seçeneğini tercih etmesi durumunda program, tarihsel CLIGEN dosyasını çalışma kitabına aktararak iki veri seti arasında doğrudan karşılaştırma gerçekleştirmektedir. **“No”** seçeneğinin seçilmesi halinde ise süreç yalnızca MarkSim verileri kullanılarak devam etmektedir.

Karşılaştırma işlemi sonucunda aylık ortalamalar ve standart sapmalar grafikler halinde sunulmaktadır. Yağış, maksimum ve minimum sıcaklık ile diğer meteorolojik değişkenlere ait grafikler incelenerek MarkSim tarafından oluşturulan verilerin tarihsel iklim kayıtlarıyla olan benzerlikleri ve farklılıkları değerlendirilebilmektedir. Bu grafikler aynı zamanda veri aktarım ve işleme süreçlerinin doğru şekilde tamamlanıp tamamlanmadığının kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle MarkSim tarafından oluşturulan iklim verilerinin çalışma alanının mevcut iklim özelliklerini ne ölçüde temsil ettiğinin değerlendirilmesi açısından yararlıdır. Böylece kullanıcılar, geleceğe yönelik iklim projeksiyonlarını modelleme çalışmalarında kullanmadan önce veri setlerinin uygunluğunu inceleyebilmektedir. Şekilde, yağış ortalaması ve standart sapması (**Precipitation Mean and S.D.**) başta olmak üzere çeşitli meteorolojik değişkenlere ait karşılaştırma grafikleri görülmektedir. Bu grafikler, MarkSim ve tarihsel CLIGEN verileri arasındaki farklılıkların görsel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.



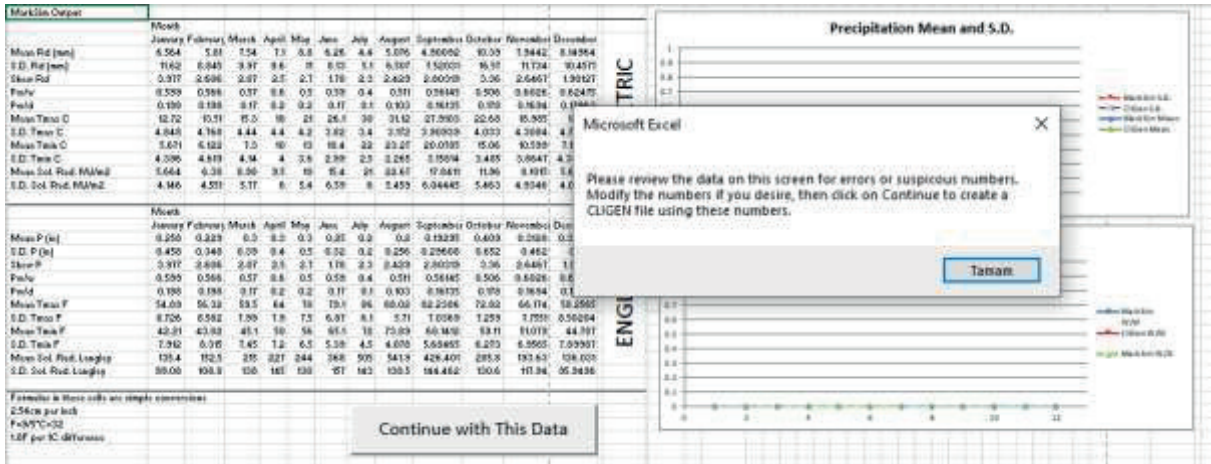
Şekil X. MarkSim çıktı verilerinin tarihsel CLIGEN dosyası ile karşılaştırılıp karşılaştırılmayacağını soran ileti penceresi ve oluşturulan karşılaştırma grafikleri. Bu aşama, üretilen iklim verilerinin doğrulanması ve kalite kontrolünün yapılabilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

1.3.11. MarkSim Verilerinin Değerlendirilmesi ve Yeni CLIGEN Dosyasının Oluşturulması

MarkSim çıktı dosyalarının çalışma kitabına aktarılması ve aylık istatistiksel özetlerin hesaplanmasının ardından program kullanıcıya son bir kontrol aşaması sunmaktadır. Bu aşamada ekranda **“Please review the data on this screen for errors or suspicious numbers. Modify the numbers if you desire, then click on Continue to create a CLIGEN file using these numbers.”** mesajı görüntülenmektedir.

