

TARIMDA SÜRDÜRÜLEBİLİR KAYNAK YÖNETİMİ:



SU, ÇEVRE VE TEKNOLOJİ

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Ali Beyhan UÇAK

Doç. Dr. Alper BAYDAR



**TARIMDA
SÜRDÜRÜLEBİLİR
KAYNAK YÖNETİMİ:
SU, ÇEVRE VE TEKNOLOJİ**

Editörler:

Prof. Dr. Ali Beyhan UÇAK

Doç. Dr. Alper BAYDAR



Tarımda Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi: Su, Çevre ve Teknoloji
Editörler: Prof. Dr. Ali Beyhan UÇAK, Doç. Dr. Alper BAYDAR

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN

Basım Tarihi: Temmuz 2026

Yayıncı Sertifika No: 49837

E-ISBN: 978-625-8936-09-4

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm	1
İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerindeki Etkileri ve Uyum Yaklaşımları	
Alper BAYDAR , Yeşim BOZKURT ÇOLAK Burak DALKILIÇ	
2. Bölüm	12
Dünya’da Farklı İklim ve Sulama Koşullarında Yetiştirilen Bazı Bitkilerin	
Klorofil İçeriğinin İrdelenmesi	
Yeşim BOZKURT ÇOLAK, Burak DALKILIÇ, Alper BAYDAR3	
3. Bölüm	34
Türkiye’de Tarım Ceza Hukuku: Sürdürülebilirlik,	
Çevre Koruma ve Gıda Güvenliği Ekseninde Suç ve Kabahatlerin Analizi	
Ayşe ÇALHAN, Ahmet ASLAN	
4. Bölüm	55
Tarımsal Kıymet Takdirinin Teorik Temelleri, Yöntemleri ve Tarım Sigortalarına	
Yansıması	
Hasan ATALAY, Ahmet ASLAN	
5. Bölüm	68
Tarımsal Sulamada Suyun Tasarruflu Kullanımı	
Ali Beyhan UÇAK	
6. Bölüm	84
Sulama Otomasyonu: Referans Evapotranspirasyon Tabanlı Nar Sulama	
Programının Gerçekleştirme Örneği	
Cafer GENÇOĞLAN, Serpil GENÇOĞLAN	

7. Bölüm 116

Damla Sulama Sistemlerinden Kaynaklanan Plastik Kirliliği ve Türkiye ile
Akdeniz Bölgesi İçin Yenilikçi, Sürdürülebilir Çözüm Stratejileri
Servet TEKİN

8. Bölüm 136

Tarla Bitkilerinde Sulama Suyu Yönetiminin Optimize Edilmesi
Su Yönetimi ve Verimli Sulama Kullanım İçin Stratejiler
Haq NAWAZ, Ulaş ŞENYİĞİT, Cengiz TÜRKAY, İlknur AKGÜN

1. Bölüm

İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerindeki Etkileri ve Uyum Yaklaşımları

Alper BAYDAR¹, Yeşim BOZKURT ÇOLAK² Burak DALKILIÇ²

1. Giriş

İklim değişikliği, günümüzde doğal sistemler, ekonomik faaliyetler ve toplumsal yaşam üzerinde çok yönlü etkiler oluşturan en önemli küresel çevre sorunlarından biridir. Küresel ölçekte gözlenen sıcaklık artışı, yalnızca atmosferin ısınmasıyla sınırlı kalmamakta; yağış rejimleri, buharlaşma süreçleri, kar ve buz örtüsü, toprak nemi, akarsu akımları ve yeraltı suyu beslenimi gibi hidrolojik döngünün temel bileşenlerini de etkilemektedir. Bu nedenle iklim değişikliği, su kaynakları açısından yalnızca gelecekte ortaya çıkabilecek bir risk değil, günümüzde su arzı, su talebi, tarımsal üretim, ekosistem sürekliliği ve su güvenliği üzerinde etkileri giderek belirginleşen bir baskı unsuru olarak değerlendirilmektedir.

Su kaynakları, iklim sistemindeki değişimlere karşı en duyarlı doğal kaynak gruplarından biridir. Yağışın miktarı, mevsimsel dağılımı ve şiddeti; sıcaklık artışına bağlı buharlaşma ve evapotranspirasyon kayıpları; kuraklık ve taşkın gibi ekstrem olayların sıklığı ile kar erimesi zamanlamasındaki değişimler, kullanılabilir su miktarını ve suyun yıl içindeki dağılımını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu etkiler her bölgede aynı yönde ve aynı şiddette ortaya çıkmamaktadır. Bazı bölgelerde aşırı yağışlar ve taşkın riski öne çıkarken, bazı bölgelerde kuraklık, toprak nemi kaybı, yeraltı suyu baskısı ve tarımsal sulama ihtiyacındaki artış daha belirgin hale gelmektedir.

2. İklim Değişikliğinin Kavramsal ve Fiziksel Temeli

İklim değişikliği, iklim sisteminin ortalama koşullarında, değişkenliğinde ve ekstrem olay karakterinde uzun dönemli değişimler meydana gelmesi olarak değerlendirilebilir. Bu değişimler doğal süreçlerle ilişkili olabilse de güncel bilimsel değerlendirmeler, sanayi öncesi dönemden bu yana gözlenen hızlı

¹ Siirt Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü, alper.baydar@siirt.edu.tr

² Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, yesim.colak@ozal.edu.tr

² Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, burak.dalkilic@ozal.edu.tr

ısınmanın temel belirleyicisinin insan kaynaklı sera gazı birikimi olduğunu göstermektedir. IPCC 6. Değerlendirme Raporu, insan faaliyetlerinin atmosfer, kara, okyanus ve kriyosfer üzerinde yaygın ve hızlı değişimlere yol açtığını; bu değişimlerin yalnızca sıcaklık ortalaması üzerinden değil, enerji dengesi, su döngüsü, ekosistemler ve insan sistemleri üzerinden birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (IPCC, 2023; Arias ve ark., 2021). Bu nedenle iklim değişikliği, sadece meteorolojik bir değişim değil, doğal kaynak yönetimi, tarım, enerji, şehirleşme, sağlık ve su güvenliği gibi çok sayıda alanı aynı anda etkileyen sistemik bir baskı unsurudur.

İklim sisteminin fiziksel temeli, Dünya'ya ulaşan kısa dalga güneş radyasyonu ile Dünya'dan uzaya yayılan uzun dalga radyasyon arasındaki enerji dengesine dayanır. Karbondioksit, metan ve diazot monoksit gibi sera gazları, yeryüzünden yayılan uzun dalga radyasyonun bir kısmını atmosferde tutarak doğal sera etkisini oluşturur. Doğal sera etkisi yaşam için gerekli sıcaklık koşullarını sağlarken, insan faaliyetleriyle artan sera gazı konsantrasyonları bu dengeyi güçlendirerek pozitif ışımsal zorlama oluşturur. Fosil yakıt kullanımı, sanayileşme, ormansızlaşma ve arazi kullanım değişiklikleri bu zorlama üzerinde belirleyici rol oynar.

İklim değişikliğinin anlaşılmasında doğal iklim değişkenliği ile insan kaynaklı iklim değişikliği arasındaki ayrım önemlidir. İklim sistemi El Niño-Güney Salınımı, volkanik püskürmeler, güneş etkinliği ve okyanus-atmosfer etkileşimleri gibi doğal süreçlerden etkilenir. Ancak bu doğal süreçler, özellikle son yüzyılda gözlenen sürekli ve yaygın ısınma eğilimini tek başına açıklamakta yetersiz kalmaktadır. IPCC değerlendirmeleri, gözlenen ısınmanın mekânsal yaygınlığı, okyanus ısı içeriğindeki artış, buz ve kar kütlelerindeki gerileme, deniz seviyesi yükselmesi ve atmosferik sera gazı derişimlerindeki artışın birlikte değerlendirildiğinde insan etkisinin baskın olduğunu göstermektedir (IPCC, 2021; IPCC, 2023). Bu anlamda iklim değişikliği, doğal salınımlar üzerine eklenen ve birçok iklim bileşenini aynı yönde zorlayan antropojenik bir süreç olarak ele alınmalıdır.

Su kaynakları açısından iklim değişikliğinin önemi, sıcaklık artışının hidrolojik döngünün hemen her bileşenini etkilemesinden kaynaklanır. Atmosferin daha sıcak koşullarda daha fazla su buharı tutabilmesi, yağışların şiddeti, buharlaşma, kar-buz dinamikleri, toprak nemi ve akış rejimleri üzerinde doğrudan sonuçlar doğurur. Bununla birlikte hidrolojik tepki her bölgede aynı değildir; bazı bölgelerde yoğun yağış ve taşkın riski artarken, bazı bölgelerde uzun süreli kuraklık, düşük akım, yeraltı suyu besleniminde azalma ve su kıtlığı baskısı öne çıkabilir (Douville ve ark., 2021; Caretta ve ark., 2022). Dolayısıyla su kaynakları yönetiminde iklim değişikliği, yalnızca toplam yıllık yağıştaki olası

değişimler üzerinden değil, yağışın mevsimsel dağılımı, olay şiddeti, kurak dönem uzunluğu, talep artışı ve su kalitesi ile birlikte değerlendirilmelidir.

3. Geçmişten Günümüze İklim Değişikliği ve IPCC Değerlendirmeleri

Dünya iklimi jeolojik zaman ölçeklerinde doğal olarak değişmiştir. Buzul dönemler, yörüngesel döngüler, volkanik faaliyetler ve güneş radyasyonundaki değişimler geçmiş iklim koşullarını etkilemiştir. Ancak güncel iklim değişikliği tartışmasının ayırt edici yönü, değişimin hızı, küresel yaygınlığı ve insan faaliyetleriyle kurulan nedensel ilişkidir. Sanayi Devrimi sonrasında kömür, petrol ve doğal gaz tüketiminin artması, çimento üretimi, kentleşme, ormansızlaşma ve tarım kaynaklı emisyonlar atmosferik sera gazı birikimini hızlandırmıştır. IPCC AR6 Sentez Raporu, 2011–2020 dönemindeki küresel yüzey sıcaklığının 1850–1900 dönemine göre yaklaşık 1.1 °C daha yüksek olduğunu bildirmekte ve bu ısınmanın insan faaliyetleriyle ilişkisini açık biçimde ortaya koymaktadır (IPCC, 2023).

Güncel çalışmalar, IPCC değerlendirmelerinde ortaya konulan uzun dönemli ısınma eğiliminin atmosferik sera gazı birikimiyle birlikte sürdüğünü göstermektedir. Friedlingstein ve arkadaşları (2025) yaptıkları çalışmada, atmosferik CO₂ birikiminin sanayi öncesi seviyelerin belirgin biçimde üzerine çıktığını ve fosil kaynaklı CO₂ emisyonlarının küresel karbon döngüsü üzerindeki insan etkisinin ana bileşenlerinden biri olmayı sürdürdüğünü ortaya koymaktadır. Bu bulgular, iklim değişikliğinin geçici veya yerel bir dalgalanma olarak değil, uzun dönemli enerji dengesi ve karbon döngüsü değişimleriyle ilişkili sistemik bir süreç olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte yıllık göstergeler yorumlanırken kısa süreli dalgalanmalar ile uzun dönemli iklim eğilimleri birbirinden ayrılmalı; iklim değişikliğine ilişkin çıkarımlar çok yıllık ortalamalar, fiziksel mekanizmalar ve doğrulanabilir bilimsel veriler birlikte dikkate alınarak yapılmalıdır.

IPCC raporları, iklim değişikliğini yalnızca küresel ortalama sıcaklık üzerinden değerlendirmez. Sıcak hava dalgaları, kuraklık, aşırı yağış, deniz seviyesi yükselmesi, buzul ve kar örtüsü değişimleri gibi çok sayıda iklim bileşeni, gözlenen ve beklenen etkilerin anlaşılması için birlikte ele alınır. Özellikle su kaynakları bakımından, iklim değişikliğinin su kullanılabilirliğini akımlar, toprak nemi, kar kütlesi, buharlaşma, yeraltı suyu ve ekosistem su gereksinimi gibi birden fazla bileşen üzerinden etkilediğini vurgulamaktadır (Douville ve ark., 2021). Bu yaklaşım, su kaynaklarının yalnızca yağış miktarına bağlı bir rezerv olarak görülmesini engeller; suyun nerede, ne zaman, hangi formda ve hangi kalitede bulunduğu sorularını da yönetimin merkezine alır.

Geçmişte su kaynakları planlaması çoğu zaman durağanlık varsayımına

dayanmıştır. Bu varsayıma göre geçmiş akım, yağış ve taşkın kayıtlarının olasılık dağılımları geleceği temsil edebilecek temel veri seti olarak kabul edilir. Ancak iklim değişikliği, hidrolojik ortalamaları ve ekstrem değerleri değiştirdiği için bu yaklaşımın geçerliliğini sınırlamaktadır. Milly ve ark. (2008), su yönetiminde durağanlığın artık temel ve varsayılan bir kabul olarak kullanılamayacağını savunmuş; bu yaklaşım su kaynakları mühendisliği, baraj işletmesi, taşkın yönetimi ve kuraklık planlaması açısından önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur. Bu nedenle geçmiş gözlemler hâlen çok değerlidir; fakat gelecekteki riskleri değerlendirmek için tek başına yeterli görülmemelidir.

4. İklim Değişikliğinin Hidrolojik Döngü ve Su Kaynakları Üzerindeki Etkileri

Hidrolojik döngü, buharlaşma, terleme, yoğunlaşma, yağış, infiltrasyon, yüzey akışı, yeraltı suyu akışı ve depolama süreçlerinden oluşan dinamik bir sistemdir. İklim değişikliği bu sistemi tek bir yönden değil, birbiriyle etkileşimli çok sayıda süreç üzerinden etkiler. Artan sıcaklıklar buharlaşma potansiyelini yükseltir; atmosferdeki su buharı miktarındaki artış ise yağış olaylarının şiddetinde değişimlere neden olabilir. Trenberth (2011), ısınmanın yağış rejimleri üzerinde hem buharlaşma artışı hem de atmosferik nem kapasitesi yoluyla etkili olduğunu; bu nedenle kuraklık ve aşırı yağış risklerinin aynı iklim sisteminde birlikte güçlenebileceğini açıklamaktadır. Bu durum, iklim değişikliğinin su döngüsünü basit bir “ıslanma” veya “kuruma” süreci olarak değil, hidrolojik değişkenliğin artması olarak yorumlamayı gerektirir.

Aşırı yağış olayları, iklim değişikliğinin hidrolojik etkileri içinde özel bir öneme sahiptir. Daha sıcak atmosfer daha fazla su buharı taşıyabildiği için, uygun dinamik koşullar oluştuğunda kısa sürede daha yoğun yağışların meydana gelme olasılığı artabilir. Allan ve Soden (2008), uydu gözlemleri ve model simülasyonlarını kullanarak sıcaklık ve atmosferik nem artışının tropikal yağış ekstremelerini güçlendirebileceğini göstermiştir. Bu bulgu, özellikle kentleşmiş havzalarda ani taşkın, altyapı yetersizliği, toprak erozyonu, sediment taşınımı ve su kalitesi bozulması gibi ikincil etkiler açısından önemlidir. Ancak aşırı yağış riskindeki artış her havzada aynı büyüklükte ortaya çıkmaz; topoğrafya, atmosferik sirkülasyon, arazi kullanımı ve havza depolama kapasitesi bu etkiyi belirleyen yerel faktörlerdir.

Kuraklık süreçleri de iklim değişikliğiyle birlikte daha karmaşık bir karakter kazanmaktadır. Meteorolojik kuraklık yağış eksikliğiyle başlasa da artan sıcaklık ve evapotranspirasyon talebi, tarımsal ve hidrolojik kuraklığın şiddetini artırabilir. Dai (2013), gözlem kayıtları ve model projeksiyonlarını birlikte değerlendirerek küresel ısınma koşullarında birçok kara alanında kuraklık

riskinin artabileceğini; ancak bölgesel kuraklık desenlerinde belirsizlikler bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, kuraklık riskinin değerlendirilmesinde yalnızca yağış değişimlerinin değil, sıcaklık artışı, buharlaşma talebi ve toprak nemi gibi hidrolojik göstergelerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Kar ve buz süreçlerindeki değişimler, özellikle dağlık havzalarda su kaynakları zamanlamasını değiştiren temel mekanizmalardandır. Daha sıcak kış koşulları yağışın kar yerine yağmur olarak düşmesine, kar örtüsü süresinin kısılmasına ve erime zamanlamasının öne kaymasına neden olabilir. Bu durum ilkbahar akımlarında artış, yaz sonu ve sonbahar düşük akımlarında azalma gibi mevsimsel sonuçlar doğurabilir.

Toprak nemi, iklim değişikliğinin tarımsal üretim ve ekosistemler üzerindeki etkilerinin erken göstergelerinden biridir. Sıcaklık artışı, bitki ve toprak yüzeyinden su kaybını artırarak yağış değişmese bile toprak neminde azalmaya neden olabilmektedir. Bu durum tarımsal sulama suyu ihtiyacını yükseltirerek bitki stresini artırır ve kurak dönemlerde verim kaybı riskini güçlendirir. Bu nedenle bitki su stresinin izlenmesinde toprak neminin yanı sıra bitki taç sıcaklığı, hava sıcaklığı ve buhar basıncı açığı gibi bitki-atmosfer göstergelerinin de dikkate alınması önem taşımaktadır. Uçak ve ark. (2022), yarı kurak iklim koşullarında hibrit mısır üzerine yürüttükleri çalışmada, CWSI değerlerinin en uygun sulama zamanının tahmininde kullanılabileceğini, ancak her sulamada uygulanacak sulama suyu miktarını belirlemede tek başına yeterli olmadığını ifade etmiştir. Hidrolojik modeller, iklim modelleri ve gözlem verileri, iklim değişikliğinin su kullanılabilirliği ve toprak nemi üzerindeki etkilerinin bölgesel olarak farklılaşabileceğini göstermektedir.

Hidrolojik döngüdeki değişimler yalnızca su miktarını değil, suyun taşınım yollarını ve kalitesini de etkiler. Yoğun yağışlar yüzey akışını artırarak tarımsal alanlardan besin elementi, pestisit, sediment ve patojen taşınımını güçlendirebilir. Buna karşılık kurak dönemlerde düşük akım koşulları kirleticilerin seyrelme kapasitesini azaltabilir, su sıcaklığını artırabilir ve çözünmüş oksijen seviyelerini düşürebilir. van Vliet ve arkadaşları (2023), 965 vaka çalışmasını değerlendirdikleri araştırmalarında, nehir su kalitesinin kuraklık, sıcak hava dalgası, yağmur fırtınası, taşkın ve uzun dönemli iklim değişikliği koşullarında çoğunlukla bozulduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle hidrolojik döngüdeki iklim kaynaklı değişimler, su kaynakları yönetiminde miktar ve kaliteyi birlikte ele alan bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır.

İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri dört temel boyutta değerlendirilebilir: miktar, kalite, zamanlama ve erişilebilirlik. Miktar boyutu yağış, akım, yeraltı suyu beslenimi, kar depolaması ve baraj-göletlere gelen su

miktariyla ilişkilidir. Kalite boyutu sıcaklık, çözünmüş oksijen, tuzluluk, besin elementi, sediment ve kirlетici yükleriyle bağlantılıdır. Zamanlama boyutu yağış mevsimi, kar erimesi, taşkın pikleri ve sulama dönemleri arasındaki uyumu ifade eder. Erişilebilirlik ise fiziksel su varlığının yanı sıra altyapı, işletme kapasitesi, enerji maliyeti, kurumsal yönetim ve su tahsis politikalarıyla ilgilidir. Caretta ve ark. (2022), iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini yalnızca hidrolojik arz açısından değil, insan ve doğal sistemlerin suya güvenilir, yeterli ve sürdürülebilir biçimde erişebilme kapasitesiyle ilişkili bir su güvenliği meselesi olarak değerlendirmektedir. Küresel ölçekte su kıtlığı, yalnızca iklim değişikliğinin değil, nüfus artışı, ekonomik gelişme, arazi kullanımı, sulama genişlemesi ve su yönetimi politikalarının ortak sonucudur. Schewe ve arkadaşları (2014), çok modellenli hidrolojik değerlendirmelerinde iklim değişikliğinin birçok bölgede bölgesel ve küresel su kıtlığını artırabileceğini göstermiştir. Haddeland ve arkadaşları (2014) ise barajlar, su çekimleri ve iklim değişikliğinin kara alanlarındaki su döngüsü üzerindeki etkilerini birlikte incelemiş; insan müdahaleleri ile iklim etkilerinin aynı havzada birlikte görülebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalar, su kaynakları üzerindeki iklim etkilerinin nüfus, arazi kullanımı, sulama talebi, su kullanımları ve depolama yapıları gibi insan kaynaklı baskılarla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yerüstü su kaynakları üzerinde beklenen etkiler, havza özelliklerine göre değişmektedir. Yağışın daha düzensiz hale gelmesi, akarsu rejimlerinde daha yüksek pik akımlar ile daha uzun düşük akım dönemlerinin bir arada görülmesine yol açabilir. Bu durum baraj ve gölet işletmesi açısından çelişkili hedefler ortaya çıkarır: taşkın riskini azaltmak için depolama yapılarında yeterli boş hacim bırakılması gerekirken, kurak dönemlerde su temini için mevcut depolama hacminin korunması gerekebilir. Geçmiş hidrolojik kayıtlara göre tasarlanmış işletme kuralları, değişen yağış ve akım rejimleri altında yeterli esnekliği sağlayamayabilir. Bu nedenle iklim değişikliği koşullarında baraj, gölet ve diğer su depolama yapılarının işletilmesi; geçmiş gözlemlere dayalı sabit kabuller yerine, değişen taşkın ve kuraklık risklerini dikkate alan esnek ve güncellenebilir yönetim yaklaşımlarıyla ele alınmalıdır (Milly ve ark., 2008; Caretta ve ark., 2022).