Bu aşamanın amacı, oluşturulan iklim istatistiklerinin yeni CLIGEN dosyasına aktarılmadan önce kullanıcı tarafından gözden geçirilmesidir. Kullanıcı, çalışma sayfasında yer alan aylık ortalama yağış, standart sapma, çarpıklık katsayısı (*skewness*), yağış olasılıkları, maksimum ve minimum sıcaklıklar, güneş radyasyonu ve diğer iklim parametrelerini inceleyerek olağan dışı veya beklenmeyen değerlerin bulunup bulunmadığını değerlendirebilmektedir.

Ekranın sol bölümünde MarkSim verilerinden hesaplanan aylık iklim istatistikleri tablo halinde sunulurken, sağ bölümde yağış ve diğer meteorolojik değişkenlere ait karşılaştırmalı grafikler yer almaktadır. Bu grafikler sayesinde aylık dağılımların genel eğilimi hızlı bir şekilde değerlendirilebilmekte ve veri aktarımı sırasında oluşabilecek olası hatalar tespit edilebilmektedir. Program, gerekli görüldüğü durumlarda ilgili değerlerin kullanıcı tarafından düzenlenmesine de olanak sağlamaktadır. Ancak herhangi bir hata veya tutarsızlık tespit edilmediği sürece hesaplanan değerlerin değiştirilmeden kullanılması önerilmektedir. Veri kontrolü tamamlandıktan sonra kullanıcı **“Continue with This Data”** düğmesine basarak işlemi onaylamaktadır. Kullanıcı onayının ardından makrolar, gözden geçirilen iklim istatistiklerini kullanarak gelecekteki iklim koşullarını temsil eden yeni CLIGEN (.par) dosyasını oluşturmakta ve WEPP modelinde kullanılabilecek formatta kaydetmektedir. Böylece kalite kontrol süreci tamamlanmakta ve geleceğe yönelik iklim senaryoları WEPP modelinde kullanılmaya hazır hale gelmektedir.



Şekil X. MarkSim verilerinden hesaplanan aylık iklim istatistiklerinin ve karşılaştırma grafiklerinin görüntülediği kalite kontrol ekranı. Kullanıcı bu aşamada verileri inceleyerek doğrulamakta ve ardından yeni CLIGEN dosyasının oluşturulması için işlemi onaylamaktadır.

1.3.12.MarkSim ve CLIGEN Verilerinin İstatistiksel Karşılaştırılması

MarkSim verilerinin çalışma kitabına aktarılmasının ardından program, aylık iklim istatistiklerini tablo ve grafikler halinde sunarak kullanıcıya ayrıntılı bir karşılaştırma ve kalite kontrol imkânı sağlamaktadır. Bu ekran, MarkSim tarafından oluşturulan iklim verilerinin tarihsel CLIGEN verileri ile karşılaştırılabildiği temel değerlendirme aşamalarından birini oluşturmaktadır.

Ekranın sol bölümünde MarkSim çıktılarından hesaplanan aylık iklim istatistikleri yer almaktadır. Bu istatistikler arasında aylık ortalama yağış miktarı (Mean Rd), yağış standart sapması (S.D. Rd), arpıklık katsayısı (Skew P), yağışlı gün olasılıkları (Pw/w ve Pw/d), maksimum ve minimum sıcaklıklar ile güneş radyasyonu değerleri bulunmaktadır. Veriler, farklı model uygulamalarında kullanılabilmesi amacıyla hem metrik hem de İngiliz birim sisteminde sunulmaktadır.

Ekranın sağ bölümünde ise hesaplanan istatistiklerin grafiksel gösterimleri yer almaktadır. **Precipitation Mean and S.D.** grafiği, MarkSim tarafından oluşturulan yağış ortalamaları ve standart sapmalarının tarihsel CLIGEN değerleriyle karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede aylık yağış rejimindeki benzerlikler ve farklılıklar görsel olarak incelenebilmektedir.

Alt bölümde yer alan **Precipitation Probabilities** grafiği ise yağış oluşma olasılıklarını göstermektedir. Grafikte yağışlı günü takip eden yağışlı gün olasılığı (W/W) ile kurak günü takip eden yağışlı gün olasılığı (W/D), hem MarkSim hem de CLIGEN verileri için ayrı ayrı sunulmaktadır. Bu karşılaştırma, gelecekteki iklim senaryolarında yağış sürekliliği ve yağış dizilerindeki olası değişimlerin değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır.

Bu ekranın temel amacı, MarkSim tarafından oluşturulan iklim verilerinin çalışma alanının mevcut iklim özellikleriyle uyumunu incelemektir. Kullanıcı, tablo ve grafikleri değerlendirerek olağan dışı değerleri belirleyebilmekte, gerekli durumlarda düzeltmeler yapabilmekte ve verilerin uygunluğundan emin olduktan sonra **“Continue with This Data”** düğmesine basarak yeni CLIGEN dosyasının oluşturulması sürecine devam edebilmektedir.



Şekil X. MarkSim çıktılarından elde edilen aylık iklim istatistiklerinin ve tarihsel CLIGEN verileriyle karşılaştırılmasına yönelik grafiklerin görüntülediği kalite kontrol ekranı. Bu aşama, oluşturulan iklim senaryolarının doğrulanması ve yeni CLIGEN dosyasının hazırlanmasından önce gerçekleştirilen son değerlendirme adımı oluşturmaktadır.

1.3.13.Yeni CLIGEN Dosyasının Oluşturulması

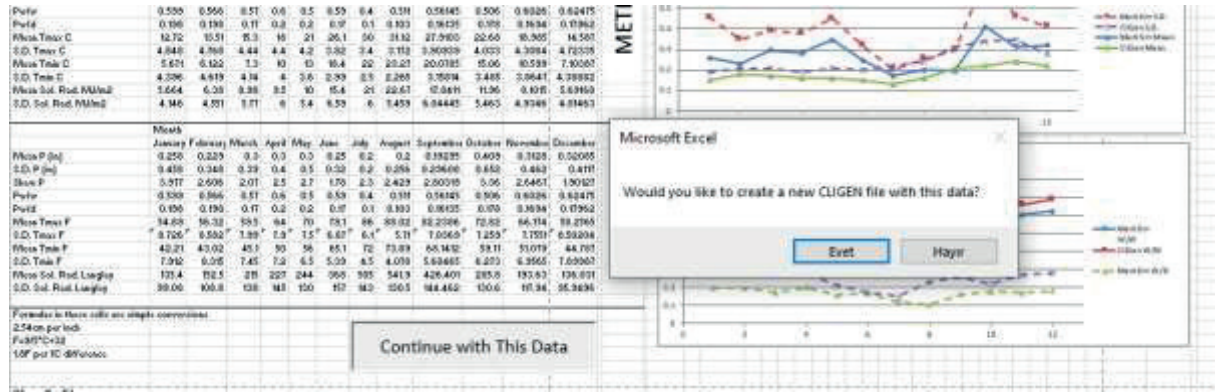
MarkSim verilerinin incelenmesi ve kalite kontrol işlemlerinin tamamlanmasının ardından program kullanıcıya son bir onay penceresi göstermektedir. Bu aşamada ekranda **“Would you like to create a new CLIGEN file with this data?”** mesajı görüntülenmekte ve kullanıcıdan oluşturulan iklim istatistiklerinin yeni bir CLIGEN dosyasına dönüştürülüp dönüştürülmeyeceğine karar vermesi istenmektedir.