Yeraltı suyu, iklim değişikliğine uyum açısından hem stratejik bir tampon kaynak hem de aşırı kullanıldığında kırılgan bir rezervdir. Kurak dönemlerde yüzey suyu yetersiz kaldığında yeraltı suyu talebi artar; ancak beslenme süreçleri yağış rejimi, toprak nemi, bitki örtüsü, arazi kullanımı ve jeolojik koşullara bağlı olduğu için iklim değişikliğine karşı karmaşık tepkiler verir. Taylor ve arkadaşları (2013), yeraltı suyu ile iklim değişikliği arasındaki ilişkinin gözlem

eksiklikleri nedeniyle hâlen belirsizlikler içerdığını; buna rağmen yeraltı suyunun iklim uyum stratejilerinde kritik rol oynayabileceğini vurgulamaktadır. Wada ve ark. (2010), yeraltı suyu tüketimini yeraltı suyu çekiminin doğal beslenimi aşması olarak tanımlamış ve analizlerini yarı nemli-kurak alanlarla sınırlandırarak küresel yeraltı suyu tüketiminin 1960'ta $126 \pm 32 \text{ km}^3 \text{ yıl}^{-1}$ iken 2000'de $283 \pm 40 \text{ km}^3 \text{ yıl}^{-1}$ düzeyine yükseldiğini hesaplamıştır. Bu durum, özellikle su stresi görülen ve büyük akifer sistemlerine sahip bölgelerde yeraltı suyunun uzun vadeli yenilenebilirlik sınırları dikkate alınarak yönetilmesi gerektiğini göstermektedir.

Su kalitesi, iklim değişikliğinin çoğu zaman miktar etkilerinin gölgesinde kalan ancak içme suyu, tarımsal sulama ve ekosistem sağlığı açısından kritik olan bir boyuttur. Sıcaklık artışı suyun sıcaklığını yükselterek çözünmüş oksijen dengesini etkileyebilir, alg çoğalmasını kolaylaştırabilir ve organik madde ayrışma süreçlerini değiştirebilir. Kuraklık dönemlerinde düşük debi, kirleticilerin seyrelmesini azaltırken; ani taşkınlar sediment, besin elementi ve patojen taşınımını artırabilir.

Tarımsal su kullanımı, iklim değişikliği ve su kaynakları ilişkisinin en kritik bileşenlerinden biridir. Sıcaklık ve buharlaşma artışı, özellikle yaz döneminde sulama suyu gereksinimini artırabilir. Aynı zamanda yağış rejimindeki belirsizlik, ekim-dikim zamanı, bitki gelişme dönemleri ve sulama programlaması üzerinde yeni riskler oluşturur. Uçak ve ark. (2023), artan sıklıkta meydana gelen ekstrem hava olaylarının özellikle kuraklıklar karşısında, yüzey ve yeraltı suyu yönetiminin optimizasyonunu öncelikli bir konu haline geldiğini bildirmişlerdir. Elliott ve arkadaşları (2014), gelecekte sulama potansiyelinin yalnızca tarımsal talebe değil, tatlı su bulunabilirliğine de bağlı olduğunu ve birçok yoğun sulama bölgesinin su arzı kısıtlarıyla karşılaşabileceğini göstermiştir. Bu durum sulama verimliliğinin artırılması, bitki su tüketimi izleme, toprak nemi temelli sulama programlaması, basınçlı sulama sistemleri ve su üretkenliği göstergelerinin iklim uyum stratejilerinin merkezine alınmasını gerektirir.

Akdeniz Havzası ve Türkiye açısından su kaynakları üzerindeki iklim baskısı daha dikkatli değerlendirilmelidir. Akdeniz bölgesinde ısınmanın küresel ortalamadan daha hızlı ilerlemesi, yaz kuraklığının güçlenmesi ve yağış rejimindeki mevsimsel değişimler, su arz-talep dengesini zorlayabilir (Ali ve ark., 2022; Cramer ve ark., 2018). Bu baskı, tarımsal sulama talebi, içme-kullanma suyu güvenliği, hidroelektrik üretim, ekosistem akışları ve yeraltı suyu rezervleri üzerinde eş zamanlı etkiler doğurabilir. Türkiye'nin Akdeniz Havzası ile ilişkili iklim kuşakları ve yarı kurak geçiş bölgeleri dikkate alındığında, su kaynakları üzerindeki iklim baskısının havza ölçeğinde farklılaşabileceği söylenebilir. Her

havza için iklim projeksiyonları, mevcut su bütçesi, tarımsal desen, nüfus artışı, endüstriyel talep ve ekolojik gereksinimler birlikte değerlendirilmelidir.

5. Uyum Stratejileri ve Sürdürülebilir Su Kaynakları Yönetimi Yaklaşımları

İklim değişikliği koşullarında su kaynakları yönetiminin temel hedefi, belirsizlik altında güvenilir, esnek ve sürdürülebilir kararlar üretebilmektir. Bu amaçla su yönetimi, geçmiş gözlemlere dayalı durağanlık yaklaşımından uzaklaşarak değişen riskleri izleyen ve kararları düzenli olarak güncelleyen uyurlanabilir bir yönetim anlayışına yönelmelidir.

Uyum stratejilerinin ilk ayağı izleme ve veri altyapısının güçlendirilmesidir. Meteorolojik istasyonlar, akım gözlem istasyonları, yeraltı suyu seviye gözlemleri, su kalitesi ölçümleri, toprak nem sensörleri ve uzaktan algılama verileri bir araya getirilmeden güvenilir su yönetimi kararları almak güçtür. Özellikle kuraklık ve taşkın gibi ekstrem olaylarda kararların gecikmesi, ekonomik ve ekolojik kayıpları artırabilir. Bu nedenle erken uyarı sistemleri yalnızca yağış tahmini üretmemeli; toprak nemi, baraj ve gölet doluluk oranları, yeraltı suyu seviyesi, bitki su stresi ve su kalitesi göstergelerini de izlemelidir.

İkinci temel yaklaşım talep yönetimidir. Su arzını sürekli artırmaya dayalı geleneksel yaklaşım, iklim değişikliği ve artan talep koşullarında ekonomik ve ekolojik sınırlarla karşılaşmaktadır. Tarımsal sulamada su kayıplarının azaltılması, basınçlı sulama sistemlerinin uygun projelendirilmesi, sulama zamanının bitki su tüketimine göre belirlenmesi, açık kanal kayıplarının azaltılması ve su ölçüm sistemlerinin yaygınlaştırılması talep yönetiminin temel bileşenleridir. Ancak sulama verimliliği yalnızca teknik randıman artışı olarak görülmemelidir. Bu nedenle sulama modernizasyonu, yalnızca parsel bazında randıman artışı olarak değil, havza ölçeğinde suyun tahsisi, ürün deseni, ekonomik teşvikler ve geri dönüşlerle birlikte değerlendirilmelidir.

Üçüncü yaklaşım suyun miktar ve kalite yönetimini birlikte ele almaktır. İklim değişikliği koşullarında düşük akım dönemleri su kalitesi risklerini artırırken, taşkın dönemleri kirlетici taşınımını hızlandırabilir. Bu nedenle arıtma tesisleri, tarımsal drenaj, kentsel yağmur suyu yönetimi, endüstriyel deşarjlar ve sulak alan koruma stratejileri iklim riskleriyle uyumlu hale getirilmelidir.

Dördüncü yaklaşım havza ölçeğinde bütünleşik planlamadır. Bir havzada yüzey suyu, yeraltı suyu, tarımsal kullanım, içme suyu, sanayi, enerji üretimi ve ekosistem gereksinimleri birbirinden bağımsız değildir. Kuraklık döneminde bir sektörün su çekimini artırması, diğer sektörlerin güvenliğini ve ekosistem akışlarını etkileyebilir. Bu nedenle entegre su kaynakları yönetiminde su tahsisi yalnızca mevcut talebe göre değil; iklim riskleri, ekolojik sınırlar, toplumsal

öncelikler ve ekonomik sürdürülebilirlik birlikte dikkate alınarak planlanmalıdır.

Beşinci yaklaşım ise iklim dirençli altyapı ve doğa temelli çözümlerin birlikte değerlendirilmesidir. Baraj, gölet, taşkın koruma yapısı, drenaj sistemi ve sulama şebekesi gibi altyapılar su güvenliği açısından önemlidir; ancak tek başına yeterli değildir. İklim değişikliğine uyumda altyapı çözümlerinin yanında ekosistem temelli ve havza ölçekli uygulamaların da dikkate alınması, taşkın, yüzey akışı, erozyon ve su kalitesi risklerinin azaltılması açısından önem taşımaktadır. Bu yaklaşımlar özellikle aşırı yağış, yüzey akışı ve sediment taşınımı risklerinin arttığı alanlarda önem kazanır.

Türkiye ve benzeri yarı kurak iklim ülkeleri için iklim değişikliğine uyumda tarımsal su yönetimi özel bir öneme sahiptir. Tarımsal üretimde sulama programlaması, bitki su tüketimi hesapları, toprak nemi izleme, su ayak izi değerlendirmeleri ve enerji verimliliği birlikte düşünülmelidir. Küresel ısınma nedeniyle ciddi bir tehdit olarak ortaya çıkan iklim değişikliği, sınırlı su kaynaklarının tükenmesine yol açmaktadır (Uçak ve Arslan, 2021). Sulama suyu ihtiyacındaki artış, yalnızca su miktarı problemi değil, aynı zamanda enerji tüketimi, pompa maliyeti, sera gazı emisyonu ve çiftçi gelirleriyle ilişkili bir sürdürülebilirlik sorunudur. Bu nedenle iklim uyum stratejileri, su tasarrufu sağlayan teknolojileri yaygınlaştırırken ekonomik uygulanabilirlik, bakım-onarım kapasitesi ve kullanıcı davranışlarını da dikkate almalıdır. Suyun daha verimli kullanılması, yalnızca daha az su uygulamak anlamına gelmez; doğru zamanda, doğru miktarda ve bitki gelişme döneminin duyarlılığına uygun su yönetimi anlamına gelir. Gelecekteki iklim koşullarının tarımsal su kullanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için iklim projeksiyonları, hidrolojik modeller, bitki simülasyon modelleri ve sulama yönetimi senaryoları birlikte ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, farklı iklim koşullarında bitki su tüketimi, sulama ihtiyacı, verim değişimi ve su kaynakları üzerindeki baskıların daha sağlıklı biçimde tahmin edilmesine katkı sağlar.

Sonuç olarak iklim değişikliği, su kaynakları üzerindeki etkilerini tek bir değişken üzerinden değil, hidrolojik döngünün bütün bileşenleri aracılığıyla göstermektedir. Sıcaklık artışı, yağış rejimindeki değişim, artan buharlaşma miktarı, toprak nemi, kar-buz süreçleri, akım rejimi, yeraltı suyu beslenimi ve su kalitesi birbirini etkileyen süreçlerdir. Bu nedenle sürdürülebilir su yönetimi, yalnızca yeni su kaynakları geliştirmeye değil, mevcut kaynakları daha akılcı kullanmaya, talebi yönetmeye, kaliteyi korumaya, veri tabanlı karar almaya ve belirsizlik altında esnek planlama yapmaya dayanmalıdır. İklim değişikliği koşullarında su güvenliği, teknik mühendislik çözümleri ile ekolojik, ekonomik ve kurumsal stratejilerin birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşımla sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N. J. M., Le Cozannet, G., & Lionello, P. (2022). Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, 2233–2272. DOI: 10.1017/9781009325844.021.
- Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481–1484. DOI: 10.1126/science.1160787.
- Arias, P. A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R. G., Krinner, G., Marotzke, J., ve ark. (2021). Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896.002.
- Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., ve ark. (2022). Chapter 4: Water. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, 551–712. DOI: 10.1017/9781009325844.006.
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., ve ark. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8, 972–980. DOI: 10.1038/s41558-018-0299-2.
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3, 52–58. DOI: 10.1038/nclimate1633.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., ve ark. (2021). Chapter 8: Water Cycle Changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 1055–1210. DOI: 10.1017/9781009157896.010.
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., ve ark. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239–3244. DOI: 10.1073/pnas.1222474110.
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., ve ark. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17, 965–1039. DOI: 10.5194/essd-17-965-2025.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., ve ark. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3251–3256. DOI: 10.1073/pnas.1222475110.

- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC, Geneva, Switzerland. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319(5863), 573–574. DOI: 10.1126/science.1151915.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., ve ark. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3245–3250. DOI: 10.1073/pnas.1222460110.
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., ve ark. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322–329. DOI: 10.1038/nclimate1744.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47, 123–138. DOI: 10.3354/cr00953.
- Uçak, A. B., & Arslan, H. (2021). Plant water consumption of Siirt pistachio using Blaney Criddle and Penman-Monteith methods. *International Journal of Environmental & Agriculture Research*, 7(11), 7–17.
- Uçak, A. B., Saltuk, B., Rolbiecki, R., & Atılgan, A. (2022). Defining irrigation scheduling based on crop water stress index and physiological parameters for hybrid corn in semi-arid climate. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 24, 231–245. DOI: 10.54740/ros.2022.017.
- Uçak, A. B., Atılgan, A., Korytowski, M., Kociğcka, J., Liberacki, D., Stachowski, P., Saltuk, B., & Rolbiecki, R. (2023). Derinkuyu dry bean irrigation planning in semi-arid climate by utilising crop water stress index values. *Journal of Water and Land Development*, 59, 145–152. <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.147239>
- van Vliet, M. T. H., Thorslund, J., Stokal, M., Hofstra, N., Flörke, M., Ehalt Macedo, H., ve ark. (2023). Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 687–702. DOI: 10.1038/s43017-023-00472-3.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H., van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37, L20402. DOI: 10.1029/2010GL044571.

2. Bölüm

Dünya’da Farklı İklim ve Sulama Koşullarında Yetiştirilen Bazı Bitkilerin Klorofil İçeriğinin İrdelenmesi

Yeşim BOZKURT ÇOLAK¹, Burak DALKILIÇ¹, Alper BAYDAR²

1. Giriş

Bitkisel üretim; bitkinin genetik özellikleri ile sıcaklık, yağış, ışık, toprak nemi, sulama ve besin elementlerinin yarayışlılığı gibi çevresel ve yetiştiricilikle ilgili etmenlerin birlikte etkisi altında gerçekleşmektedir. Bu etmenlerde meydana gelen değişimler, bitkilerin büyüme ve gelişmesinin yanı sıra fotosentetik faaliyetlerini de doğrudan veya dolaylı biçimde etkileyebilmektedir. Fotosentezin temel bileşenlerinden biri olan klorofil, ışık enerjisinin tutulması ve bu enerjinin biyokimyasal süreçlerde kullanılabilir hâle getirilmesinde önemli görev üstlenmektedir (Croft ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2022).

Yaprak klorofil içeriği, bitkilerin fizyolojik durumunun değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan göstergelerden biridir. Klorofil içeriği ile fotosentetik kapasite arasında yakın bir ilişki bulunmakla birlikte, bu özellik fotosentez hızının doğrudan ölçümü olarak kabul edilmemelidir. Bunun yerine yaprağın fotosentetik yapısı, azot durumu ve çevresel koşullara verdiği tepki hakkında tamamlayıcı bilgi sağlayan bir ölçüt olarak değerlendirilmesi daha uygundur (Croft ve ark., 2017; Croft ve ark., 2020). Nitekim küresel ölçekte yapılan değerlendirmeler, yaprak klorofil içeriğinin bitki grupları, coğrafi bölgeler ve mevsimler arasında değişebildiğini göstermektedir (Croft ve ark., 2020).

Bitkilerde klorofil içeriği; tür, çeşit, yaprak yaşı ve gelişme dönemi gibi bitkisel özelliklerin yanı sıra azot beslenmesi, su noksanlığı, sıcaklık, tuzluluk, hastalık ve zararlı baskısı gibi birçok etkene bağlı olarak değişmektedir (Zhang ve ark., 2022). Özellikle kuraklık ve yüksek sıcaklık koşulları, klorofil sentezini ve klorofilin korunmasını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu streslerin birlikte görülmesi, bazı bitkilerde tek başına oluşturdukları etkiden daha belirgin azalışlara neden olabilmektedir. Bununla birlikte tepkinin büyüklüğü çeşitlere

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, yesim.colak@ozal.edu.tr

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, burak.dalkilic@ozal.edu.tr

² Siirt Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü, alper.baydar@siirt.edu.tr

göre değişmekte ve klorofil içeriğinin çevre ile genotip arasındaki etkileşim çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir (Pradhan ve ark., 2022).

Sulama, bitkinin su durumunu ve buna bağlı fizyolojik süreçleri düzenleyen temel yetiştiricilik uygulamalarından biridir. Araştırmalarda sulama koşulları genellikle tam sulama, farklı düzeylerde kısıntılı sulama, belirli gelişme dönemlerinde uygulanan düzenlemeli kısıntılı sulama ve yağışa dayalı yetiştiricilik biçiminde ele alınmaktadır (Prgomet ve ark., 2020). Sulama suyunun azaltılması yaprak su durumunu, stomaların çalışmasını ve fotosentetik pigmentlerin korunmasını etkileyebilmektedir. Ancak klorofil içeriğinde meydana gelen değişim yalnızca verilen su miktarına bağlı değildir. Bitkinin türü ve çeşidi, iklim koşulları, su kısıntısının şiddeti, uygulama dönemi ve ölçüm zamanı da tepkinin yönünü ve büyüklüğünü değiştirebilmektedir. Nitekim farklı sulama rejimlerinde yetiştirilen buğday çeşitlerinde klorofil değerlerinin sulama düzeyi, ekim zamanı ve genotipe göre değiştiği bildirilmiştir (Anjum ve ark., 2021). Bademde ise şiddetli kısıntılı sulama ve yağışa dayalı koşullarda fotosentetik pigmentlerin daha düşük olabildiği, buna karşılık daha hafif veya belirli dönemlerle sınırlandırılan su kısıntısında farklı tepkilerin ortaya çıkabildiği belirlenmiştir (Prgomet ve ark., 2020).

Yaprak klorofil içeriği, laboratuvar koşullarında pigmentlerin çözücüler yardımıyla ekstrakte edilmesi ve spektrofotometrik olarak belirlenmesiyle ölçülebilmektedir. Bunun yanında SPAD gibi taşınabilir cihazlar, yapraklara zarar vermeden hızlı ve yerinde ölçüm yapılmasına olanak sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2022). Ancak SPAD değerleri doğrudan mutlak klorofil miktarını ifade etmemekte; yaprak yapısı, su içeriği, pigmentlerin yaprak içindeki dağılımı, ışınım ve ölçüm zamanı gibi etmenlerden etkilenebilmektedir (Martínez ve Guíamét, 2004; Zhang ve ark., 2022). Bu nedenle farklı araştırmalarda bildirilen sonuçlar karşılaştırılırken kullanılan ölçüm yöntemi ve uygulama koşulları da göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu bölümde, dünyanın farklı iklim ve sulama koşullarında yürütülen araştırmalar esas alınarak bazı tarla, sebze ve meyve bitkilerinin klorofil içerikleri incelenecektir. Çalışmalar; bitki türü, yetiştirildiği iklim, uygulanan sulama düzeyi veya su kısıntısı ve klorofil içeriğinde meydana gelen değişimler bakımından genel bir çerçevede değerlendirilecektir. Böylece klorofil içeriğinin farklı bitki gruplarında iklim ve sulama koşullarına bağlı değişiminin ortaya konulması ve bu özelliğin bitkisel üretimdeki kullanım alanlarının özetlenmesi amaçlanmaktadır.