Kullanıcının **“Yes”** seçeneğini tercih etmesi durumunda program, daha önce hesaplanan iklim parametrelerini kullanarak yeni bir CLIGEN (.par) dosyası oluşturmaktadır. Bu dosya, MarkSim tarafından üretilen geleceğe yönelik iklim verileri ile tarihsel CLIGEN dosyasından alınan gerekli meteorolojik parametreleri bir araya getirerek WEPP modelinde kullanılabilir standart formatta düzenlenmektedir.

Oluşturulan CLIGEN dosyası; aylık yağış istatistikleri, yağış olasılıkları, maksimum ve minimum sıcaklıklar, güneş radyasyonu, çiy noktası sıcaklığı ve diğer iklim parametrelerine ilişkin bilgileri içermektedir. Böylece gelecekteki iklim koşullarını temsil eden ve WEPP modelinde kullanılabilir bir iklim veri seti elde edilmektedir.

Kullanıcının **“No”** seçeneğini tercih etmesi durumunda ise dosya oluşturma işlemi sonlandırılmakta ve kullanıcı mevcut verileri yeniden inceleme veya gerekli düzenlemeleri yapma olanağına sahip olmaktadır.

Bu aşama, MarkSim–WEPP entegrasyon sürecinin son adımını oluşturmaktadır. Kullanıcı onayının ardından program yeni CLIGEN dosyasını oluşturmakta ve belirtilen dizine kaydetmektedir. Oluşturulan dosya, WEPP modelinde kullanılarak gelecekteki iklim koşullarının yüzey akışı, sediment taşınımı ve toprak kaybı üzerindeki olası etkilerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil X. Kalite kontrolü tamamlanan iklim verileri kullanılarak yeni bir CLIGEN dosyası oluşturulup oluşturulmayacağını soran onay penceresi. Kullanıcının “Evet” seçeneğini seçmesiyle birlikte gelecekteki iklim koşullarını temsil eden yeni CLIGEN (.par) dosyası oluşturulmaktadır.

1.3.14.Yeni CLIGEN Dosyasının Kaydedileceği Klasörün Belirlenmesi

Yeni CLIGEN dosyasının oluşturulması onaylandıktan sonra program, kullanıcıdan oluşturulacak iklim dosyasının kaydedileceği konumu seçmesini istemektedir. Bu aşamada ekranda “Select the folder where you would like the new CLIGEN file to be saved.” mesajı görüntülenmektedir.

Bu işlem, gelecekteki iklim koşullarını temsil eden yeni **CLIGEN (.par)** dosyasının hangi dizinde saklanacağını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Kullanıcı uygun bir klasör seçerek dosyanın kaydedileceği konumu tanımlamaktadır. Genellikle bu klasör, proje dosyalarının bulunduğu çalışma dizini veya WEPP analizlerinin yürütüldüğü proje klasörü olmaktadır.

Şekilde görüldüğü üzere, bu aşamada CLIGEN dosyasının içeriği tamamen oluşturulmuş durumdadır. Çalışma sayfasında aylık yağış istatistikleri, yağış olasılıkları, maksimum ve minimum sıcaklıklar, güneş radyasyonu, çiy noktası sıcaklığı ve diğer meteorolojik parametreler CLIGEN formatına uygun şekilde düzenlenmiş olarak yer almaktadır. Program bu verileri kullanarak yeni iklim dosyasını oluşturmaya hazır durumdadır.

Kullanıcının klasör seçimini tamamlayıp işlemi onaylamasının ardından makro programı, oluşturulan iklim verilerini **.par** uzantılı bir CLIGEN dosyası olarak belirtilen dizine kaydetmektedir. Böylece gelecekteki iklim senaryolarını temsil eden dosya WEPP modelinde doğrudan kullanılabilir hale gelmektedir.

Bu aşama MarkSim–WEPP entegrasyon sürecinin son adımlarından biridir ve başarılı bir şekilde tamamlanmasıyla birlikte gelecekteki iklim projeksiyonlarına dayalı erozyon, yüzey akışı ve sediment taşınımı analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

[illegible]

Şekil X. Oluşturulan yeni CLIGEN (.par) dosyasının kaydedileceği klasörün seçilmesini isteyen ileti penceresi. Kullanıcı bu aşamada dosyanın saklanacağı konumu belirleyerek iklim senaryosunun oluşturulma sürecini tamamlamaktadır.