2. Bitkilerde Klorofil İçeriği

Klorofiller, bitkilerde fotosentezin gerçekleşmesini sağlayan temel pigmentlerdir. Kloroplastların tilakoit zarlarında bulunan bu bileşikler, ışık enerjisinin tutulması ve fotosentetik reaksiyonlarda kullanılabilecek enerjiye dönüştürülmesinde görev almaktadır. Kimyasal olarak merkezinde magnezyum bulunan halkalı tetrapirel yapısındaki klorofil, bitkideki enerji dönüşümünün temel bileşenlerinden biridir (Nagahatenna ve ark., 2015). Karasal yüksek bitkilerde başlıca klorofil tipleri klorofil a ve klorofil b'dir. Bu iki pigmentin yapısındaki küçük farklılıklar, ışığın farklı dalga boylarından yararlanılmasına katkı sağlamaktadır (Simkin ve ark., 2022).

Klorofil a, hem ışık hasat komplekslerinde hem de fotosentetik reaksiyon merkezlerinde bulunmakta ve fotosentezde temel pigment olarak görev yapmaktadır. Klorofil b ise daha çok ışık hasat komplekslerinde yer alan yardımcı bir pigmenttir. Klorofil b tarafından tutulan enerji, fotosentetik süreçte kullanılmak üzere klorofil a'ya aktarılmaktadır. Bu nedenle klorofil a ve klorofil b miktarları ile bunların birbirine oranı, bitkinin ışık enerjisinden yararlanma biçimi hakkında bilgi verebilmektedir. Klorofil a/b oranında meydana gelen değişimler, ışık hasat antenlerinin büyüklüğü ve bitkinin farklı ışık koşullarına uyumu ile ilişkili olabilmektedir (Simkin ve ark., 2022). Bununla birlikte bu oran tek başına fotosentetik etkinliğin veya verimin doğrudan göstergesi olarak değerlendirilmemelidir.

Yapraktaki klorofil miktarı, sentez ve parçalanma süreçleri arasındaki denge sonucunda ortaya çıkmaktadır. Klorofil sentezi ışık koşulları, gelişme dönemi ve çevresel uyaranlarla bağlantılı biçimde düzenlenmektedir (Nagahatenna ve ark., 2015). Genç ve aktif yapraklarda klorofil sentezi ve fotosentetik yapıların oluşumu ön plandayken, yaprak yaşlandıkça klorofilin parçalanması hızlanabilmektedir. Yapraklarda görülen sararma, klorofil kaybının en belirgin görsel sonuçlarından biridir. Ancak yaprak yaşlanması yalnızca pigment kaybından ibaret değildir; bu süreçte yapısal bileşenler parçalanmakta ve besin elementleri bitkinin gelişmekte olan diğer organlarına taşınmaktadır (Lee ve Masclaux-Daubresse, 2021).

Klorofil içeriği sabit bir özellik olmayıp genetik ve çevresel etmenlere göre değişmektedir. Bitki türü ve çeşidi, yaprak yaşı, gelişme dönemi ve yaprağın bitki üzerindeki konumu bu değişimde rol oynamaktadır. Bunun yanında ışık şiddeti, sıcaklık, su durumu, mineral beslenme, tuzluluk, hastalıklar ve diğer stres koşulları da klorofil sentezini veya parçalanmasını etkileyebilmektedir. Özellikle azot, klorofil ve fotosentetik yapıların oluşumuyla ilişkili önemli bir besin elementidir. Bu nedenle yaprak klorofil içeriği ile azot durumu arasında çoğu zaman bir ilişki görülmektedir. Ancak azotun yapraktaki farklı yapılara dağılımı

bitki grupları ve yetiştirme koşullarına göre değişebildiğinden, klorofil veya SPAD değerleri doğrudan azot miktarı olarak yorumlanmamalıdır (Xiong ve ark., 2015).

Su noksanlığı ve yüksek sıcaklık gibi çevresel stresler, klorofil sentezini sınırlandırabildiği gibi mevcut klorofilin parçalanmasını da hızlandırabilmektedir. Bununla birlikte klorofil içeriğindeki değişimin yönü ve büyüklüğü; stresin süresine ve şiddetine, bitkinin gelişme dönemine ve genotipin dayanıklılığına bağlıdır. Hafif veya kısa süreli streslerde klorofil içeriği belirgin biçimde değişmeyebilirken, uzun süreli veya şiddetli koşullarda yaprak yaşlanması ve klorofil kaybı hızlanabilmektedir. Yaprak yaşlanmasının başlaması ve ilerlemesi de su kullanımı, besin durumu, ışık ve iklim koşulları tarafından değiştirilebilmektedir (Lee ve Masclaux-Daubresse, 2021). Bu durum, farklı iklim ve sulama koşullarında elde edilen klorofil sonuçlarının bitkinin gelişme dönemiyle birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Yaprak klorofil içeriğinin belirlenmesinde tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılmaktadır. Tahribatlı yöntemde yaprak örnekleri alınmakta, klorofil uygun organik çözücülerle dokudan ayrılmakta ve elde edilen çözeltinin ışık soğurması spektrofotometre ile ölçülmektedir. Bu yöntemle klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil miktarı ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Spektrofotometrik analizler klorofil miktarının daha doğrudan belirlenmesini sağlamakla birlikte örnek hazırlama gerektirmesi, zaman alması ve aynı yaprağın sonraki tarihlerde yeniden ölçülememesi gibi sınırlamalara sahiptir (Dong ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2022).

SPAD ve benzeri taşınabilir klorofil ölçerler ise yaprağa zarar vermeden hızlı ölçüm yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu cihazlar genel olarak klorofilin güçlü biçimde ışık soğurduğu kırmızı bölge ile yaprak yapısından kaynaklanan farklılıkların değerlendirilmesinde kullanılan yakın kızılötesi bölgedeki geçirgenliği karşılaştırmaktadır. Elde edilen SPAD değeri, mutlak klorofil miktarı değil göreceli bir indekstir. Bu indeksin gerçek klorofil miktarına dönüştürülmesi için laboratuvar sonuçlarıyla kalibrasyon yapılması gerekmektedir (Dong ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2022).

Taşınabilir cihazların hızlı ve pratik olması, geniş deneme alanlarında çok sayıda bitkinin izlenmesini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte ölçüm sonuçları; bitki türü, çeşit, yaprak kalınlığı, yaprak üzerindeki ölçüm noktası, pigmentlerin dağılımı, ışık koşulları ve ölçüm zamanından etkilenebilmektedir (Xiong ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2022). Bu nedenle farklı ülkelerde ve iklim koşullarında yürütülen çalışmalar karşılaştırılırken yalnızca bildirilen klorofil veya SPAD değerlerine bakılması yeterli değildir. Kullanılan cihaz, ölçülen

yaprak, bitkinin gelişme dönemi, ölçüm zamanı ve sonuçların ifade edildiği birim birlikte dikkate alınmalıdır.

3. Farklı İklim ve Sulama Koşullarında Tahıl ve Endüstri Bitkilerinin Klorofil İçeriği

Farklı ülkelerde yürütülen çalışmalar, sulama koşullarının bitkilerin klorofil içeriğini önemli ölçüde etkileyebildiğini; ancak bu etkinin bütün türlerde ve gelişme dönemlerinde aynı yönde olmadığını göstermektedir. Klorofil veya SPAD değerlerindeki değişim, uygulanan su miktarının yanı sıra iklim, genotip, yetiştirme yöntemi, ölçüm zamanı ve yaprak özellikleriyle birlikte şekillenmektedir. Bu nedenle farklı araştırmalardan elde edilen sonuçların yalnızca "artış" veya "azalış" biçiminde değerlendirilmesi yeterli değildir.

3.1. Tahıl Bitkileri

Buğday çalışmalarında su kısıtının klorofil içeriğini çoğunlukla azalttığı görülmektedir. Pakistan'ın yarı kurak koşullarında yürütülen bir araştırmada sulama rejimi, çeşit ve ekim tarihi SPAD ile klorofil a ve b içeriklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Daha fazla gelişme döneminde sulama yapılan uygulamalarda klorofil içeriği yüksek kalırken, en kısıtlı sulama rejiminde en düşük değerler belirlenmiştir. Ayrıca geç ekimle birlikte klorofil içeriğinin azalması, su koşullarının sıcaklık ve yetiştirme zamanından bağımsız değerlendirilemeyeceğini göstermiştir (Anjum ve ark., 2021).

Çin'in kurak ve yarı kurak özellik gösteren Xinjiang bölgesinde 152 buğday genotipiyle yürütülen çalışmada da sınırlı sulama, özellikle tane dolum dönemindeki SPAD değerini düşürmüştür. Bununla birlikte SPAD ile tane verimi arasındaki ilişki her ölçüm döneminde aynı olmamıştır. Tane dolum döneminde kuraklık koşullarında pozitif bir ilişki belirlenirken, çiçeklenme döneminde belirgin bir ilişki görülmemiştir (Zhang ve ark., 2019). Bu sonuç, klorofil ölçümünün verimle ilişkilendirilmesinde bitkinin gelişme döneminin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Yarı kurak tropik koşullarda yetiştirilen mısırdaki ise sulama düzeyinin etkisi dikim yöntemiyle birlikte değişmiştir. Güney Hindistan'da yapılan çalışmada, daha düşük ve orta düzeyde toprak nemi tüketiminde sulanan uygulamalar daha yüksek SPAD değerleri vermiştir. Özellikle erken ölçüm döneminde dikim yöntemi ile sulama düzeyi arasındaki etkileşim önemli bulunmuştur (Halli ve ark., 2021). Dolayısıyla mısırdaki klorofil içeriği, yalnızca verilen toplam suyun değil, suyun kök bölgesinde ne ölçüde korunabildiğinin de bir göstergesi olabilmektedir.

Çeltikte sürekli su altında yetiştirme ile dönüşümlü ıslatma-kurutma sulamasının karşılaştırıldığı bir çalışmada, dönüşümlü sulama SPAD değerini %7,1 azaltmıştır. Aynı uygulamada su kullanım etkinliğinin artması, klorofil içeriğindeki sınırlı azalmanın su tasarrufu bakımından bir karşılığı olabileceğini göstermektedir (Song ve ark., 2020). Bu nedenle çeltikte daha düşük SPAD değeri tek başına uygulamanın başarısız olduğu şeklinde yorumlanmamalı; kullanılan su miktarı ve verimle birlikte değerlendirilmelidir.

Tahıl çalışmalarının genel sonucu, şiddetli veya uzun süreli su kısıtının klorofil içeriğini düşürme eğiliminde olduğudur. Bununla birlikte azalmanın büyüklüğü; tür, genotip, gelişme dönemi, ekim yöntemi ve sulamanın zamanlamasına göre değişmektedir. Özellikle SPAD-verim ilişkisinin dönemler arasında farklılaşması, karşılaştırmalı değerlendirmelerde ölçüm zamanının açık biçimde belirtilmesini gerekli kılmaktadır.

3.2. Endüstri ve Yağ Bitkileri

Endüstri bitkilerinde sulama-klorofil ilişkisi daha değişken bir görünüm göstermektedir. Güney Xinjiang'da malçsız pamukla yürütülen çalışmada 300-600 mm arasında değişen sulama miktarları karşılaştırılmıştır. SPAD değeri gelişme süresince önce artmış, tam çiçeklenmede en yüksek düzeye ulaşmış ve daha sonra azalmıştır. En yüksek ve en kararlı ortalama SPAD değeri 450 mm sulama uygulamasında elde edilmiş; hem daha düşük hem de daha yüksek su düzeylerinde değerler gerilemiştir (Su ve ark., 2025). Bu bulgu, klorofil içeriği ile sulama miktarı arasında her zaman doğrusal bir ilişki olmadığını göstermektedir.

Macaristan'da üç yıl süreyle yürütülen soya çalışmasında yağışa dayalı, yarı sulamalı ve tam sulamalı uygulamaların SPAD üzerindeki etkisi gelişme dönemine göre değişmiştir. R4 döneminde sulama yapılmayan bitkiler tam sulanan bitkilerden daha yüksek SPAD değerine sahipken, R6 döneminde en yüksek değer tam sulamada belirlenmiştir. Uygulamaların genel ortalamaları ise birbirine yakın bulunmuştur (Basal ve Szabó, 2020). Bu durum, tek bir tarihte yapılan ölçümün bitkinin bütün yetiştirme dönemi boyunca gösterdiği su tepkisini temsil etmeyebileceğini ortaya koymaktadır.

Yer fıstığında elde edilen sonuçlar, klorofil artışının her zaman daha iyi su durumunu göstermediğine dikkat çekmektedir. Hindistan'da 12 genotiple yapılan araştırmada su miktarı azaldıkça özgül yaprak alanı düşmüş, SPAD/SCMR ve birim kuru madde başına toplam klorofil artmıştır. Toplam klorofil en yüksek sulama düzeyinde 6.84 mg g⁻¹ kuru madde iken, en şiddetli su kısıtında 8.35 mg g⁻¹ kuru maddeye yükselmiştir. Buna karşılık şiddetli su kısıtı fotosentezi

azaltmıştır (Kalariya ve ark., 2015). Yaprakların kalınlaşması ve pigmentin daha küçük yaprak alanında yoğunlaşması, bu görünürdeki artışın olası açıklamasıdır.

Türkiye'nin Siirt koşullarında yetiştirilen ayçiçeğinde ise su kısıtı klorofil içeriğini belirgin biçimde azaltmıştır. İki yıllık ortalamada en yüksek değer tam sulanan P64LE119 genotipinde 49.83 SPAD, en düşük değer ise güçlü su stresi altındaki PR63F73 genotipinde 34.39 SPAD olarak belirlenmiştir (Uçak, 2018). Sonuçlar, ayçiçeğinde sulama düzeyinin etkisinin genotipe göre değişebileceğini ve uygun çeşit seçiminin su kısıtı koşullarında önem taşıdığını göstermektedir.

Endüstri ve yağ bitkilerindeki bulgular birlikte değerlendirildiğinde üç farklı tepki öne çıkmaktadır: su kısıtıyla klorofil kaybı, orta düzey sulamada en yüksek klorofil ve su kısıtı altında pigment yoğunlaşmasına bağlı görece artış. Bu çeşitlilik, SPAD değerinin doğrudan "bitki sağlığı" veya "kuraklığa dayanıklılık" değeri olarak kullanılmasını sınırlandırmaktadır. Ölçüm sonuçları yaprak kalınlığı, gelişme dönemi, genotip, fotosentez ve mümkünse verim verileriyle birlikte ele alınmalıdır.

Tahıl ve endüstri bitkileri genelinde en tutarlı sonuç, şiddetli su noksanlığının yaprak işlevini ve fotosentetik performansı sınırlandırmasıdır. Ancak klorofil göstergesinin bu sınırlamaya verdiği yanıt her zaman azalma biçiminde ortaya çıkmamaktadır. Bu nedenle farklı iklim ve sulama koşullarındaki bitkiler karşılaştırılırken mutlak SPAD değerlerinden çok, aynı bitkideki uygulamalar arasındaki değişim ve ölçümün yapıldığı gelişme dönemi dikkate alınmalıdır.

4. Farklı İklim ve Sulama Koşullarında Sebze Bitkilerinin Klorofil İçeriği

Sebze bitkilerinde sulama-klorofil ilişkisi; tür, su kısıtının şiddeti, yetiştirme ortamı ve kullanılan yardımcı uygulamalara göre değişmektedir. İncelenen araştırmalarda su noksanlığı çoğunlukla klorofil kaybına neden olmakla birlikte, bazı koşullarda SPAD değerinin arttığı veya sulama uygulamalarından etkilenmediği de görülmüştür. Bu farklılık, özellikle su içeriği yüksek dokulara sahip sebzelerde klorofil ölçümlerinin yaprak büyümesi, beslenme ve genotip özellikleriyle birlikte yorumlanmasını gerekli kılmaktadır.

4.1. Meyvesi Yenilen Sebzeler

Türkiye'nin Şırnak koşullarında açık alanda yetiştirilen domateste tam sulamanın %100, %66 ve %33'ü karşılaştırılmıştır. Uygulamaların genel ortalamasında %66 sulama klorofil içeriğini kontrole göre %0.60 artırırken, %33 sulama %0.47 azaltmıştır. Potasyum nitrat ve potasyum sülfat uygulamalarının da klorofil içeriğini desteklediği belirlenmiştir (Temur ve ark., 2023). Değişim oranlarının düşük olması, domateste orta düzey su kısıtının klorofil bakımından

kısa süreli olarak tolere edilebildiğini; daha şiddetli kısıtta ise azalmanın başladığını göstermektedir.

Mısır'da iki yıl yürütülen patlıcan denemesinde %60 ETc düzeyindeki kısıntılı sulama, tam sulamaya göre SPAD değerini %5.9 azaltmıştır. Aynı uygulamada fotosentetik etkinliğe ilişkin göstergeler de gerilemiştir. Yapraktan uygulanan ZnO nanoparçacıkları ise kısıntılı sulamadaki SPAD kaybını hafifletmiş ve değerleri tam sulanan kontrol bitkilerine yaklaştırmıştır (Semida ve ark., 2021). Bu sonuç, şiddetli su kısıtının patlıcanda klorofil yapısını olumsuz etkileyebildiğini, ancak bitkinin beslenme ve savunma durumunu destekleyen uygulamaların tepkinin büyüklüğünü değiştirebildiğini göstermektedir.

Tuzdan etkilenmiş toprakta yetiştirilen acı biberde %80 ve %60 tarla kapasitesi düzeyindeki sulama uygulamaları SPAD klorofil indeksini tam sulamaya göre önemli ölçüde azaltmıştır. Yapraktan glutasyon uygulaması bu kaybı sınırlamış; özellikle 0.8 mM uygulamasında normal ve kısıntılı sulama koşullarındaki klorofil değerleri birbirine yaklaştırmıştır (Al-Elwany ve ark., 2020). Bu çalışmada su kısıtı ile toprak tuzluluğunun birlikte bulunması, klorofil kaybının yalnızca sulama miktarına bağlanamayacağını göstermektedir.

Hıyarda farklı iklimlerde yürütülen iki çalışma karşıt sonuçlar vermiştir. Katar'ın kurak çöl ikliminde açık alanda yetiştirilen hıyarda %50 sulama düzeyinde ortalama 37.42 SPAD, tam sulamada ise 34.07 SPAD ölçülmüştür. En yüksek değer, %50 sulama ile orta azot dozunun birlikte uygulandığı bitkilerde 40.04 SPAD olmuştur (Bello ve ark., 2023). Buna karşılık Mısır'da yürütülen çalışmada %75 ve %50 ETc düzeyleri, özellikle aşısız hıyar bitkilerinde SPAD değerini azaltmıştır. Uygun anaçlara aşılama klorofil ve fotosentetik etkinlikteki kaybı hafifletmiştir (Shehata ve ark., 2022).

Hıyar çalışmalarındaki farklılık; su kısıtının süresi, azot düzeyi, bitkinin aşılı olup olmaması ve ölçüm zamanıyla ilişkili olabilir. Katar çalışmasındaki yüksek SPAD değeri, daha yüksek klorofil yoğunluğunu göstermekle birlikte tek başına genel kuraklık dayanıklılığı olarak yorumlanmamalıdır. Mısır çalışması ise genotip ve anaç seçiminin aynı sulama düzeyinde farklı fizyolojik sonuçlar oluşturabileceğini ortaya koymaktadır.

4.2. Yapraklı ve Soğanlı Sebzeler

Marulda su kısıtına verilen klorofil tepkisi çalışmalara göre değişmiştir. Antalya'da plastik serada ilkbahar ve sonbahar dönemlerinde yürütülen araştırmada en yüksek SPAD değerleri geleneksel %50 sulama uygulamasında belirlenmiştir. Bu uygulamada ilkbaharda 37,98 ve sonbaharda 37,07 SPAD ölçülürken, çiftçi sulaması koşullarında değerler sırasıyla 30,36 ve 27,92 olmuştur (Demir ve ark., 2022). Araştırmacılar bu artışı, su kısıtı altında yaprak

büyümesinin klorofil birikiminden daha hızlı azalması ve pigmentin daha küçük yaprak dokusunda yoğunlaşmasıyla ilişkilendirmiştir.

Başka bir sera çalışmasında ise %100, %67 ve %33 sulama düzeylerinde yetiştirilen kıvırcık marulun klorofil içeriği, sulama suyu azaldıkça düşmüştür. En belirgin olumsuz etki %33 sulama düzeyinde ortaya çıkmış; toprağa artan oranlarda biyoçar uygulanması klorofil içeriğini ve diğer fizyolojik özellikleri iyileştirmiştir (Tüfenkçi ve Yerli, 2023). Aynı bitki grubunda belirlenen bu iki farklı tepki, SPAD veya klorofil değerinin su kısıtının şiddeti, yetiştirme ortamı, yaprak gelişimi ve toprak düzenleyicilerinden bağımsız değerlendirilemeyeceğini göstermektedir.

İspanya'nın Valencia bölgesinde Akdeniz koşullarında yetiştirilen soğanda, farklı gelişme dönemlerinde uygulanan düzenlemeli kısıntılı sulama stratejileri SPAD indeksini önemli ölçüde değiştirmemiştir. Bununla birlikte özellikle erken gelişme dönemindeki şiddetli su kısıtı biyokütle ve pazarlanabilir verimi azaltmıştır (Abdelkhalik ve ark., 2019). Bu bulgu, klorofil indeksinin bazı tür ve koşullarda su stresine karşı verim kadar duyarlı olmayabileceğini göstermektedir.

Sebze bitkilerindeki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, şiddetli su kısıtının patlıcan, biber, aşısız hıyar ve kıvırcık marulda klorofil içeriğini azaltma eğiliminde olduğu görülmektedir. Buna karşılık orta düzey su kısıtı domates, hıyar ve marulda sınırlı bir artışa veya pigment yoğunlaşmasına neden olabilmekte; soğanda ise SPAD değeri değişmeden biyokütle ve verim kaybı oluşabilmektedir. Dolayısıyla sebze bitkilerinde klorofil ölçümleri; sulama düzeyi, yaprak büyüklüğü, bitki besleme uygulamaları, anaç veya çeşit ve verim sonuçlarıyla birlikte yorumlanmalıdır.

5. Farklı İklim ve Sulama Koşullarında Meyve Bitkilerinin Klorofil İçeriği

Meyve bitkileri çok yıllık yapıları nedeniyle su kısıtına yalnız uygulamanın yapıldığı dönemde değil, sonraki büyüme dönemlerinde de tepki gösterebilmektedir. Bu bitkilerde klorofil içeriği; sulama düzeyinin yanında tür, çeşit, anaç, su kalitesi, stresin süresi ve sulamanın gelişme dönemlerine göre zamanlanmasından etkilenmektedir. İncelenen çalışmaların çoğunda şiddetli su kısıtı klorofil veya SPAD değerini azaltmış, ancak üzümde çeşitlerin klorofili koruyabildiği ve turunçgillerde su kalitesinin sulama miktarı kadar belirleyici olduğu görülmüştür.

5.1. Akdeniz İklimine Uyumlu Meyve Türleri

Üzümde farklı çeşitlerin sulama kısıtına tepkisi, klorofil içeriğinin genotipe bağlı olarak korunabildiğini göstermektedir. Xynisteri, Maratheftiko, Shiraz ve

Sauvignon Blanc asmalarının tam sulama ile tam sulamanın %50 ve %25'i altında karşılaştırıldığı saksı denemesinde SPAD değerleri sulama düzeyinden çok ölçüm zamanı ve çeşide göre değişmiştir. Özellikle Kıbrıs kökenli Xynisteri ve Maratheftiko çeşitleri düşük sulama düzeylerinde klorofil içeriğini koruma veya artırma eğilimi göstermiştir (Copper ve ark., 2022). Bu sonuç, kurak ve sıcak bölgelere uyum sağlamış yerel çeşitlerde yaprak klorofilinin su kısıtına karşı görece kararlı kalabileceğini ortaya koymaktadır.

Mısır'ın hiper-kurak koşullarında yetiştirilen Manzanillo ve Picual zeytin çeşitlerinde %100, %75 ve %50 ETc sulama düzeyleri karşılaştırılmıştır. Her iki çeşitte de en yüksek yaprak su içeriği, oransal su içeriği ve toplam klorofil %100 ETc uygulamasında belirlenmiştir (El-Gioushy ve ark., 2021). Zeytin kuraklığa dayanıklı bir tür olmakla birlikte bu bulgu, dayanıklılığın klorofil içeriğinin su noksanlığından etkilenmeyeceği anlamına gelmediğini göstermektedir.

Yarı kurak Mısır koşullarında Taifi nar çeşidiyle yürütülen iki yıllık çalışmada en yüksek SPAD değerleri %100 bitki su gereksiniminin karşılandığı ağaçlarda ölçülmüştür. Sulamanın %75 ve %50 düzeylerine düşürülmesi klorofil içeriğini azaltmıştır. Manyetize su ve prolin uygulamaları kısıntılı sulamadaki kaybı bir ölçüde hafifletmiş, ancak etkileri çoğunlukla sınırlı kalmıştır (Okba ve ark., 2022). Denemenin tuzlu killi toprakta yürütülmesi, su miktarı ile toprak koşullarının birlikte etkili olduğunu göstermektedir.

İspanya'nın yarı kurak Akdeniz koşullarında greyfurt ve mandarin ağaçları, geleneksel ve artırılmış suyla tam veya düzenlemeli kısıntılı sulama altında incelenmiştir. Düzenlemeli kısıntılı sulamada meyve gelişiminin ikinci döneminde kontrol sulamasının %50'si uygulanmıştır. Artırılmış suyla sulama her iki türde de toplam klorofili azaltmış; su kısıtının etkisi ise türe ve su kalitesine bağlı olarak değişmiştir (Romero-Trigueros ve ark., 2017). Bu çalışma, turunçgillerde yalnız sulama miktarının değil, özellikle tuzluluk ve bazı iyonlar bakımından sulama suyu kalitesinin de klorofil sonuçlarını değiştirebildiğini göstermektedir.

Akdeniz meyve türlerine ait çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, zeytin ve narda artan su kısıtıyla klorofil içeriğinin azaldığı; üzümde ise yerel çeşitlerin daha kararlı bir tepki gösterebildiği görülmektedir. Turunçgillerde su kalitesinin belirgin etkisi, farklı sulama koşullarını karşılaştırırken uygulanan suyun kimyasal özelliklerinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

5.2. Ilıman ve Subtropik İklim Meyveleri

Elmada Red Chief çeşidinin M9 ve MM106 anaçları üzerine aşılandığı sera denemesinde, sulamanın 15 ve 19 gün kesilmesiyle orta ve şiddetli kuraklık oluşturulmuştur. Şiddetli kuraklık her iki anaçta da SPAD değerini düşürmüştü, en

düşük değer M9 anacında 47.36 olarak belirlenmiştir. Orta düzey stres M9'da SPAD değerini %13.6 azaltırken MM106'da azalma %3.5 ile sınırlı kalmıştır (Aras ve Keleş, 2019). Bu farklılık, anaç seçiminin elmanın su kısıtına karşı klorofil tepkisini önemli ölçüde değiştirebildiğini göstermektedir.

Malatya koşullarında Hacıhaliloğlu kayısı çeşidiyle üç yıl yürütülen çalışmada farklı dönemlerde sulamanın kesilmesi ve tamamlayıcı sulama uygulamaları karşılaştırılmıştır. Üç yıllık ortalamada en yüksek klorofil indeksi tam sulanan kontrolde 42.14 SPAD olarak ölçülmüş, kuraklık uygulamalarında değerler daha düşük kalmıştır. Kuraklıktan sonra yapılan sulama klorofil içeriğini her zaman kontrol düzeyine geri getirmemiş; sonbahar ve kış dönemindeki tamamlayıcı sulamalar kaybı kısmen azaltmıştır (İpek ve ark., 2026). Kayısındaki bu sonuç, çok yıllık bitkilerde önceki dönemde yaşanan su stresinin sonraki ölçümlere taşınabildiğini göstermektedir.

Hindistan'ın nemli subtropik Tarai bölgesinde yetiştirilen guavada %100, %75 ve %50 ETc sulama düzeyleri karşılaştırılmıştır. İki yıllık birleştirilmiş verilerde en yüksek toplam yaprak klorofili %100 ETc uygulamasında 3.35 mg g^{-1} , en düşük değer ise %50 ETc uygulamasında 2.14 mg g^{-1} olarak belirlenmiştir. Gümüş-siyah plastik malç uygulaması klorofil içeriğini desteklemiştir (Jat ve ark., 2022). Bu bulgu, yağışlı veya nemli olarak tanımlanan bölgelerde bile kök bölgesindeki su noksanlığının şiddetlenmesi durumunda klorofil kaybının ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

Ilıman ve subtropik meyvelerdeki sonuçlar, şiddetli ve uzun süreli su noksanlığının elma, kayısı ve guavada klorofil içeriğini azaltma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte elmadaki anaç farkı, kayısındaki gecikmiş toparlanma ve guavadaki malç etkisi, aynı sulama düzeyinin farklı yetiştirme sistemlerinde farklı sonuçlar oluşturabileceğini ortaya koymaktadır.

Meyve bitkilerine ilişkin çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, tam sulama çoğu türde en yüksek klorofil veya SPAD değerini sağlamıştır. Ancak üzümde çeşitlerin klorofili koruyabilmesi, turuncgillerde su kalitesinin öne çıkması ve çok yıllık türlerde önceki stresin etkilerinin devam etmesi, klorofil içeriğinin tek başına sulama miktarıyla açıklanamayacağını göstermektedir. Bu nedenle meyve bahçelerinde klorofil ölçümleri; tür ve çeşit, anaç, sulama zamanı, su kalitesi ve stresin süresiyle birlikte değerlendirilmelidir.

İncelenen araştırmaların bitki türü, yetiştirme bölgesi, sulama düzeyi, klorofil ölçüm yöntemi ve temel bulguları bakımından karşılaştırmalı özeti Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Farklı iklim ve sulama koşullarında yetiştirilen bazı bitkilerde klorofil içeriğine ilişkin araştırma bulguları

Bitki	Ülke ve iklim	Sulama / su kısıtı	Ölçüm	Temel klorofil tepkisi	Kaynak
Buğday	Pakistan / yarı kurak	Dönemsel eksik sulama	SPAD, Chl a-b	Kısıt ve geç ekim klorofili azalttı.	Anjum ve ark., 2021
Buğday	Çin / Xinjiang	Tam ve sınırlı damla	SPAD	Kısıt, özellikle tane dolumunda SPAD'ı düşürdü.	Zhang ve ark., 2019
Mısır	Hindistan / yarı kurak	Nem eşiğine göre sulama	SPAD	Tepki dikim yöntemi ve döneme bağlıydı.	Halli ve ark., 2021
Çeltik	Çin	Islatma-kurutma	SPAD	SPAD %7,1 azalırken su etkinliği arttı.	Song ve ark., 2020
Pamuk	Çin / kurak	300-600 mm sulama	SPAD	En yüksek ve kararlı SPAD 450 mm'de görüldü.	Su ve ark., 2025
Soya	Macaristan / ılıman	Yağışa dayalı yarı-tam	SPAD	Tepkinin yönü gelişme dönemine göre değişti.	Basal ve Szabó, 2020
Yer fıstığı	Hindistan / yarı kurak	Orta-şiddetli kısıt	SPAD, ekstraksiyon	Şiddetli kısıtta yoğunluk arttı; fotosentez azaldı.	Kalariya ve ark., 2015
Ayçiçeği	Türkiye / Siirt	%100, %70, %35	SPAD	Güçlü kısıt SPAD'ı azalttı; genotip etkiliydi.	Uçak, 2018
Arpa	Mısır / kurak	%45-%75 nem tüketimi	SPAD, Fv/Fm	Şiddetli kısıtta SPAD ortalama %28,5 azaldı.	Mariey ve ark., 2022
Sorgum	Irak / Bağdat	%100-%40 sulama	SPAD	SPAD 67,87'den 45,33'e geriledi.	Ibrahim ve ark., 2023
Şeker pancarı	Mısır / kurak	%40-%120 ET ₀	Toplam klorofil	En yüksek klorofil %100 ET ₀ 'da belirlendi.	Abdel-Nasser ve ark., 2014
Börülce	Brezilya / tropik	Kuraklık ve yeniden sulama	SPAD	Stres SPAD'ı düşürdü; sulamayla hızlı toparlandı.	Silva ve ark., 2021
Nohut	Türkiye / Siirt	Farklı sulama düzeyleri	Klorofil indeksi	İndeks azaldı; tepki çeşit ve stres düzeyine bağlıydı.	Uçak ve Arslan, 2023
Bakla	Mısır / kurak	%100 ve %80 ET _c	SPAD, Fv/Fm	Kısıt azalttı; humik asit ve sitokinin korudu.	Ramadan ve ark., 2023

Bitki	Ülke ve iklim	Sulama / su kısıtı	Ölçüm	Temel klorofil tepkisi	Kaynak
Susam	Hindistan / yarı kurak	%80 ve %45-50 tarla kapasitesi	SPAD-502	SPAD tepkisi dönem ve genotipe göre değişti.	Pallavolu ve ark., 2023
Kinoa	İran / kurak-yarı kurak	Dönemsel sulama kesintisi	Toplam klorofil	Çiçeklenmede kesinti en düşük klorofil verdi.	Kiyan ve ark., 2022
Mısır	Mısır / kurak	%100, %80, %60 su	SPAD	%80 ve %60 su SPAD'ı %43,36 ve %73,45 azalttı.	Al-Mokadem ve ark., 2023
Domates	Türkiye / Şırnak	%100, %66, %33	SPAD	%66'da sınırlı artış, %33'te azalma görüldü.	Temur ve ark., 2023
Patlıcan	Mısır / kurak	%100 ve %60 ETc	SPAD, Fv/Fm	%60 ETc SPAD'ı %5,9 azalttı; ZnO korudu.	Semida ve ark., 2021
Acı biber	Mısır / tuzlu toprak	%100, %80, %60 TK	SPAD-502	Kısıt SPAD'ı azalttı; glutasyon kaybı sınırladı.	Al-Elwany ve ark., 2020
Hıyar	Katar / kurak çöl	%100 ve %50 damla	SPAD	%50 sulamada SPAD daha yüksek; azot etkiliydi.	Bello ve ark., 2023
Hıyar	Mısır / kurak	%100, %75, %50 ETc	SPAD, Fv/Fm	Aşırı sularda SPAD düştü; uygun anaç korudu.	Shehata ve ark., 2022
Marul	Türkiye / Antalya	Tam ve %50 kısıt	SPAD	En yüksek SPAD iki sezonda %50 sulamada görüldü.	Demir ve ark., 2022
Kıvrıkcık marul	Türkiye / sera	%100, %67, %33	Yaprak klorofil	Sulama azaldıkça klorofil düştü; biyoçar korudu.	Tüfenkçi ve Yerli, 2023
Soğan	İspanya / Akdeniz	%50-%75 RDI	SPAD-502	SPAD değişmedi; bazı uygulamalarda verim azaldı.	Abdelkhali k ve ark., 2019
Fasulye	Mısır / tuzlu alan	%100, %80, %60 ETc	SPAD, Fv/Fm	SPAD yaklaşık %29 ve %47 azaldı; GSH korudu.	Abd El Mageed ve ark., 2023
Fasulye	Mısır / kurak	Dönemsel kısıt, kaolin	SPAD, ekstraksiyon	Tepki döneme bağlıydı; kaolin klorofil destekledi.	Semida ve ark., 2023
Patates	ABD / New Mexico	Tam, %20, %40 kısıt	SPAD-502	SPAD kısıtta arttı; yumru verimi azaldı.	Shrestha ve ark., 2024
Fesleğen	Mısır / Akdeniz	0,8-1,2 CPE	SPAD-502	Kısıt çoğu ölçümde SPAD'ı artırdı; nano-Si destekledi.	Mahmoud ve ark., 2017

Bitki	Ülke ve iklim	Sulama / su kısıtı	Ölçüm	Temel klorofil tepkisi	Kaynak
Üzüm	Kıbrıs kökenli saksı /	%100, %50, %25	SPAD	Ana etki önemsiz; çeşit ve ölçüm zamanı belirleyiciydi.	Copper ve ark., 2022
Elma	Türkiye sera /	15-19 gün susuzluk	SPAD-502	Şiddetli kuraklık SPAD'ı düşürdü; M9 duyarlıydı.	Aras ve Keleş, 2019
Kayısı	Türkiye Malatya /	Dönemsel kesinti	SPAD-502	Kuraklık SPAD'ı düşürdü; toparlanma sınırlıydı.	İpek ve ark., 2026
Zeytin	Mısır hiper-kurak /	%100, %75, %50 ETc	SPAD-502	En yüksek değer %100 ETc'de; kısıtla geriledi.	El-Gioushy ve ark., 2021
Nar	Mısır / yarı kurak	%100, %75, %50	SPAD-501	Kısıt SPAD'ı azalttı; yardımcı uygulamalar sınırlıydı.	Okba ve ark., 2022
Turuncgiller	İspanya Akdeniz /	Tam ve %50 RDI	Ekstraksiyon, spektral	Tepki tür ve sulama suyu kalitesine bağlıydı.	Romero-Trigueros ve ark., 2017
Guava	Hindistan nemli subtropik /	%100, %75, %50 ETc	Toplam klorofil	%100'de 3,35; %50'de 2,14 mg g ⁻¹ bulundu.	Jat ve ark., 2022
Şeftali	Mısır Akdeniz /	%80, %70, %60 TK	SPAD-501	Sulama azaldıkça toplam klorofil düştü.	Mikhael ve ark., 2010
Badem	Portekiz Akdeniz /	Tam, %35 ve RDI	Chl a-b, toplam	Tam-%35 dönüşümlü RDI klorofili daha iyi korudu.	Prgomet ve ark., 2020
Karabiber	Brezilya tropik /	%100, %78, %52, %32	Klorofil indeksi	Şiddetli kısıtta Chl a indeksi yaklaşık yarıya düştü.	Ambrozim ve ark., 2022
Hurma	Suudi Arabistan / kurak	%100, %75, %50 ETc	SPAD-502	%100 ETc en yüksek klorofili verdi; sistem etkiliydi.	Mohammed ve ark., 2021

6. Genel Değerlendirme

Farklı iklim ve sulama koşullarında yürütülen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, şiddetli veya uzun süreli su kısıtının birçok bitkide klorofil içeriğini azaltma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu eğilim buğday, ayçiçeği, patlıcan, biber, aşısız hıyar, kıvırcık marul, elma, kayısı, zeytin, nar ve guava gibi farklı bitki gruplarında belirlenmiştir. Su noksanlığı altında yaprak gelişiminin, pigment sentezinin ve fotosentetik yapıların korunmasının sınırlandırılması, bu azalmanın temel nedenleri arasında değerlendirilebilir.

Bununla birlikte sulama suyu azaldığında klorofil veya SPAD değerinin her zaman düşmediği görülmüştür. Pamukta orta düzey sulama en yüksek ve kararlı SPAD değerini sağlamış; soya, yer fıstığı, domates, hıyar ve marulda bazı dönem veya uygulamalarda kısıntılı sulama daha yüksek değerler vermiştir (Basal ve Szabó, 2020; Kalariya ve ark., 2015; Su ve ark., 2025; Bello ve ark., 2023; Demir ve ark., 2022). Bu artışlar, daha yüksek fotosentetik etkinlikten kaynaklanabileceği gibi yaprak alanının küçülmesi, yaprağın kalınlaşması veya pigmentin daha küçük dokuda yoğunlaşmasıyla da ilişkili olabilir. Soğanda SPAD değeri değişmeden verim kaybının oluşması da klorofil indeksinin su stresine karşı her zaman en duyarlı gösterge olmadığını ortaya koymaktadır (Abdelkhalik ve ark., 2019).

Çalışmalar arasındaki farklılıkların yalnız iklim sınıflarıyla açıklanması mümkün değildir. Kurak ve yarı kurak bölgelerde çoğunlukla klorofil kaybı görülmekle birlikte, aynı iklim grubunda yetiştirilen bitkiler farklı tepkiler verebilmiştir. Buna karşılık nemli subtropik koşullarda yetiştirilen guavada şiddetli kısıntılı sulama klorofil içeriğini azaltmıştır (Jat ve ark., 2022). Dolayısıyla bölgenin genel iklimi kadar deneme dönemindeki sıcaklık ve yağış, kök bölgesindeki su durumu, toprağın su tutma özelliği ve sulama suyu kalitesi de dikkate alınmalıdır.

Genotip ve yetiştirme materyali, sulama-klorofil ilişkisinin önemli belirleyicilerindendir. Buğday ve ayçiçeğinde çeşitler, elmada anaçlar, hıyarda aşılama ve üzümde yerel çeşitler farklı klorofil tepkileri oluşturmuştur (Zhang ve ark., 2019; Uçak, 2018; Aras ve Keleş, 2019; Shehata ve ark., 2022; Copper ve ark., 2022). Benzer şekilde azot ve potasyum uygulamaları, biyoçar, malç ve bazı yaprak uygulamaları su kısıtı altında klorofilin korunmasına katkı sağlayabilmiştir. Bu nedenle klorofil içeriği, yalnız sulama miktarının değil bitki materyali ile yetiştirme uygulamalarının ortak sonucu olarak ele alınmalıdır.