1.3.15. CLIGEN Dosyasının Kaydedileceği Dizin Seçimi

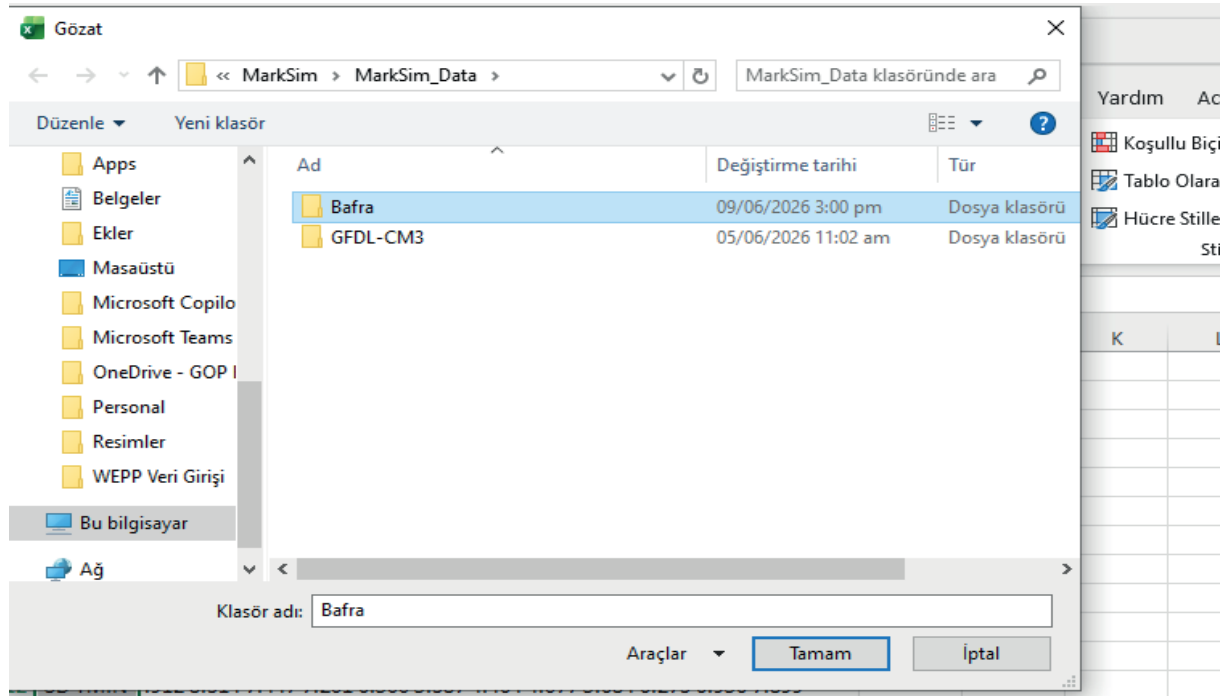
Yeni CLIGEN dosyasının oluşturulmasına onay verildikten sonra program, kullanıcıdan oluşturulan iklim dosyasının kaydedileceği klasörü seçmesini istemektedir. Bu aşamada standart dosya tarama penceresi açılmakta ve kullanıcıya kayıt konumunu belirleme imkânı sunulmaktadır.

şekilde görüldüğü üzere kullanıcı, **MarkSim_Data** dizini içerisinde bulunan **Bafra** klasörünü seçmiştir. Bu klasör, oluşturulacak yeni CLIGEN dosyasının kaydedileceği hedef dizin olarak belirlenmektedir. Dosyanın proje klasörü içerisinde saklanması, iklim senaryolarının düzenli bir şekilde yönetilmesi ve sonraki analizlerde kolay erişim sağlanması açısından avantaj sağlamaktadır.