Araştırmalarda kullanılan ölçüm yöntemleri de karşılaştırmayı sınırlandırmaktadır. SPAD cihazları hızlı ve tahribatsız ölçüm sağlarken göreceli bir indeks üretmekte; ekstraksiyona dayalı yöntemler ise klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil miktarını farklı birimlerle vermektedir. SPAD değeri yaprak

kalınlığı, yaprak su içeriği, ışınım ve ölçüm noktasından etkilenebildiği için farklı türler arasında doğrudan mutlak değer karşılaştırması yapılması uygun değildir (Martínez ve Guiamét, 2004; Xiong ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2022). Daha sağlıklı değerlendirme için aynı tür içindeki uygulama farklarının, ölçüm zamanı ve kullanılan yöntemin birlikte ele alınması gerekmektedir.

7. Sonuç

Bu bölümde incelenen araştırmalar, yaprak klorofil içeriğinin bitkilerin farklı iklim ve sulama koşullarına verdiği fizyolojik tepkinin izlenmesinde yararlı bir gösterge olduğunu ortaya koymuştur. Genel eğilim, şiddetli ve uzun süreli su noksanlığının klorofil içeriğini azaltmasıdır. Ancak orta düzey su kısıtında klorofilin korunması veya SPAD değerinin artması ve bazı türlerde klorofil değişmeden verim kaybının ortaya çıkması, bu göstergenin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir.

Klorofil veya SPAD sonuçları değerlendirilirken bitki türü ve çeşidi, anaç, gelişme dönemi, yaprak özellikleri, sulamanın miktarı ve zamanı, toprak koşulları, su kalitesi ve kullanılan ölçüm yöntemi birlikte dikkate alınmalıdır. Özellikle farklı ülkelerde yürütülen çalışmalar karşılaştırılırken mutlak SPAD değerlerinden çok, aynı çalışma içerisindeki sulama uygulamaları arasındaki değişimlerin incelenmesi daha uygun olacaktır.

Sonuç olarak klorofil ölçümleri, su kısıtının bitki üzerindeki etkisini hızlı ve pratik biçimde izlemek için kullanılabilir. Bununla birlikte sulama yönetimine ilişkin kararların yalnız klorofil değerlerine dayandırılmaması; ölçümlerin yaprak su durumu, fotosentetik etkinlik, büyüme, verim ve su kullanım etkinliği gibi göstergelerle desteklenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, farklı iklim bölgelerinde sınırlı su kaynaklarının daha doğru değerlendirilmesine ve bitkiye uygun sulama stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynaklar

- Abd El Mageed, T. A., Semida, W. M., Hemida, K. A., Gyushi, M. A. H., Rady, M. M., Abdelkhalik, A., Merah, O., Brestic, M., Mohamed, H. I., El Sabagh, A., & Abdelhamid, M. T. (2023). Glutathione-mediated changes in productivity, photosynthetic efficiency, osmolytes, and antioxidant capacity of common beans (*Phaseolus vulgaris*) grown under water deficit. *PeerJ*, 11, e15343. <https://doi.org/10.7717/peerj.15343>
- Abdelkhalik, A., Pascual, B., Nájera, I., Baixauli, C., & Pascual-Seva, N. (2019). Regulated deficit irrigation as a water-saving strategy for onion cultivation in Mediterranean conditions. *Agronomy*, 9(9), 521. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090521>
- Abdel-Nasser, G., BenAbdalla, K., & Osman, A. (2014). Response of sugar beet yield to deficit irrigation under drip irrigation system. *Journal of the Advances in Agricultural Researches*, 19(3), 442-459. <https://doi.org/10.21608/jalexu.2014.160514>
- Al-Elwany, O. A. A. I., Mohamed, G. F., Abdurrahman, H. A., Rady, M. M., & Abdel Latef, A. A. (2020). Exogenous glutathione-mediated tolerance to deficit irrigation in salt-affected *Capsicum frutescens* (L.) plants is connected with higher antioxidant content and ionic homeostasis. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(4), 1957-1979. <https://doi.org/10.15835/nbha48412126>
- Al-Mokadem, A. Z., Sheta, M. H., Mancy, A. G., Hussein, H.-A. A., Kenawy, S. K. M., Sofy, A. R., Abu-Shahba, M. S., Mahdy, H. M., Sofy, M. R., Al Bakry, A. F., & Agha, M. S. (2023). Synergistic effects of kaolin and silicon nanoparticles for ameliorating deficit irrigation stress in maize plants by upregulating antioxidant defense systems. *Plants*, 12(11), 2221. <https://doi.org/10.3390/plants12112221>
- Ambrozim, C. S., Médiç, L. O., Cruz, E. S., Abreu, J. F. G., & Carvalho, D. F. (2022). Physiological response of black pepper (*Piper nigrum* L.) to deficit irrigation. *Revista Ciência Agronômica*, 53, e20220002. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220002>
- Anjum, M. M., Arif, M., Riaz, M., Akhtar, K., Zhang, S. Q., & Zhao, C. P. (2021). Performance of hybrid wheat cultivars facing deficit irrigation under semi-arid climate in Pakistan. *Agronomy*, 11(10), 1976. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101976>
- Aras, S., & Keleş, H. (2019). Responses of apple plants to drought stress. *Journal of Agricultural Studies*, 7(3), 153-162. <https://doi.org/10.5296/jas.v7i3.15271>

- Basal, O., & Szabó, A. (2020). The combined effect of drought stress and nitrogen fertilization on soybean. *Agronomy*, 10(3), 384. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030384>
- Bello, A. S., Huda, S., Chen, Z. H., Khalid, M. F., Alsafran, M., & Ahmed, T. (2023). Evaluation of nitrogen and water management strategies to optimize yield in open field cucumber (*Cucumis sativus* L.) production. *Horticulturae*, 9(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121336>
- Copper, A. W., Koundouras, S., Bastian, S. E. P., Johnson, T. E., & Collins, C. (2022). Assessing the response of *Vitis vinifera* L. cv. Xynisteri to different irrigation regimes and its comparison to cvs. Maratheftiko, Shiraz and Sauvignon Blanc. *Agronomy*, 12(3), 634. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030634>
- Croft, H., Chen, J. M., Luo, X., Bartlett, P., Chen, B., & Staebler, R. M. (2017). Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity. *Global Change Biology*, 23(9), 3513-3524. <https://doi.org/10.1111/gcb.13599>
- Croft, H., Chen, J. M., Wang, R., Mo, G., Luo, S., Luo, X., He, L., Gonsamo, A., Arabian, J., Zhang, Y., Simic-Milas, A., Noland, T. L., He, Y., Homolová, L., Malenovský, Z., Yi, Q., Beringer, J., Amiri, R., Hutley, L. B., ... Bonal, D. (2020). The global distribution of leaf chlorophyll content. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111479. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111479>
- Demir, H., Kaman, H., Sönmez, İ., Mohamoud, S. S., Polat, E., & Üçok, Z. (2022). Yield, quality and plant nutrient contents of lettuce under different deficit irrigation conditions. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 21(1), 115-129. <https://doi.org/10.24326/asphc.2022.1.10>
- Dong, T., Shang, J., Chen, J. M., Liu, J., Qian, B., Ma, B., Morrison, M. J., Zhang, C., Liu, Y., Shi, Y., Pan, H., & Zhou, G. (2019). Assessment of portable chlorophyll meters for measuring crop leaf chlorophyll concentration. *Remote Sensing*, 11(22), 2706. <https://doi.org/10.3390/rs11222706>
- El-Gioushy, S., Dobiea, I., Khaitov, B., Karimov, A., & Zewail, R. (2021). Physiological behavior of olive (*Olea europaea* L.) varieties under different foliage nutrition and irrigation regimes in the hyper-arid zone. *Eurasian Journal of Soil Science*, 10(4), 290-301. <https://doi.org/10.18393/ejss.954961>
- Halli, H. M., Angadi, S., Kumar, A., Govindasamy, P., Madar, R., Baskar, V. D., Elansary, H. O., Tamam, N., Abdelbacki, A. M. M., & Abdelmohsen, S. A. M. (2021). Assessment of planting method and deficit irrigation impacts on physio-morphology, grain yield and water use efficiency of maize (*Zea*

- mays L.) on Vertisols of semi-arid tropics. *Plants*, 10(6), 1094. <https://doi.org/10.3390/plants10061094>
- Ibrahim, W. M., Ati, A. S., & Majeed, S. S. (2023). Response water productivity and sorghum yield to deficit irrigation under surface drip irrigation system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1259(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1259/1/012029>
- İpek, M., Arıkan, Ş., Yavuz, D., Eşitken, A., Pırlak, L., & Karlıdağ, H. (2026). 'Hacıhaliloğlu' apricot under simulated drought: Morphological, physiological, biochemical, and flower biology responses. *BMC Plant Biology*, 26, 204. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07983-9>
- Jat, R., Singh, V. P., Ali Abed, S., Al-Ansari, N., Singh, P. K., Vishwakarma, D. K., Choudhary, A., Al-Sadoon, M. K., Popat, R. C., & Jat, S. K. (2022). Deficit irrigation scheduling with mulching and yield prediction of guava (*Psidium guajava* L.) in a subtropical humid region. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1044886. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1044886>
- Kalariya, K. A., Singh, A. L., Goswami, N., Mehta, D., Mahatma, M. K., Ajay, B. C., & Patel, C. B. (2015). Photosynthetic characteristics of peanut genotypes under excess and deficit irrigation during summer. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 21(3), 317-327. <https://doi.org/10.1007/s12298-015-0300-8>
- Kiyan, H. F., Tatari, M., & Tokalo, M. R. (2022). The effect of deficit irrigation and fertilizer on quantitative and qualitative yield of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Italian Journal of Agrometeorology*, 1, 83-99. <https://doi.org/10.36253/ijam-1136>
- Lee, S., & Masclaux-Daubresse, C. (2021). Current understanding of leaf senescence in rice. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 4515. <https://doi.org/10.3390/ijms22094515>
- Mahmoud, M. A., Shala, A. Y., & Rashed, N. M. (2017). The mutual effect of irrigation scheduling and foliar spray of silica nanoparticles on basil plant. *Journal of Plant Production*, 8(12), 1303-1313. <https://doi.org/10.21608/jpp.2017.41984>
- Mariey, S. A., Khatab, I. A., Shahein, A. M. E. A., Abo-Marzoka, E.-S. A., Noreldin, T., Badawy, A. F., & El-Naggar, A. A. (2022). Comprehensive selection criteria for some barley genotypes under different water stress treatments. *International Journal of Plant & Soil Science*, 34(23), 1777-1791. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i232604>

- Martínez, D. E., & Guiamét, J. J. (2004). Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie*, 24(1), 41-46. <https://doi.org/10.1051/agro:2003060>
- Mikhael, G., Aziz, M. A., & Abd El-Messeih, W. (2010). Effect of some flood irrigation and potassium fertilization treatments on vegetative growth, yield and fruit quality of 'Dessert Red' peach trees grown in clay soil. *Journal of Plant Production*, 1(4), 599-620. <https://doi.org/10.21608/jpp.2010.86382>
- Mohammed, M., Sallam, A. A., Munir, M., & Ali-Dinar, H. (2021). Effects of deficit irrigation scheduling on water use, gas exchange, yield, and fruit quality of date palm. *Agronomy*, 11(11), 2256. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112256>
- Nagahatenna, D. S. K., Langridge, P., & Whitford, R. (2015). Tetrapyrrole-based drought stress signalling. *Plant Biotechnology Journal*, 13(4), 447-459. <https://doi.org/10.1111/pbi.12356>
- Okba, S. K., Mazrou, Y. S. A., Mikhael, G. B., Farag, M. E. H., & Alam-Eldein, S. M. (2022). Magnetized water and proline to boost the growth, productivity and fruit quality of 'Taifi' pomegranate subjected to deficit irrigation in saline clay soils of semi-arid Egypt. *Horticulturae*, 8(7), 564. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070564>
- Pallavolu, L. A., Pasala, R., Kulasekaran, R., Pandey, B. B., Virupaksham, U., & Perika, S. (2023). Analysing the SPAD dynamics of water-stressed vs. well-watered sesame (*Sesamum indicum* L.) accessions and establishing their relationship with seed yield. *PeerJ*, 11, e14711. <https://doi.org/10.7717/peerj.14711>
- Pradhan, A., Aher, L., Hegde, V. I., Jangid, K. K., & Rane, J. (2022). Cooler canopy leverages sorghum adaptation to drought and heat stress. *Scientific Reports*, 12, 4603. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08590-6>
- Prgomet, I., Pascual-Seva, N., Morais, M. C., Aires, A., Barreales, D., Ribeiro, A. C., Silva, A. P., Barros, A. I. R. N. A., & Gonçalves, B. (2020). Physiological and biochemical performance of almond trees under deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 261, 108990. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108990>
- Ramadan, K. M. A., El-Beltagi, H. S., Abd El-Mageed, T. A., Saady, H. S., Al-Otaibi, H. H., & Mahmoud, M. A. A. (2023). The changes in various physio-biochemical parameters and yield traits of faba bean due to humic acid plus 6-benzylaminopurine application under deficit irrigation. *Agronomy*, 13(5), 1227. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051227>

- Romero-Trigueros, C., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Hunink, J. E., Parra, M., Contreras, S., Droogers, P., & Nicolás, E. (2017). Effects of saline reclaimed waters and deficit irrigation on Citrus physiology assessed by UAV remote sensing. *Agricultural Water Management*, 183, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.014>
- Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G. F., Abd El-Mageed, T. A., Abd El-Mageed, S. A., Rady, M. M., & Ali, E. F. (2021). Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Plants*, 10(2), 421. <https://doi.org/10.3390/plants10020421>
- Semida, W. M., Emara, A. E., Ghoneim, I., & Barakat, M. N. (2023). Kaolin foliar application enhanced physiological functions and pods quality of *Phaseolus vulgaris* L. under deficit irrigation regimes. *Labyrinth: Fayoum Journal of Science and Interdisciplinary Studies*, 1(1), 84-94. <https://doi.org/10.21608/ifjssis.2023.302858>
- Shehata, S. A., Omar, H. S., Elfaidy, A. G. S., El-Sayed, S. S. F., Abuarab, M. E., & Abdeldaym, E. A. (2022). Grafting enhances drought tolerance by regulating stress-responsive gene expression and antioxidant enzyme activities in cucumbers. *BMC Plant Biology*, 22, 408. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03791-7>
- Shrestha, B., Stringam, B. L., Darapuneni, M. K., Lombard, K. A., Sanogo, S., Higgins, C., & Djaman, K. (2024). Effect of irrigation and nitrogen management on potato growth, yield, and water and nitrogen use efficiencies. *Agronomy*, 14(3), 560. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030560>
- Silva, J. S., Costa, R. S., Tomaz, F. L. S., Bezerra, A. E., & Mesquita, R. O. (2021). Mechanisms of tolerance to water deficit and physiological responses to rehydration in cowpea. *Revista Ciência Agronômica*, 52(3), e20210034. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210034>
- Simkin, A. J., Kapoor, L., Doss, C. G. P., Hofmann, T. A., Lawson, T., & Ramamoorthy, S. (2022). The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynthesis Research*, 152(1), 23-42. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00892-6>
- Song, T., Yang, F., Das, D., Chen, M. X., Hu, Q. J., Tian, Y., Cheng, C. L., Liu, Y., & Zhang, J. H. (2020). Transcriptomic analysis of photosynthesis-related genes regulated by alternate wetting and drying irrigation in flag leaves of rice. *Food and Energy Security*, 9(3), e221. <https://doi.org/10.1002/fes3.221>

- Su, F., Guo, Z., Wu, B., Wang, J., & Chen, S. (2025). Effects of different irrigation regimes on root growth and physiological characteristics of mulch-free cotton in Southern Xinjiang. *Life*, 15(3), 435. <https://doi.org/10.3390/life15030435>
- Temur, B., Akhoundnejad, Y., Nas, Y., & Ersoy, L. (2023). Effect of different potassium fertilizers on yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under drought stress conditions. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 7(4), 761-769. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.4.5>
- Tüfenkçi, Ş., & Yerli, C. (2023). Physical and physiological properties and mineral content of curly lettuce grown by applying different rates of biochar to the soil with varying irrigation water levels. *International Journal of Agriculture and Wildlife Science*, 9(2), 205-217. <https://doi.org/10.24180/ijaws.1255958>
- Uçak, A. B. (2018). Identification of sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes tolerant to water stres. *Journal of Agricultural Sciences*, 24(3), 312-322. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.456645>
- Uçak, A. B., & Arslan, H. (2023). Drought stress resistance indicators of chickpea varieties grown under deficit irrigation conditions. *PeerJ*, 11, e14818. <https://doi.org/10.7717/peerj.14818>
- Xiong, D., Chen, J., Yu, T., Gao, W., Ling, X., Li, Y., Peng, S., & Huang, J. (2015). SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific Reports*, 5, 13389. <https://doi.org/10.1038/srep13389>
- Zhang, R., Yang, P., Liu, S., Wang, C., & Liu, J. (2022). Evaluation of the methods for estimating leaf chlorophyll content with SPAD chlorophyll meters. *Remote Sensing*, 14(20), 5144. <https://doi.org/10.3390/rs14205144>
- Zhang, Y., Wang, Z., Fan, Z., Li, J., Gao, X., Zhang, H., Zhao, Q., Wang, Z., & Liu, Z. (2019). Phenotyping and evaluation of CIMMYT WPHYSGP nursery lines and local wheat varieties under two irrigation regimes. *Breeding Science*, 69(1), 55-67. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.18104>

3. Bölüm

Türkiye’de Tarım Ceza Hukuku: Sürdürülebilirlik, Çevre Koruma ve Gıda Güvenliği Ekseninde Suç ve Kabahatlerin Analizi

Ayşe ÇALHAN¹, Ahmet ASLAN¹

1. GİRİŞ

Tarım sektörü, insanlığın temel gıda ihtiyacını karşılamasının yanı sıra doğal kaynakların korunması, kırsal kalkınmanın sağlanması ve ekonomik sürdürülebilirliğin devam ettirilmesi bakımından stratejik bir öneme sahiptir. Toprak, su, mera, bitki ve hayvan varlığı gibi doğal kaynaklar tarımsal üretimin temel unsurlarını oluşturmakta; bu kaynakların korunması ise yalnızca üreticilerin değil toplumun tamamının ortak menfaatleri arasında yer almaktadır (Başpınar, 2014; Ermenek, 2023). Tarımsal faaliyetlerin yürütüldüğü alanlarda meydana gelen mülkiyet ihlalleri, çevresel zararlar, gıda güvenliğini tehdit eden uygulamalar ve ortak kullanım alanlarına yönelik müdahaleler, yalnızca bireysel hak kayıplarına değil aynı zamanda kamu düzeninin ve ekolojik dengenin bozulmasına da yol açabilmektedir. Türk hukuk sisteminde tarımsal üretim kaynaklarının korunması anayasal düzeyde güvence altına alınmıştır. Türkiye Cumhuriyeti Anayasası'nın 44. maddesinde devletin toprağın verimli işletilmesini koruma ve geliştirme yükümlülüğü düzenlenmiş, 45. maddesinde ise tarım arazileri ile çayır ve meraların amaç dışı kullanılmasının önlenmesi görevi devlete verilmiştir. Bunun yanında Anayasa'nın 56. maddesi herkesin sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkına sahip olduğunu hüküm altına alarak çevrenin korunmasını hem devlet hem de vatandaşlar bakımından ortak bir sorumluluk olarak kabul etmiştir (Türkiye Cumhuriyeti Anayasası, 1982).

Anayasal düzeyde kabul edilen bu koruma anlayışı, tarım ve çevre hukukuna ilişkin özel kanunlar ile ceza hukuku normlarında somutlaşmaktadır. Nitekim 2872 sayılı Çevre Kanunu çevrenin korunmasını sürdürülebilir kalkınmanın temel unsurlarından biri olarak kabul ederken, 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu tarım topraklarının korunmasını ve amaç dışı kullanımının

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, av.donmezayse44@gmail.com

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, ahmet.aslan@ozal.edu.tr

önlenmesini hedeflemektedir. Benzer şekilde 4342 sayılı Mera Kanunu, 5488 sayılı Tarım Kanunu ve 5996 sayılı Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanunu da tarımsal üretim sisteminin farklı bileşenlerini korumaya yönelik hükümler içermektedir (Ermenek, 2023; Güvenç, 2024). Ancak tarımsal kaynakların korunması yalnızca idari tedbirler ve özel hukuk mekanizmalarıyla sağlanamamaktadır. Toprağın işgali, meraların tahribi, çevrenin kirletilmesi, kaçak yapılaşma, gıda güvenliğini

Tehdit eden faaliyetler ve benzeri hukuka aykırı eylemler karşısında ceza hukuku da koruyucu bir araç olarak devreye girmektedir. Ceza hukukunun temel işlevlerinden biri toplumsal düzeni korumak ve hukuki değerleri güvence altına almak olduğundan, çevre, kamu sağlığı ve mülkiyet gibi tarımsal faaliyetlerle doğrudan bağlantılı hukuki değerler de cezai koruma kapsamına alınmıştır (Hafizoğulları ve Güngör, 2007). Türk hukukunda tarımsal faaliyetlerle ilişkili cezai düzenlemeler iki temel yapı altında incelenebilmektedir. Birincisi, Türk Ceza Kanunu bünyesinde yer alan ve doğrudan ya da dolaylı olarak tarımsal alanları koruyan suç tipleridir. Hakkı olmayan yere tecavüz, çevrenin kirletilmesi, imar kirliliğine neden olma, zehirli madde katma ve bozulmuş gıda ticareti gibi suçlar bu kapsamda değerlendirilmektedir. İkincisi ise Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu, Mera Kanunu, Çevre Kanunu ve Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanunu gibi özel mevzuatlarda düzenlenen suç ve kabahat hükümleridir. Bu çok katmanlı yapı, tarımsal üretim kaynaklarının korunmasında hem adli hem de idari yaptırımların birlikte uygulanmasına imkân sağlamaktadır. Bununla birlikte, tarımsal suçlar alanındaki çalışmaların önemli bir kısmının normatif değerlendirmelerle sınırlı kaldığı, söz konusu suçların uygulamadaki görünümünü ortaya koyan ampirik araştırmaların ise oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle adli istatistikler üzerinden tarımsal faaliyetlerle ilişkili suçların yargısal yansımalarını inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu nedenle mevzuat hükümlerinin teorik çerçevesi ile uygulamadaki görünümünün birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu bölümün amacı, Türk Ceza Kanunu ve tarımsal faaliyetlerle ilişkili özel kanunlarda yer alan suç ve kabahat hükümlerini incelemek, ayrıca Adalet Bakanlığı Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan 2023-2025 yıllarına ait veriler ışığında bu düzenlemelerin uygulamadaki görünümünü ortaya koymaktır. Bu kapsamda öncelikle tarımsal faaliyetlerle bağlantılı suç tiplerinin hukuki yapısı değerlendirilmiş, ardından adli istatistiklerden elde edilen bulgular analiz edilerek tarım ceza hukukunun mevcut durumu ve geliştirilmesine yönelik öneriler ortaya konulmuştur.

Bu bölüm hazırlanırken Türkiye’de tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği, tarım alanlarının korunması ve kamu sağlığının güvence altına alınmasına yönelik cezai

ve idari yaptırımlar incelenmiştir. Çalışmanın temel materyalini Türk Ceza Kanunu, tarımsal faaliyetleri doğrudan veya dolaylı olarak düzenleyen özel kanunlar ile Adalet Bakanlığı Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan 2023, 2024 ve 2025 yıllarına ait adli istatistik verileri oluşturmuştur. Ayrıca konuya ilişkin ulusal hukuk literatürü, bilimsel makaleler, lisansüstü tezler ve mevzuat kaynaklarından da yararlanılmıştır. Araştırmada nitel araştırma yöntemlerinden doküman incelemesi yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda öncelikle tarımsal faaliyetler, çevre, kamu sağlığı ve kırsal alanların korunması ile ilişkili suç ve kabahatler belirlenmiş, daha sonra bu fiillere ilişkin yasal düzenlemeler sistematik biçimde incelenmiştir. Türk Ceza Kanunu kapsamında değerlendirilen suç tipleri ile özel kanunlarda düzenlenen suç ve kabahatler ayrı başlıklar altında ele alınarak hukuki içerikleri bakımından değerlendirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında Adalet Bakanlığı tarafından yayımlanan adli istatistikler incelenmiş ve tarımsal faaliyetlerle ilişkilendirilebilecek suç tiplerine ait dava, sanık ve karar sayıları analiz edilmiştir. Elde edilen veriler betimsel analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş; mahkûmiyet, beraat ve hükmün açıklanmasının geri bırakılması kararlarının yıllara göre dağılımı yorumlanmıştır. Böylece mevcut cezai yaptırımların uygulamadaki görünümü ile tarımsal alanların korunmasına yönelik hukuki mekanizmaların işleyişi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Araştırmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Çalışmada yalnızca Adalet Bakanlığı tarafından yayımlanan resmi adli istatistiklerden yararlanılmıştır. Tarım ve Orman Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile yerel idareler tarafından uygulanan idari yaptırımlara ilişkin ayrıntılı verilerin tamamına ulaşılamamıştır. Bu nedenle çalışma, tarımsal ihlallerin yalnızca adli yargıya yansıyan boyutunu değerlendirmekte olup, idari yaptırımlarla sonuçlanan olayları kapsamamaktadır.

2. TCK KAPSAMINDA TARIMSAL SUÇLAR

2.1.Suç ve Kabahat Kavramlarının Ceza Hukuku Bağlamındaki Tanımları

Ceza hukukunun temelini oluşturan düzene aykırı davranışlar, toplumsal yaşamın sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla yasal müeyyidelere bağlanmıştır. Hukuk sistemimizde kamusal düzeni ihlal eden bu fiiller, ağırlık derecelerine, korunan hukuki değerlere ve uygulanacak yaptırım türlerine göre suç ve kabahat olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır (Hafızoğulları ve Güngör, 2007). Bu iki kavram arasındaki ayrım, hem teorik düzeyde ceza hukukunun sınırlarını belirlemekte hem de tarımsal alanların korunması gibi özel uzmanlık gerektiren sahalarda yasal korumanın dozajını tayin etmektedir.

Suç, toplumsal varoluşa ve bireylerin temel haklarına yönelik ağır tecavüzleri ifade eden, kanunda açıkça tanımlanmış ve karşılığında hapis veya adli para cezası gibi ağır yaptırımlar öngörülen hukuka aykırı fiillerdir. Bir eylemin suç olarak

nitelendirilebilmesi için kanunilik ilkesi gereğince mevzuatta açıkça yer alması ve haksızlık içeriğinin toplumsal barışı ciddi ölçüde zedelemesi gerekir. Tarımsal ekosistem bağlamında değerlendirildiğinde, su kaynaklarının kasten zehirlenmesi veya orman alanlarının yakılması gibi doğrudan ekolojik yıkıma ve kamu sağlığının tehlikeye düşmesine yol açan ağır eylemler suç statüsünde ele alınmaktadır.

Kabahat ise suç düzeyine ulaşmayan, toplumsal düzeni ve idari işleyişi hafif nitelikte ihlal eden, genellikle idari para cezası veya mülkiyetin kamuya geçirilmesi gibi idari yaptırımlarla karşılanan fiiller bütünüdür. Kabahatler Kanunu bünyesinde genel çerçevesi çizilen bu kavram, ceza hukukunun ikincilliği ilkesine dayanarak adli mekanizmaları gereksiz yere meşgul etmemeyi amaçlamaktadır. Tarım hukukundaki pratik yansımalarında ise anız yakılması, tarım arazilerinin izinsiz olarak hobi bahçelerine dönüştürülmesi veya karantina kurallarına aykırı şekilde bitki nakli yapılması gibi eylemler çoğunlukla kabahat kapsamında değerlendirilerek idari yaptırıma tabi tutulmaktadır.

Suç ve kabahat arasındaki bu ayrım, yargılama usullerinde ve zamanaşımı sürelerinde de kendini göstermektedir. Suçların soruşturulması ve kovuşturulması adli yargı makamlarınca yürütülürken, kabahatlerde yaptırım uygulama yetkisi çoğunlukla mülki amirlere veya ilgili bakanlıkların taşra teşkilatlarına bırakılmıştır. Bu durum tarımsal ihlallerle mücadelede idari kurumların daha hızlı aksiyon almasını sağlasa da caydırıcılık noktasında bazen yetersiz kalabilmektedir.

2.2. Türk Ceza Yargılamasının İşleyişi

Ceza muhakemesi hukuku, suç şüphesinin adli makamlarca öğrenilmesinden başlayarak hükmün kesinleşmesine kadar geçen süreci titizlikle düzenleyen pratik kurallar bütünüdür (Bekar, 2017). Tarımsal alanlarda işlenen suçların ve kamu sağlığını tehdit eden ihlallerin cezalandırılabilmesi de bu yasal prosedürlerin eksiksiz uygulanmasına bağlıdır. Türk ceza yargılaması temel olarak soruşturma ve kovuşturma olmak üzere iki ana aşamadan meydana gelmektedir.

Soruşturma aşaması, yetkili adli makamların suç şüphesini ihbar, şikâyet veya doğrudan öğrenmesiyle başlayan ilk süreçtir. Bu evre tamamen Cumhuriyet savcısının liderliğinde ve kolluk kuvvetlerinin sahadaki araştırmalarıyla yürütülmektedir. Tarımsal suçlar özelinde bakıldığında, kolluk ekiplerinin veya tarım müdürlüğü teknik personelinin arazide yaptığı tespitler ile tuttuğu resmi tutanaklar soruşturmanın temel delillerini oluşturmaktadır. Soruşturma evresi gizli ve dağınık bir yapıya sahip olup, temel amacı suçun işlenip işlenmediğini, işlenmişse failin kim olduğunu ortaya çıkaracak delilleri toplamaktır. Cumhuriyet savcısı bu sürecin sonunda yeterli şüpheyi ulaşırsa bir iddianame düzenleyerek kamu davası açılmasını talep etmektedir.

Kovuşturma aşaması ise iddianamenin yetkili mahkeme tarafından kabul edilmesiyle başlayan, duruşmaların yapıldığı ve kamuya açık olarak yürütülen yargılama sürecidir. Bu evrede iddia, savunma ve yargılama makamları mahkeme huzurunda karşı karşıya gelmektedir. Tarım arazilerine yönelik ihlallerde ya da çevre kirliliği davalarında mahkeme heyeti tarafları dinlemekte, keşif kararları almakta ve adli tıp uzmanları ile ziraat mühendislerinin bilirkişi raporlarını değerlendirmektedir. Kovuşturma aşaması, mahkemenin uyuşmazlığa ilişkin nihai kararı olan hükmü açıklaması ile son bulmaktadır.

2.3. Türk Ceza Yargılamasında Hüküm Sonucunda Verilen Ceza Türleri

Ceza muhakemesi sürecinin son aşaması olan kovuşturma evresi, mahkemenin uyuşmazlığı esastan çözen nihai bir karar vermesiyle neticelenmektedir. Ceza Muhakemesi Kanunu uyarınca mahkemenin verdiği bu son kararlara hüküm adı verilmektedir (Bekar, 2017). Tarımsal suçlar veya kamu sağlığına karşı işlenen fiiller nedeniyle açılan kamu davalarında, yargılama makamları toplanan deliller ve bilirkişi raporları doğrultusunda farklı yasal hükümler tesis edebilmektedir. Bu kararlar sanığın hukuki statüsünü ve ceza sorumluluğunu doğrudan belirlemektedir.

Mahkemelerin verebileceği ilk ve en yalın hüküm beraat kararıdır. Sanığın üzerine atılı tarımsal suç fiilinin kanunda suç olarak tanımlanmamış olması, eylemin sanık tarafından işlenmediğinin sabit olması, suç kastının bulunmaması veya delil yetersizliği gibi durumlarda beraat kararı verilmektedir. Özellikle çevre kirliliği veya suların zehirlenmesi gibi teknik ispat gerektiren tarımsal davalarda, fiil ile zarar arasındaki nedensellik ilişkisinin kesin olarak ortaya konulamaması sıklıkla beraat hükümleriyle sonuçlanmaktadır. Bir diğer karar türü olan ceza verilmesine yer olmadığı kararı ise fiilin suç oluşturmaya devam etmesine rağmen, sanığın yaş küçüklüğü, akıl hastalığı gibi kusurluluğu ortadan kaldıran durumların varlığı halinde uygulanmaktadır.

Sanığın üzerine atılı tarımsal suçu işlediğinin hiçbir şüpheye yer bırakmayacak şekilde delillerle kanıtlanması durumunda ise mahkûmiyet hükmü kurulmaktadır. Mahkûmiyet kararı, suçun niteliğine göre hapis cezası veya adli para cezası şeklinde olabilmektedir. Tarıma ilişkin ceza yargılamalarında sıklıkla karşımıza çıkan bir diğer alternatif müessese ise hükmün açıklanmasının geri bırakılması uygulamasıdır. Bu kararda mahkeme sanığı suçlu bulmakta ve bir ceza tayin etmektedir ancak sanığın adli sicil geçmişini gözetilerek hükmün hukuki sonuç doğurması belirli bir denetim süresi boyunca ertelenmektedir. Sanık beş yıllık denetim süresi içinde kasti bir suç işlemezse dava tamamen düşmekte ve bu durum adli sicil kaydına yansımamaktadır. Yargılama esnasında suçun idari bir düzensizlik yani kabahat niteliğinde olduğunun anlaşılması durumunda ise mahkeme idari yaptırım kararı vererek süreci sonlandırabilmektedir.

2.4. Tarım Alanında İşlenen Suçların Türk Ceza Kanunundaki Görünümü

2.4.1. Hakkı Olmayan Yere Tecavüz Suçu (TCK m.154)

Türk Ceza Hukuku sistematüğinde taşınmazların mülkiyet ve zilyetlik haklarını korumayı amaçlayan yasal düzenlemeler, tarihsel süreçte toplumsal yapının ve özellikle kırsal alanlardaki dirlik ve düzenin korunması ihtiyacına göre şekillenmiştir (Aksakal, 2004). Mülga 765 sayılı Türk Ceza Kanununun 513 ve 515. maddelerinde mehz İtalyan Ceza Kanunundan mülhem olarak "Hakkı Olmayan Yerlere Tecavüz Suçu" başlığı altında; sınırları değıştirme, köy mallarına tecavüz, suların mecrasını değıştirme ve taşınmazdan faydalanmaya engel olma gibi fiiller ayrı ayrı yaptırıma bağlanmıştır. Yürürlükteki 5237 sayılı Türk Ceza Kanununun 154. maddesinde ise bu dağılık yapı tek bir çatı altında toplanarak üç temel fıkra halinde sistematize edilmiştir.

Maddenin birinci fıkrasında kamuya veya özel kişilere ait taşınmazların haksız işgali ve sınırların bozulması düzenlenirken; ikinci fıkrasında köy tüzel kişiliğine ait veya köylünün ortak kullanımındaki mera, harman yeri, yol ve sulak alanların zapt edilmesi ya da sürölüp ekilmesi gibi kırsal alanda çok sık rastlanan ihlaller özel olarak ceza kapsamına alınmıştır. Maddenin üçüncü fıkrasında ise kamuya veya özel şahıslara ait suların mecrasının değıştirilmesi eylemi müstakil bir suç unsuru olarak yaptırıma bağlanarak toprak ve su bütünlüğünün güvence altına alınması hedeflenmiştir (Aksakal, 2004).

Tablo 1’de yer alan hakkı olmayan yere tecavüz suçu (TCK m.154) verileri, incelenen dönem içerisinde adli yargılamaların en yoğun olduğı alanlardan birinin taşınmaz mülkiyetine ilişkin uyuşmazlıklar olduğunu göstermektedir. 2023 ve 2024 yıllarında yüksek dosya ve sanık sayıları dikkat çekerken, 2025 yılında belirgin bir düşüş eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, kırsal alanlarda mülkiyet ihtilaflarının dönemsel olarak azalabileceğini veya idari çözüm mekanizmalarının daha etkin kullanılmaya başlanmış olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca mahkumiyet oranlarının beraat oranlarına göre daha yüksek seyretmesi, delil niteliğı taşıyan teknik keşiflerin yargılama sürecinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca, hükmün açıklanmasının geri bırakılması (HAGB) sayılarının yıllara göre benzer oranlarda kalması, yargılama mercilerinin bu cezai erteleme yöntemini bir uygulama alışkanlığı olarak tercih ettiğine işaret etmektedir.

Tablo 1. Hakkı Olmayan Yere Tecavüz Suçu Adli Karar Dağılımı (2023-2025)

Yıl	Toplam Dosya Sayısı	Toplam Sank Sayısı	Mahkumiyet Kararı	Beraat Kararı	Hükümün Açıklanmasının Geri Bırakılması (HAGB)	Diğer Kararlar
2023	20.117	29.866	4.721	2.457	1.524	2.938
2024	18.803	28.033	4.206	2.479	1.351	2.294
2025	10.520	13.683	4.358	2.621	1.453	2.088

Kaynak: Adalet Bakanlığı Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğü

2.4.2. Radyasyon Yayma Suçu (TCK m.172)

Teknolojik gelişmelerin tarımsal sahadaki endüstriyel süreçlere entegre olması, ceza hukuku korumasının kapsamını da genişletmektedir. Türk Ceza Kanununun 172. maddesinde düzenlenen radyasyon yayma suçu, doktrinde yasal unsurları ve niteliği yönüyle tartışılan önemli bir alanı oluşturmaktadır. Maddenin birinci fıkrasında radyasyona maruz bırakma eyleminin kişinin sağlığını bozmaya elverişli olması şartı aranırken, üçüncü ve dördüncü fıkralarda da benzer şekilde elverişlilik kriterine vurgu yapıldığı görülmektedir. Resmi kanun gerekçesinde bu eylemlerin somut bir tehlike doğurması gerektiği ifade edilse de failin kastı ve maruz kalınan miktarın niteliği yönüyle bu düzenlemenin potansiyel bir tehlike suçu olarak da değerlendirilebileceği ileri sürülmektedir (Ersoy, 2020). Tarımsal koruma zemininde bakıldığında, üretim alanlarının veya sulama kaynaklarının radyoaktif maddelerle etkileşime girmesi riski, bu suç tipinin somut ya da potansiyel tehlike boyutuyla tarım ceza hukukunda da yer bulmasına zemin hazırlayabilmektedir.

Nitekim, 2023, 2024 ve 2025 yıllarına ait resmi adli sicil istatistiklerinde bu suçla dair herhangi bir dava veya soruşturma kaydı yer almamaktadır. Dolayısıyla, ilgili ceza normunun tarımsal alanda somut bir pratik yansımalarının henüz şekillenmediğini söylemek mümkündür.

2.4.3. Atom Enerjisi ile Patlamaya Sebebiyet Verme Suçu (TCK m.173)

Toprak ve su kaynaklarının korunması, sadece doğrudan müdahalelerin engellenmesiyle değil, aynı zamanda yüksek riskli endüstriyel kazaların ve patlamaların önlenmesiyle de yakından ilgilidir. Kanunumuzun 173. maddesinde yer alan atom enerjisi ile patlamaya sebebiyet verme suçu, hem kasti hem de taksirli

halleri bünyesinde barındıran bir düzenlemedir. Hukuk literatüründe bu madde, somut tehlike suçlarına örnek gösterilebilecek nitelikli bir yapı olarak kabul edilebilmektedir. Çünkü suçun oluşabilmesi adına yalnızca atom enerjisinin serbest bırakılması yetmemekte, bu hareketin neticesinde üçüncü kişilerin yaşamı, sağlığı ya da malvarlığı üzerinde somut ve önemli bir tehlikenin doğmuş olması şartı aranmaktadır (Özek, 2011). Tarım arazilerinin veya kırsal yerleşim alanlarının böylesi büyük ölçekli bir enerji patlamasından etkilenmesi ihtimali, bu suçun tarımsal çevre güvenliğiyle olan dolaylı ilişkisine işaret edebilmektedir.

Adli sicil ve istatistik genel müdürlüğünün 2023-2025 dönemi verileri değerlendirildiğinde, bu suç tipiyle ilgili yargı organlarına yansıyan somut bir dava veya soruşturma verisinin bulunmadığı dikkat çekmektedir. Söz konusu istatistiksel durum, eylemin yüksek düzeyde teknik altyapı gerektirmesi ve nadiren karşılaşılabilecek bir kaza niteliği taşımasıyla ilişkilendirilebilir.

2.4.4.Tehlikeli Maddelerin İzinsiz Olarak Bulundurulması Veya El Değiştirmesi Suçu (TCK m.174)

Tarımsal üretim süreçlerinde verimliliği artırmak ve zararlılarla mücadele etmek amacıyla çeşitli kimyasal ve biyolojik maddelerin kullanımı yaygın bir pratik olarak karşımıza çıkmaktadır. Türk Ceza Kanununun 174. maddesinde düzenlenen tehlikeli maddelerin izinsiz olarak bulundurulması veya el değiştirmesi suçu, yetkili makamların izni olmaksızın patlayıcı, yakıcı, aşındırıcı, yaralayıcı, boğucu, zehirleyici veya nükleer, radyoaktif, kimyasal ya da biyolojik maddelerin imal edilmesini, ithal veya ihraç edilmesini, taşınmasını, depolanmasını veya satılmasını yaptırıma bağlamaktadır. Hukuk doktrininde bu yasal düzenlemenin, bireysel hakların ötesinde toplumsal güvenliği ve ekolojik dengeyi korumayı amaçlayan genel bir tehlike suçu niteliği taşıdığı ifade edilmektedir (Yalçın, 2025).