Kullanıcı klasörü seçip **Tamam** düğmesine bastığında program, daha önce hesaplanan iklim parametrelerini kullanarak yeni CLIGEN (**.par**) dosyasını oluşturmakta ve seçilen klasöre kaydetmektedir. Böylece gelecekteki iklim koşullarını temsil eden yeni iklim dosyası WEPP modelinde kullanılmaya hazır hale gelmektedir.

Bu işlem, MarkSim–WEPP entegrasyon sürecinin son kayıt aşamasını oluşturmaktadır. Dosyanın başarıyla kaydedilmesinin ardından kullanıcı, oluşturulan CLIGEN dosyasını WEPP modelinin iklim dizinine aktarabilir veya doğrudan yeni bir WEPP projesinde kullanabilir.

Proje yönetimi açısından, oluşturulan CLIGEN dosyalarının çalışma alanı, iklim modeli ve senaryo bilgilerini yansıtacak şekilde ayrı klasörlerde saklanması önerilmektedir. Bu yaklaşım, farklı iklim projeksiyonlarının düzenli bir biçimde arşivlenmesine yardımcı olmakta ve sonraki analizlerde oluşabilecek karışıklıkları azaltmaktadır.



şekil X. Oluşturulan yeni CLIGEN (.par) dosyasının kaydedileceği klasörün seçildiği dosya tarama penceresi. Bu örnekte kullanıcı, dosyanın saklanacağı hedef dizin olarak Bafra klasörünü belirlemektedir.

1.3.16.Yeni CLIGEN Dosyasının Adlandırılması

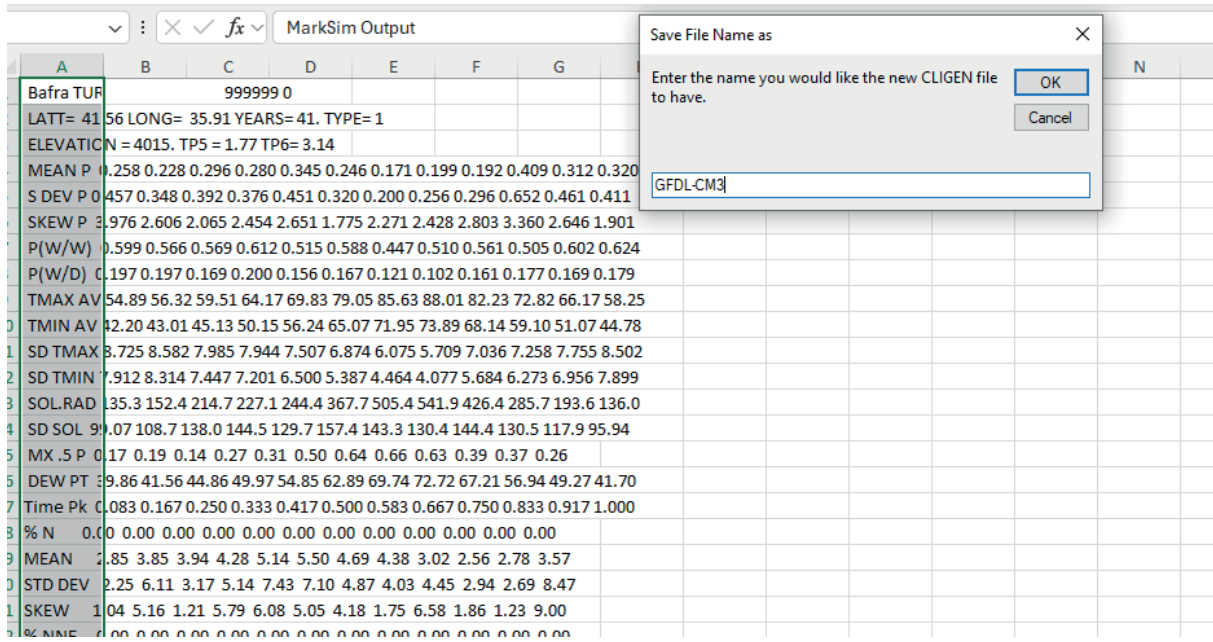
Kaydedilecek klasör seçildikten sonra program, oluşturulacak yeni CLIGEN dosyasına verilecek adı kullanıcıdan istemektedir. Bu aşamada ekranda **“Enter the name you would like the new CLIGEN file to have”** mesajı görüntülenmekte ve kullanıcı tarafından dosya adı belirlenmektedir.