Tarımsal koruma zemininde bakıldığında, kontrolsüz kimyasal gübre hammaddelerinin veya mevzuata aykırı tarım ilaçlarının izinsiz şekilde bulundurulması ya da nakledilmesi, bu suçun yasal unsurlarını tetikleyebilecek bir risk alanı olarak değerlendirilebilir. Maddenin adli mekanizmalardaki hareketliliği mercek altına alındığında 2023, 2024 ve 2025 yıllarına ait resmi adli sicil istatistikleri incelendiğinde, bu suç kapsamında açılmış herhangi bir dava veya yürütülmüş soruşturma kaydına rastlanmadığı gözlenmektedir. Söz konusu istatistiksel durum, tarım sektöründe kullanılan kimyasal bileşenlerin çoğunlukla özel idari denetimlere ve idari yaptırımlara tabi olması sebebiyle adli yargı boyutuna taşınma ihtiyacının doğmamasıyla açıklanabilir.

2.4.5. Hayvanın Tehlike Yaratabilecek Şekilde Serbest Bırakılması Suçu (TCK m.177)

Kırsal alanlardaki toplumsal yaşamın ve tarımsal üretim döngüsünün güvenliği, evcil veya yabani hayvanların kontrol altında tutulmasıyla da doğrudan bağlantılıdır. Türk Ceza Kanununun 177. maddesinde vücut bulan hayvanın tehlike yaratabilecek şekilde serbest bırakılması suçu, gözetim yükümlülüğü altındaki bir hayvanın başkalarının hayatı veya sağlığı açısından risk oluşturacak biçimde başıboş bırakılmasını ya da muhafazasında ihmal gösterilmesini yaptırıma bağlamaktadır. Kanun koyucu bu suç tipini somut tehlike suçu olarak sınıflandırma eğiliminde olsa da doktrindeki bazı yaklaşımlar, eylemin doğurduğu risk boyutu yönüyle bunun bir potansiyel tehlike suçu olarak kabul edilmesinin daha isabetli olabileceğini savunmaktadır (Bahadır, 2016). Özellikle hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu kırsal bölgelerde ve meralarda, kontrolsüz bırakılan hayvanların diğer üreticilerin can güvenliğine ya da ekili dikili alanlarına zarar verme riski, bu yasal düzenlemenin sahadaki pratik önemini açıkça ortaya koyabilmektedir.

İlgili döneme ait adli sicil istatistik verileri nezdinde yapılan incelemelerde, bu suç başlığı altında kayda geçmiş bir dava ya da soruşturma dosyası tespit edilememiştir. Kırsal alanda hayvanların sebebiyet verdiği risklerin, adli yargı süreçlerine taşınmak yerine çoğunlukla yerel uzlaşma mekanizmaları veya idari yaptırımlar vasıtasıyla çözüme kavuşturulma eğiliminde olduğu düşünülebilir.

2.4.6. Çevrenin Taksirle Kirlenmesi Suçu (TCK m.182)

Sağlıklı ve dengeli bir ekosistemin muhafazası, modern ceza hukukunun ve anayasal düzenin temel öncelikleri arasında yer almaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Anayasası'nın 56. maddesi uyarınca, herkesin sağlıklı bir çevrede yaşama hakkına sahip olduğu ve hem devletin hem de vatandaşların çevreyi koruma ödevi altında bulunduğu hüküm altına alınmıştır. Bu anayasal prensip, 2872 sayılı Çevre Kanunu'nun 3. maddesinde de karşılık bularak tüm gerçek ve tüzel kişilere kirliliği önleme yükümlülüğü yüklemektedir. Bu doğrultuda Türk Ceza Kanunu, genel amaçları arasında kamu sağlığını ve çevreyi korumayı saymış ve çevreye zarar verecek atık veya artıkların alıcı ortamlara bırakılmasını cezai yaptırımlara bağlamıştır (Otaç, 2015). TCK'nın 182. maddesinde düzenlenen çevrenin taksirle kirlenmesi suçu, dikkat ve özen yükümlülüğüne aykırı hareket edilerek çevreye zarar verilmesi halinde gündeme gelmektedir. Doktrindeki yaklaşımlara göre bu suç tipi, neticenin öngörülmediği bilinçsiz taksirle işlenebileceği gibi, neticenin öngörüldüğü ancak meydana gelmeyeceğine güvenildiği bilinçli taksir boyutunda da ortaya çıkabilmektedir (Otaç, 2015). Özellikle tarımsal faaliyetlerde kullanılan kimyasal atıkların, gübrelerin veya endüstriyel nitelikli tarım artıklarının dikkatsizlik

sonucu toprağa ya da sulama sularına sızması, bu suçun yasal unsurlarını tetikleyebilecek bir risk alanı olarak değerlendirilebilir.

Tablo 2. Çevrenin Taksirle Kirletilmesi Suçu Adli Karar Dağılımı (2023-2025)

Yıl	Toplam Dosya	Toplam Sanık	Mahkumiyet	Beraat	HAGB*	Diğer
2023	0	0	0	0	0	0
2024	44	54	9	8	15	2
2025	0	0	0	0	0	0

*Hükmün Açıklanmasının Geri Bırakılması

Kaynak: Adalet Bakanlığı Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğü

Söz konusu suçun sahadaki pratik yansımaları Tablo 2 üzerinden değerlendirildiğinde, yargılama organlarının dönemsel bir yoğunlukla karşılaştığı söylenebilir. Adli sicil verilerine göre, 2023 ve 2025 yıllarında bu suç kapsamında açılmış herhangi bir dava veya yürütülmüş soruşturma kaydına rastlanmazken, 2024 yılında belirgin bir hareketlilik gözlenmektedir. Resmi verilere göre 2024 yılında mahkemelerin gündemine gelen 44 dosyada toplam 54 sanık yargılanmıştır. Bu yargılamalar neticesinde 9 sanık hakkında mahkumiyet, 8 sanık hakkında ise beraat hükmü kurulduğu dikkat çekmektedir. Aynı dönemde 15 dosya bakımından hükmün açıklanmasının geri bırakılması (HAGB) kararı verilirken, 2 adet dosyanın ise diğer karar türleri ile sonuçlandırıldığı anlaşılmaktadır. Bu istatistiksel dağılım, çevrenin taksirle kirletilmesi fiillerinde adli makamların ceza erteleme mekanizmalarını (HAGB) sıklıkla tercih etme eğiliminde olduğunu ve suçun manevi unsurunun ispatı noktasındaki teknik zorluklar sebebiyle beraat ile mahkumiyet oranlarının birbirine yakın seyrettiğini göstermektedir.

2.4.7.Gürültüye Neden Olma Suçu (TCK m.183)

Kırsal alanlardaki yaşam kalitesi ve tarımsal çevre düzeni, yalnızca toprak ve su kalitesinin korunmasıyla değil, aynı zamanda akustik çevrenin muhafazasıyla da yakından ilgilidir. Türk Ceza Kanununun 183. maddesinde vücut bulan gürültüye neden olma suçu, Anayasa'nın 56. maddesinde güvence altına alınan "sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkı" ile doğrudan bağdaşmaktadır. Kanuni düzenleme uyarınca bu suçun oluşabilmesi için, ilgili kanunlarla belirlenen yükümlülüklere aykırı hareket edilmesi ve ortaya çıkan gürültünün başka bir kimsenin sağlığının zarar görmesine elverişli bir nitelik taşıması şartı aranmaktadır. Doktrinde suçun

niteliğine yönelik yapılan tartışmalarda, yasa koyucunun bu düzenlemeyi bir somut tehlike suçu olarak tasarlamış olabileceği, ancak madde metnindeki lafzi yapı itibariyle eylemin daha çok "tehlikeye elverişli suç" kalıbına uygun düştüğü ifade edilmektedir (Maden, 2021). Sadece kasten işlenebilen ve neticeli bir yapıya sahip olan bu suç modelinde, failin mevzuata aykırılık ve sağlığa elverişlilik unsurlarını bilerek hareket etmesi gerekmektedir. Tarımsal işletmelerde, hayvancılık tesislerinde veya kırsala yakın sanayi kollarında yasal sınırları aşan ve insan sağlığını tehdit eden kontrolsüz ses ve gürültü kaynaklarının varlığı, bu suç başlığının tarım ceza hukuku bağlamında da değerlendirilmesine yol açabilmektedir.

Tablo 3. Gürültüye Neden Olma Suçu Adli Karar Dağılımı (2023-2025)

Yıl	Toplam Sanık	Mahkumiyet	Beraat	HAGB*	Diğer Karar
2023	0	0	0	0	0
2024	37	16	3	8	10
2025	0	0	0	0	0

*Hükmün Açıklanmasının Geri Bırakılması

Kaynak: Adalet Bakanlığı Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğü,

Yasal düzenlemenin ceza mahkemelerindeki fiili karşılığı incelendiğinde, adli makamların bu suç tipiyle dönemsel ve sınırlı düzeyde karşılaştığı söylenebilir. Adli sicil istatistiklerine bakıldığında, 2023 ve 2025 yıllarında bu suç kapsamında açılmış herhangi bir davanın bulunmadığı, ancak 2024 yılında belirgin bir hareketliliğin yaşandığı gözlenmektedir. 2024 yılında hakim karşısına çıkan 37 sanıktan 16'sı hakkında mahkumiyet, 3'ü hakkında ise beraat kararı tesis edilmiştir (Tablo 3). Aynı dönemde 8 sanık için hükmün açıklanmasının geri bırakılması (HAGB) yolu tercih edilirken, 10 sanığın dosyası ise diğer karar türleriyle neticelendirilmiştir. Bu sayısal dağılım, çevreye karşı işlenen gürültü eylemlerinde adli makamların mahkumiyet yönünde kararlı bir eğilim sergilediğini, bununla birlikte cezai erteleme ve alternatif çözüm mekanizmalarını da dengeli bir biçimde uyguladığını işaret etmektedir. Suçun taksirli halinin düzenlenmemiş olması ve yasal sınırların aşılmasına yönelik teknik ispat süreçlerinin varlığı, pratik uygulamadaki bu ihtiyatlı tabloyu açıklayıcı niteliktedir.

2.4.8.İmar Kirliliğine Neden Olma Suçu (TCK m.184)

Tarımsal arazilerin ve kırsal yerleşim alanlarının korunması, kontrolsüz ve kualsız yapılaşmanın önlenmesiyle doğrudan ilişkilidir. Türk Ceza Kanununun 184. maddesinde ilk defa çevreye karşı suçlar başlığı altında düzenlenen imar kirliliğine neden olma suçu, Türk hukuk tarihi açısından önemli bir dönüşümü ifade etmektedir. Söz konusu düzenlemeden önce, imar mevzuatına aykırı inşaat faaliyetleri yalnızca idari yaptırımlara ve para cezalarına tabi tutulurken, bu yöntemlerin caydırıcılık noktasında yetersiz kalması eylemin ceza hukuku kapsamına alınmasını zorunlu kılmıştır (Aslan, 2019). Özellikle sanayileşme ve kırsaldan kentlere yönelen göç hareketleri, düzensiz kentleşmenin yanı sıra tarım topraklarının ve meraların da yapılaşma baskısı altında kalmasına yol açabilmektedir. Bu suç tipiyle korunan hukuki değer, yalnızca şehirlerin estetik ve planlı yapısı değil, aynı zamanda gelecek nesillerin sağlıklı bir çevrede yaşama hakkıdır. Tarımsal üretim alanlarında veya sit alanlarında yasal izinler alınmaksızın gerçekleştirilen yapılaşma faaliyetleri, ekolojik dengeyi geriye dönülemez biçimde bozma riski taşıdığı için bu düzenlemenin tarım ceza hukukundaki pratik önemi oldukça belirgindir (Aslan, 2019).

Tablo 4. İmar Kirliliğine Neden Olma Suçu Adli Karar Dağılımı (2023-2025)

Yıl	Toplam Sanık	Mahkumiyet	Beraat	HAGB	Diğer Karar
2023	0	0	0	0	0
2024	28.883	19.547	3.919	534	4.883
2025	0	0	0	0	0

Kaynak: Adalet Bakanlığı Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğü

Tablo 4’te yer alan imar kirliliğine neden olma suçu (TCK m.184) ise çalışma kapsamındaki suç tipleri arasında açık ara en yüksek dava yoğunluğuna sahip alanı oluşturmaktadır. İncelenen dönemde, 2023 ve 2025 yıllarında sisteme yansıyan herhangi bir dava veya soruşturma kaydı gözlenmezken, 2024 yılında olağanüstü bir yoğunluğun yaşandığı dikkati çekmektedir. 2024 yılı resmi adli sicil istatistiklerine bakıldığında, hakim karşısına çıkan sanık sayısının 28.883 gibi oldukça yüksek bir seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Yargılama sonuçlarının dağılımı incelendiğinde, 19.547 sanık hakkında mahkumiyet kararı verilirken, beraat eden sanık sayısının 3.919 düzeyinde kaldığı dikkat çekmektedir. Aynı dönemde 534 dosya için hükmün açıklanmasının geri bırakılması (HAGB) müessesesi işletilmiş, 4.883 sanığın dosyası ise diğer adli karar türleri ile neticelendirilmiştir. Bu

istatistiksel görünüm, adli makamların imar kirliliğine neden olma eylemlerine karşı oldukça tavizsiz ve mahkumiyet odaklı bir yargılama pratiği sergilediği şeklinde yorumlanabilir. Mahkumiyet oranlarının beraat oranlarına kıyasla bu denli yüksek seyretmesi, kaçak yapılaşma fiillerinin adli aşamada teknik ve fiziki delillerle kolayca tespit edilebilmesiyle de yakından ilişkili olabilir.

2.4.9.Zehirli Madde Katma Suçu (TCK m.185)

Toplum sağlığının ve tarımsal gıda zincirinin muhafazası, suç politikalarının en hassas kırılma noktalarından birini oluşturmaktadır. Türk Ceza Kanununun 185. maddesinde yer alan zehirli madde katma suçu, kanunun "Kamu Sağlığına Karşı İşlenen Suçlar" bölümünde düzenlenmiş olup doğrudan kolektif bir hukuki değeri korumayı amaçlamaktadır. Kanun metni uyarınca, içilecek sulara veya tüketilecek her türlü besin maddesine zehir katılması ya da çeşitli yollarla bunların bozulması suretiyle kişilerin hayatının ve sağlığının tehlikeye düşürülmesi yaptırımı bağlanmaktadır (Özen, 2008). Madde metninde kullanılan "kişilerin hayatını ve sağlığını tehlikeye düşüren" ifadesi ile resmi gerekçedeki açıklamalar birlikte değerlendirildiğinde, bu suç tipinin somut bir tehlike suçu niteliği taşıdığı ileri sürülebilir. Kanun koyucu bu suç kapsamında hem kasti hem de dikkat ve özen yükümlülüğüne aykırılık halini ifade eden taksirli fiilleri cezalandırma yoluna gitmiştir. Tarımsal üretim zemininde bakıldığında; toplu sulama kanallarına, içme suyu şebekelerine veya hasat aşamasındaki tarım ürünlerine kimyasal zehirlerin ya da kontrolsüz endüstriyel atıkların karıştırılması riski, bu yasal düzenlemenin kırsal alandaki hayati önemini açıkça ortaya koyabilmektedir (Özen, 2008).

Bakanlığın yayımladığı yıllık raporlar baz alındığında, yargı organlarının gündemine gelen somut uyuşmazlık sayısının son derece sınırlı kaldığı söylenebilir. Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğü bünyesinde yer alan 2023, 2024 ve 2025 yıllarına ait resmi veriler değerlendirildiğinde, bu suç başlığı altında açılmış herhangi bir kamu davasına veya yürütülmüş soruşturma kaydına rastlanmadığı gözlenmektedir. Bu durum, gıda ve su kaynaklarına yönelik bu denli ağır ihlallerin sahada nadiren karşımıza çıkmasıyla açıklanabileceği gibi; tarımsal ürünlerdeki ve sulama sularındaki kirlilik durumlarının adli ceza süreçlerinden ziyade, Tarım ve Orman Bakanlığı ile Sağlık Bakanlığı gibi idari otoritelerin yürüttüğü özel idari denetimler ve idari para cezaları vasıtasıyla kontrol altında tutulmasıyla da ilişkilendirilebilir (Özen, 2008).

2.4.10. Bozulmuş veya Değiştirilmiş Gıda veya İlaçların Ticareti Suçu (TCK m.186)

Tarımsal üretimin son halkası olan gıda tedarik zincirinde halk sağlığının korunması, tarım ceza hukukunun temel amaçları arasındadır. TCK'nın 186.

maddesinde "Kamunun Sağlığına Karşı Suçlar" başlığı altında bir somut tehlike suçu olarak düzenlenen bu düzenleme; kişilerin hayatını ve sağlığını tehlikeye sokacak biçimde bozulmuş ya da niteliği değiştirilmiş yiyecek, içecek ve ilaçların satılmasını, tedarik edilmesini veya bulundurulmasını yaptırıma bağlamaktadır (Bulut, 2026). Suçun oluşması için mutlak bir ölüm veya kalıcı zarar şartı aranmamakta, fiilin yaşamsal bir tehlike doğurması yeterli kabul edilmektedir. Sahadaki uygulamada gıda otoritesi olan Tarım ve Orman Bakanlığı, 5996 sayılı Kanun kapsamında insan tüketimine uygun olmadığını belirlediği ürünleri piyasaya sürenler hakkında adli makamlara suç duyurusunda bulunmaktadır. Ancak bu bildirimlerin sektörel ve hukuki mağduriyetlere yol açmaması adına, ihtiyatlılık ilkesi çerçevesinde somut, bilimsel ve güçlü delillere dayandırılması gerektiği savunulmaktadır (Bulut, 2026).

Adli sicil verilerinin sunduğu dönemsel projeksiyon incelendiğinde, sahadaki denetim yoğunluğuna rağmen uyuşmazlıkların ceza mahkemelerine taşınma oranının oldukça düşük kaldığı söylenebilir. Nitekim Adli Sicil ve İstatistik Genel Müdürlüğünün 2023, 2024 ve 2025 yıllarına ait resmi verileri incelendiğinde, bu madde kapsamında açılmış herhangi bir dava veya yargılama kaydına rastlanmadığı görülmektedir. Bu istatistiksel durum; tespiti yapılan gıda uygunsuzluklarının adli yargı süreçlerinden ziyade, ek tahlil süreçleri, ürün toplatma, işletme mühürleme ve idari para cezaları gibi Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yürütülen idari yaptırım mekanizmalarıyla çözüme kavuşturulması eğiliminden kaynaklanıyor olabileceğini düşündürmektedir.

3. ÖZEL KANUNLAR KAPSAMINDAKİ TARIMSAL SUÇ VE KABAHATLERİN GÖRÜNÜMÜ

Tarımsal üretim alanlarının ve kırsal yaşam düzeninin muhafazası yalnızca Türk Ceza Kanunu bünyesindeki genel normlarla sınırlı bırakılmamış ve sektörel ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitli özel kanunlarla da desteklenmiştir. Bu özel kanunlar bünyesinde yer alan hukuka aykırı eylemler ise taşıdıkları haksızlık miktarının ağırlığına göre ikili bir ayırım üzerinden yaptırıma bağlanmaktadır. Kamu düzenini doğrudan tehdit eden nitelikteki ağır ihlaller için hapis cezaları öngörülerek tarımsal suçlar ihdas edilmiştir. Görece daha hafif nitelikteki teknik ihlallerin karşılığı ise idari para cezası veya el koyma gibi idari yaptırımlar içeren kabahatler olarak belirlenmiştir. Özel kanunlarda düzenlenen tarımsal suçlar, TCK'nın 5. maddesinde yer alan genel hükümlerin özel ceza kanunlarında da uygulanacağına dair amir hükmü uyarınca ceza hukukunun temel ilkeleri çerçevesinde tatbik edilmektedir. Bu bölümde tarım topraklarının korunmasından mera yönetimine ve gıda güvenliğine kadar geniş bir yelpazeyi şekillendiren özel mevzuat, içerdikleri suç ve kabahat yapılarıyla birlikte sırasıyla ele alınacaktır.