Şekilde görüldüğü üzere oluşturulacak iklim dosyası için **“GFDL-CM3”** adı girilmiştir. Bu isimlendirme, geleceğe yönelik iklim projeksiyonlarının üretildiği Küresel İklim Modelini (Global Climate Model, GCM) ifade etmektedir. Böylece farklı iklim modelleri kullanılarak oluşturulan CLIGEN dosyaları kolaylıkla ayırt edilebilmekte ve sonraki analizlerde karışıklık yaşanması önlenmektedir.

Bu aşamada kullanıcı tarafından girilen dosya adı, seçilen kayıt klasörü içerisinde oluşturulacak **.par** uzantılı CLIGEN dosyasının temel adını oluşturmaktadır. Kullanıcı **OK** düğmesine bastığında program, hesaplanan iklim parametrelerini kullanarak yeni iklim dosyasını oluşturmakta ve belirtilen isimle kaydetmektedir.

Birden fazla iklim modeli veya farklı iklim değişikliği senaryolarının değerlendirildiği çalışmalarda, dosya adlarının kullanılan model ve senaryo bilgilerini içerecek şekilde düzenlenmesi önerilmektedir. Örneğin; **GFDL-CM3, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR** veya **Ensemble_Average** gibi isimlendirmeler veri yönetimini kolaylaştırmakta ve farklı projeksiyonların izlenebilirliğini artırmaktadır.

Bu işlemin tamamlanmasıyla birlikte gelecekteki iklim koşullarını temsil eden yeni CLIGEN dosyası oluşturulmuş olmaktadır. Oluşturulan dosya daha sonra WEPP modeline tanımlanarak iklim değişikliğinin yüzey akışı, sediment taşınımı ve toprak kaybı üzerindeki olası etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir.



Şekil X. Oluşturulacak yeni CLIGEN (.par) dosyasına isim verilmesi aşaması. Bu örnekte kullanıcı, gelecekteki iklim senaryosunu temsil eden dosya için “GFDL-CM3” adını belirlemektedir.

2. Sonuç ve Gelecek Projeksiyonu

Bu çalışma kapsamında ele alınan MarkSim ve CLIGEN entegrasyonu, küresel iklim değişikliği projeksiyonlarının yerel ölçekteki etki analizlerine (tarım, hidroloji, erozyon kontrolü vb.) dönüştürülmesinde kritik bir metodolojik köprü teşkil etmektedir. Küresel İklim Modellerinin kaba mekânsal çözünürlüğü ve beraberinde getirdiği belirsizlikler (Solman & Núñez, 1999; Tebaldi & Knutti, 2007), yerel düzeydeki karar alma süreçleri için doğrudan veri kullanımını kısıtlamaktadır. Bu noktada "aşağı ölçekleme" (downscaling) ihtiyacı (Wilby & Wigley, 1997), MarkSim'in üçüncü derece Markov zinciri kullanan stokastik yapısı ve dünya genelindeki 9.200'den fazla istasyondan elde edilen iklim kümeleriyle eğitilmiş mimarisiyle etkin bir şekilde karşılanmaktadır (Alam et al., 2021).

5.1. Metodolojik Entegrasyonun Avantajları ve Validasyonun Rolü

MarkSim modelinin sunduğu hiyerarşik veri işleme mimarisi (Devam.Pdf, n.d.), farklı GCM senaryolarının aynı platformda işlenmesine olanak tanıyarak çoklu model topluluğu (multi-model ensemble) yaklaşımının uygulanmasını kolaylaştırmaktadır (Tebaldi & Knutti, 2007). Modelin yerel ölçekteki temsil yeteneğini pekiştiren en önemli unsurlardan biri, CLIGEN (.par) dosyalarıyla sağlanan parametrik tamamlamadır. MarkSim'in stokastik olarak ürettiği temel meteorolojik verilere, tarihsel .par dosyalarından elde edilen aylık yağış istatistikleri, rüzgâr

karakteristikleri ve yağış yoğunluğu gibi alt-günlük (sub-daily) parametrelerin entegre edilmesi, modelin geçerliliği için hayati önem taşımaktadır ([Devam.Pdf, n.d.](#); [Qian et al., 2004](#)). Bu entegrasyon, WEPP veya SWAT gibi ileri düzey etki modellerinin ihtiyaç duyduğu fiziksel olarak tutarlı veri setlerinin oluşturulmasını sağlamaktadır ([Oo et al., 2020](#)).

Sistemin sunduğu 'Summary' arayüzü, akademik bir validasyon protokolü olarak kalite kontrol sürecinin merkezinde yer almaktadır. Kullanıcının; aylık ortalama yağış, standart sapma, yağış olasılıkları ve güneş radyasyonu gibi parametreleri 20. yüzyıl tarihsel kayıtlarıyla karşılaştırmasına olanak tanıyan bu arayüz ([Devam.Pdf, n.d.](#)), sentetik veri setlerindeki olası sistematik sapmaların (bias) tespit edilmesinde kritik bir "son karar noktası" işlevi görür ([Devam.Pdf, n.d.](#)). Bu şeffaf validasyon mekanizması, model çıktılarına dayalı olarak geliştirilecek olan adaptasyon stratejilerinin bilimsel güvenilirliğini artırmaktadır.

5.2. Gelecek Perspektifi ve Bilimsel Trendler

Gelecekteki iklim değişikliği çalışmaları, veri çözünürlüğünün artırılması ve belirsizlik yönetiminin daha sofistike hale getirilmesi ekseninde evrilmektedir. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalar için şu perspektifler önem kazanmaktadır:

- **Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi Entegrasyonu:** Stokastik hava durumu üreteçlerinin yapay zeka algoritmalarıyla hibritlenmesi, özellikle uç hava olaylarının (aşırı yağışlar ve sıcaklık dalgaları) simülasyonunda daha yüksek hassasiyet elde edilmesini sağlayacaktır ([Semenov, 2008](#); [Zounemat-Kermani et al., 2021](#)).
- **Yüksek Çözünürlüklü Veri Setleri:** CMIP6 gibi en güncel yüksek çözünürlüklü küresel veri setlerinin ([Gebrechorkos et al., 2023](#)), MarkSim benzeri araçların veri tabanlarına daha dinamik bir şekilde entegre edilmesi, yerel projeksiyonların doğruluğunu pekiştirecektir.
- **Hibrit Aşağı Ölçekleme Yaklaşımları:** Bölgesel İklim Modellerinden gelen dinamik aşağı ölçekleme çıktıları ile stokastik yöntemlerin birleştirilmesi, hesaplama maliyeti ile fiziksel tutarlılık arasındaki dengeyi optimize eden yeni bir standart haline gelecektir ([Racines et al., 2020](#)).
- **Çoklu Model Topluluklarının Genişletilmesi:** İklim projeksiyonlarındaki yapısal belirsizliklerin yönetimi için daha fazla GCM ve senaryo kombinasyonunun simülasyon süreçlerine dahil edilmesi, karar vericilere daha geniş ve dirençli bir spektrumda stratejik bilgi sunacaktır ([Alam et al., 2021](#); [Tebaldi & Knutti, 2007](#)).

Sonuç olarak; MarkSim ve CLIGEN entegrasyonu, günümüzün karmaşık iklim değişikliği sorunlarına karşı yerel çözümler üretilmesinde temel bir araçtır. Gelecekte bu tür aratların yapay zeka ve hibrit modelleme teknikleriyle zenginleştirilmesi, sürdürülebilir tarım ve su kaynakları yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde hayati bir rol oynamaya devam edecektir.