3.1. 5403 Sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu

5403 sayılı kanun tarım topraklarının korunmasını, bölünmelerinin önlenmesini ve çevre öncelikli sürdürülebilir kalkınma ilkesine uygun olarak planlı kullanımını amaçlamaktadır. Kanunun 20 ve 21. maddelerinde düzenlenen yaptırımlar kapsamında, tarım arazilerinin bütünlüğünün bozulmasına ve amacı dışında kullanılmasına sebebiyet veren fiiller cezalandırılmaktadır. Bu doğrultuda tarım arazilerini tescili mümkün olmayan fiili hisselerle bölerek tüzel kişi ortaklığı yoluyla zilyetliğini devreden veya bu işlere aracılık edenlere bir yıldan üç yıla kadar hapis ve adli para cezası öngörülmüştür. Söz konusu faaliyetleri yürüten özel hukuk tüzel kişileri hakkında ise idari para cezası uygulanması hükme bağlanmıştır. Son olarak kanun koyucu tarım arazisinin yeniden bütün hale getirilmesi ve üretime uygun duruma getirilmesi halinde kamu davasının düşmesini veya mahkumiyetin ortadan kalkmasını düzenlemiştir (Özen, 2016).

3.2. 442 Sayılı Köy Kanunu

442 sayılı kanun nüfus esasına göre köy, kasaba ve şehir yerleşim yerlerini tanımlayarak buralardaki yönetsel işleri görme yetkisini köy muhtarı ile ihtiyar meclisine vermiştir. Kanunun kırsal düzeni ve tarımsal asayışı korumaya yönelik ceza hükümlerinde, köy yöneticilerine ve kolluk görevlilerine özel bir hukuki koruma sağlandığı görülmektedir. Bu kapsamda kanunun 38. maddesi uyarınca köy muhtarına görevini yaptığı sırada karşı gelen veya kötü söz söyleyenlerin devlet memuruna karşı koymuş gibi cezalandırılacağı hükme bağlanmıştır. Benzer şekilde 73. maddede silahlı kılınan köy korucularına yönelik hukuka aykırı direnme eylemlerinin de jandarma personeline karşı gelinmiş gibi ceza adaletine tabi tutulacağı belirtilmiştir. Son olarak kanunun 46 ve 91. maddelerinde ise mecburi köy işlerini yerine getirmeyen, köy paralarını toplamayan ya da kanun metnini köyün ortak alanlarında bulundurmayan muhtar ve azalar için mülki amirler veya idare kurulları tarafından uygulanacak idari para cezaları düzenlenmiştir.

3.3. 3213 Sayılı Maden Kanunu

3213 sayılı kanun maden kaynaklarının aranması, işletilmesi ve bu süreçlerin teknik ile emniyet yönünden denetlenmesine ilişkin usul ve esasları düzenlemektedir. Kanunun tarımsal çevre ve arazi güvenliğiyle ilişkili yaptırım mekanizmaları arasında teknik nezaretçilerin sorumlulukları ön plana çıkmaktadır. Kanunun 10. maddesi uyarınca ruhsat sahasındaki faaliyetleri düzenli denetlemekle yükümlü olan teknik nezaretçinin tespitlerini deftere kaydetmesi zorunlu kılınmıştır. Bu teknik nezaretçi defterinin ibraz edilmemesi veya düzenli tutulmaması halinde ruhsat sahibine yıllık işletme ruhsat harcı tutarında idari para cezası uygulanması amir hükme bağlanmıştır. Böylece madencilik faaliyetlerinin tarım alanlarına ve

çevreye verebileceği olası zararların teknik denetim eksikliği üzerinden idari yaptırıma tabi tutulması amaçlanmıştır.

3.4. 3573 Sayılı Zeytinciliğin Islahı ve Yabanilerinin Aşlattırılması Hakkında Kanun

3573 sayılı kanun zeytinlik sahalarının korunması, bakımı, yabancı zeytinlerin aşılması ve bu alanların geliştirilmesine yönelik koruyucu düzenlemeleri kapsamaktadır. Kanunun 14. maddesinde zeytinliklere hayvan sokulması ve yerleşim yerleri hariç bu sahalara bir kilometreden yakın mesafede ağıl yapılması kesin olarak yasaklanmıştır. Bu yasağa aykırı hareket edenler hakkında zarar görenin şikayeti üzerine üç aya kadar hapis veya adli para cezası öngörülerek zeytin varlığı adli koruma altına alınmıştır. Ayrıca kanunun 17 ve 20. maddeleri uyarınca zeytinliklerine fenni kurallara uygun bakmayanlara ve izinsiz ağaç kesip sökenlere ağaç başına idari para cezası uygulanması hükme bağlanmıştır. Kanunun 21. maddesine göre ise bu kapsamdaki idari para cezalarını verme yetkisi mahallî mülkî amire tanınmıştır.

3.5. 4342 Sayılı Mera Kanunu

4342 sayılı kanun mera, yaylak, kışlak ve kamuya ait otlak alanlarının tespiti, tahsisi ile sürdürülebilir kurallar çerçevesinde korunmasını ve işletilmesini hedeflemektedir. Kanunun 26. maddesi kapsamında hak sahiplerinin otlatma kapasitesine göre belirlenen ücretleri ödeme yükümlülüğü bulunmakta ve fazla hayvan otlatanlardan bu ücret üç katı olarak tahsil edilmektedir. Kanunun 27. maddesinde ise yükümlülüklerini yerine getirmeyenlerin meralardan yararlanma haklarının valilik onayıyla geçici veya dönemsel olarak iptal edileceği düzenlenmiştir. Aynı maddede yasaklı yerlerde hayvan otlatmaya devam eden, meraları sürmek suretiyle tahrip eden veya izinsiz inşaat yapanlar hakkında 3091 sayılı Kanun ile Türk Ceza Kanununun ilgili maddeleri uyarınca adli işlem başlatılacağı amir hükme bağlanmıştır. Son olarak bu tahribatları zamanında yetkililere bildirmeyen muhtar ve belediye başkanları gibi kamu görevlilerinin de genel hükümlere göre cezai sorumluluğu bulunmaktadır.

3.6. 5488 Sayılı Tarım Kanunu

5488 sayılı kanun tarım sektörünün ve kırsal alanların kalkınma planları doğrultusunda desteklenmesi ile gerekli tarım politikalarının koordinasyonunu amaçlamaktadır. Kanunun 7. maddesi uyarınca gıda güvencesinin temini ve çevrenin korunması amacıyla Bakanlıkça belirlenen stratejik ürünlerin üretimine başlanmadan önce izin alınması zorunlu kılınmıştır. İzin almadan tarımsal faaliyette bulunan üreticiler ilk tespitte yazılı olarak uyarılmakta ve aykırılığı sürdürenler beş

yıl boyunca destekleme programlarından mahrum bırakılmaktadır. Aynı takvim yılında ihlale devam edilmesi durumunda ise üreticinin elde edeceği yıllık brüt hasıla üzerinden kademeli idari para cezası uygulanmaktadır. Ayrıca kanunun 20. maddesinde çiftlik muhasebe veri ağı kayıtlarındaki bilgileri ifşa eden görevliler hakkında genel hükümler çerçevesinde cezai işlem yapılacağı belirtilmiştir.

3.7. 2872 Sayılı Çevre Kanunu

2872 sayılı kanun bütün canlıların ortak varlığı olan çevrenin sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda korunmasını ve kirliliğin önlenmesini esas almaktadır. Tarımsal ekosistemi de doğrudan etkileyen bu kanunun 26. maddesinde yetkili makamlara yanlış veya yanıltıcı bilgi verenler için altı aydan bir yıla kadar hapis cezası öngörülmüştür. Aynı maddede denetimler sırasında yanlış ve yanıltıcı belge düzenleyen veya bunları kullananlar hakkında Türk Ceza Kanununun belgede sahtecilik suçuna ilişkin hükümlerinin uygulanacağı açıkça ifade edilmiştir. Kanunun 20. maddesinde ise egzoz gazı emisyon ölçümü yaptırmayan veya standartlara aykırı emisyonu sebep olan motorlu taşıt sahiplerine yönelik maktu idari para cezaları düzenlenmiştir. Bu düzenlemeler tarım alanlarının endüstriyel ve lojistik kirleticilere karşı korunmasında işlevsel bir rol oynamaktadır.

3.8. 3091 Sayılı Taşınmaz Mal Zilyetliğine Karşı Yapılan Tecavüzlerin Önlenmesi Hakkında Kanun

3091 sayılı kanun gerçek veya tüzel kişilerin zilyetliğinde bulunan taşınmazlar ile devletin hüküm ve tasarrufu altındaki arazilere yapılan tecavüzlerin idari makamlarca hızlıca önlenmesini amaçlamaktadır. Tarımsal mülkiyetin ve arazi güvenliğinin korunmasında büyük öneme sahip olan bu kanun kamu düzenini ve tasarruf emniyetini sağlamayı hedeflemektedir. Kanun uyarınca tarım arazilerine veya taşınmazlara tecavüz edilmesi durumunda merkez ilçelerde vali veya görevlendireceği vali yardımcısı, diğer ilçelerde ise kaymakamlar tarafından müdahalenin önlenmesine karar verilmektedir. İdari makamlarca verilen bu hızlı karar neticesinde taşınmaz mal yerinde incelenerek derhal haklı zilyedine teslim edilmektedir. Bu yönüyle kanun tarımsal üretimde sürdürülebilirliği aksatan mülkiyet tecavüzlerine karşı adli süreçlerden daha hızlı sonuç veren etkin bir idari himaye mekanizması sunmaktadır.

3.9. 5996 Sayılı Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanunu

5996 sayılı kanun gıda ve yem güvenilirliğini, halk sağlığını, bitki ve hayvan sağlığı ile tüketici menfaatlerini korumayı amaçlayan kapsamlı bir mevzuattır. Kanunun 38, 39, 40, 41 ve 42. maddelerinde gıda tedarik zincirinde ve tarımsal üretimde karşılaşılan hukuka aykırılıklar için çeşitli yaptırımlar öngörülmüştür.

Kanunun 12. maddesi kapsamında genel üretim ve hijyen esaslarına aykırı hareket eden, etiket bilgilerinde usulsüzlük yapan veya resmi denetimleri engelleyen kişi ve kuruluşlara yönelik ağır idari para cezaları düzenlenmiştir. Belirtilen bu teknik ve idari kurallara uyulmaması durumunda idari para cezalarının yanı sıra ürünlere el konulması, piyasadan toplatılması ve faaliyet izinlerinin iptali gibi idari yaptırımlar da devreye sokulmaktadır. Bu cezai ve idari rejim tarladan sofraya gıda güvenliğinin sağlanmasında tarım ceza hukukunun en dinamik parçalarından birini oluşturmaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye’de tarım alanlarının korunması, gıda güvenliğinin sağlanması, çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi ve kırsal düzenin muhafaza edilmesi amacıyla uygulanan cezai ve idari yaptırımlar hukuki ve istatistiksel boyutlarıyla değerlendirilmiştir. Türk Ceza Kanunu kapsamında yer alan suç tipleri ile tarımsal faaliyetleri düzenleyen özel kanunlar birlikte incelenmiş, 2023-2025 yıllarına ait adli istatistikler üzerinden uygulamadaki görünüm ortaya konulmaya çalışılmıştır. Araştırma bulguları, tarımsal faaliyetlerle ilişkili hukuka aykırı fiillerin tamamının ceza yargılamalarına konu olmadığını göstermektedir. İncelenen dönemde özellikle hakkı olmayan yere tecavüz suçu ile imar kirliliğine neden olma suçunun yüksek dava ve sanık sayılarıyla öne çıktığı görülmüştür. Buna karşılık radyasyon yayma, tehlikeli maddelerin izinsiz bulundurulması, zehirli madde katma veya bozulmuş gıda ticareti gibi kamu sağlığını doğrudan ilgilendiren bazı suç tiplerinde herhangi bir yargısal kayıt bulunmaması dikkat çekmiştir. Bu durum, söz konusu fiillerin hiç gerçekleşmediğini göstermemekte; önemli bir bölümünün idari denetim ve yaptırım mekanizmaları içerisinde çözümleniyor olabileceğini düşündürmektedir. Adli istatistikler incelendiğinde, bazı suç tiplerinde mahkûmiyet oranlarının beraat oranlarına göre belirgin biçimde yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle taşınmaz işgalleri ve imar kirliliği suçlarında teknik ve fiziki delillerin kolay tespit edilebilmesi, ispat sürecini kolaylaştırarak mahkûmiyet kararlarının artmasına katkı sağlamaktadır. Buna karşılık çevrenin taksirle kirletilmesi gibi teknik uzmanlık gerektiren suçlarda kusur derecesinin ve nedensellik bağının ortaya konulmasındaki güçlükler nedeniyle beraat ve mahkûmiyet oranlarının birbirine yakın seyrettiği anlaşılmaktadır. Çalışma kapsamında değerlendirilen özel kanunlar ise tarımsal koruma sisteminin önemli ölçüde idari yaptırımlara dayandığını göstermektedir. Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu, Mera Kanunu, Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanunu ile diğer özel düzenlemeler, tarımsal alanların korunmasında çoğunlukla idari para cezaları, faaliyet kısıtlamaları ve idari müdahale araçlarını tercih etmektedir. Bu durum, tarımsal ihlallerin önemli bir bölümünün adli sürece taşınmadan çözülmesine imkân

tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, tarımsal suç ve kabahatlere ilişkin mevzuatın farklı kanunlar içerisinde dağınık bir yapıda bulunması uygulamada yetki karmaşalarına ve normların takip edilmesinde güçlüklerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Tarım, çevre ve kamu sağlığı arasındaki ilişkinin giderek güçlendiği günümüzde, hukuki koruma mekanizmalarının daha bütüncül bir anlayışla yeniden değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu kapsamda aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

1. Tarımsal çevre suçları ile gıda güvenliğini ilgilendiren teknik uyumsuzluklarda uzmanlaşmış bilirkişi havuzları oluşturulmalı ve yargı süreçlerinde uzman desteği güçlendirilmelidir.
2. Tarım, çevre ve kırsal alanların korunmasına ilişkin cezai düzenlemeler arasında uygulama birliğini sağlayacak mevzuat çalışmaları yürütülmelidir.
3. Tarım arazilerinin eski haline getirilmesi, çevresel zararların giderilmesi ve ekosistemin rehabilite edilmesine yönelik onarıcı adalet uygulamalarının kapsamı genişletilmelidir.
4. Adli ve idari kurumlar arasında veri paylaşımını sağlayacak ortak bir kayıt sistemi oluşturularak tarımsal ihlallerin bütüncül biçimde izlenmesi sağlanmalıdır.
5. Tarım ve Orman Bakanlığı, çevre kurumları ve yerel yönetimlerin uyguladığı idari yaptırımlara ilişkin istatistikler düzenli olarak yayımlanmalı ve akademik araştırmalara açık hale getirilmelidir.

Sonuç olarak, tarımsal üretim alanlarının korunması yalnızca ekonomik bir gereklilik değil, aynı zamanda gıda güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve kırsal yaşamın devamlılığı açısından stratejik bir zorunluluktur. Bu nedenle cezai ve idari yaptırımların birbirini tamamlayan bir yapı içerisinde uygulanması, tarımsal kaynakların korunması ve gelecek nesillere aktarılması bakımından önemli katkılar sağlayacaktır. Bu çalışma, Türkiye’de tarımsal suç ve kabahatlerin mevcut görünümünü ortaya koyarak konuya ilişkin gelecekte yapılacak araştırmalara ve politika geliştirme süreçlerine mütevazı bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

İlgili Mevzuat

Türkiye Cumhuriyeti Anayasası. (1982). <https://www.mevzuat.gov.tr>

Türk Ceza Kanunu (5237 sayılı Kanun). <https://www.mevzuat.gov.tr>

2872 sayılı Çevre Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr>

3091 sayılı Kanun. <https://www.mevzuat.gov.tr>

5326 sayılı Kabahatler Kanunu . <https://www.mevzuat.gov.tr>

442 sayılı Köy Kanunu. . <https://www.mevzuat.gov.tr>

3213 sayılı Maden Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr>

3573 sayılı Zeytincilik Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr>

4342 sayılı Mera Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr>

5403 sayılı Toprak Koruma Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr>

5488 sayılı Tarım Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr>

5996 sayılı Gıda ve Yem Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr>

Adalet Bakanlığı Adli Sicil ve İstatistik GM. (2023–2025).

<https://adlisicil.adalet.gov.tr>

Kaynaklar

- Aksakal, K. (2004). Türk ceza kanununda hakkı olmayan yerlere tecavüz suçu (Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye).
- Akça, K. (2015). Anayasa Mahkemesi kararlarında mülkiyet hakkı. İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, 6(3), 543–596.
- Bahadır, U. (2016). Hayvanın tehlike yaratabilecek şekilde serbest bırakılması (TCK m. 177). Türkiye Adalet Akademisi Dergisi, 7(24).
- Başpınar, P. E. (2014). Toprak hukuku. In P. E. Başpınar (Ed.), Toprak hukuku (pp. 335–365). Yetkin Yayınları.
- Bekar, E. (2017). Ceza muhakemesinde hüküm çeşitleri (CMK m. 223). İstanbul Üniversitesi Hukuk Fakültesi Mecmuası, 75(1), 15–60.
- Bulut, İ. Bozulmuş Veya Değiştirilmiş Gıda Veya İlaçların Ticareti Suçu (TCK M. 186). Dokuz Eylül Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, 28(1), 215-263. DOI: <https://doi.org/10.33717/deuhfd.1866691>
- Ermenek, İ. (2023). Tarım hukuku. (1. baskı). Ankara, Türkiye: Adalet Yayınevi. 748 sayfa. ISBN: 9786052643341.
- Ersoy, U. (2020). Ceza hukukunun gri alanı: Tehlike suçları. Türkiye Adalet Akademisi Dergisi, 1(41), 27–64.
- Aslan, S. (2019). İmar kirliliğine neden olma suçu (TCK m. 184) [Yüksek lisans tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. Güvenç, İ. (2024). Tarım hukuku. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Hafizoğulları, Z., & Güngör, D. (2007). Türk ceza hukukunda suçların tasnifi. Türkiye Barolar Birliği Dergisi.
- Maden, M. (2021). Bir tehlike suçu olarak gürültüye neden olma (TCK m. 183) ve tehlike suçlarına ilişkin genel tespitler. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, 25(1), 431–470.
- Otacı, C. (2015). Çevrenin kasten ve taksirle kirlenmesi suçuna (TCK 181–182) ilişkin Yargıtay kararlarında belirlenen ilkeler. Ankara Barosu Dergisi.
- Özen, M. (2008). Kamu sağlığına karşı işlenen suçlar. Journal of Istanbul University Law Faculty, 66(2), 163–189.
- Özen, M. (2016). 5403 sayılı toprak koruma ve arazi kullanımı kanunu'nda düzenlenen kabahatler. Süleyman Demirel Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, 5(1), 203–226.
- Özek, Ç. (2011). TCK'nın 173. maddesi ile ilgili bir içtihadı birleştirme kararı. İstanbul Üniversitesi Hukuk Fakültesi Mecmuası, 32(2–4), 980–1004.
- Yalçın, C. (2025). Tehlikeli maddelerin izinsiz olarak bulundurulması veya el değiştirmesi suçu (TCK m. 174). Ankara Barosu Dergisi, 83(2), 417–486.

4. Bölüm

Tarımsal Kıymet Takdirinin Teorik Temelleri, Yöntemleri ve Tarım Sigortalarına Yansıması

Hasan ATALAY¹, Ahmet ASLAN¹

1. Giriş

Tarım sektörü, ekonomik faaliyetler içerisinde biyofiziksel ve doğal kaynaklara en yüksek düzeyde bağımlı olan yapısal olarak kırılgan bir sektördür. Üretim sürecinin tamamen canlı organizmalara dayalı biyolojik bir karakter taşıması, ekolojik ve iklimsel koşullara mutlak duyarlılık, üretim döngülerinin zamansal uzunluğu ve piyasa fiyatlarındaki asimetrik şoklar gibi öngörülemez dinamikler, tarımsal faaliyetleri diğer endüstriyel sektörlerden radikal bir şekilde ayırmaktadır. Bu yapısal durum, tarımsal varlıkların iktisadi değerinin belirlenmesini yalnızca klasik bir muhasebe işlemi olmaktan çıkarıp; teknik, biyolojik, hukuki ve çevresel boyutları bulunan çok katmanlı, disiplinler arası karmaşık bir süreç haline getirmektedir. Özellikle sınırlı bir kaynak olan tarım arazilerinin, uzun vadeli sermaye yatırımı niteliğindeki çok yıllık bitkilerin, canlı hayvansal varlıkların ve entegre tarımsal işletmelerin ekonomik değerinin objektif kriterlerle saptanması; üretici refahı, tarımsal finansman piyasasının derinleşmesi ve kamu politikalarının etkinliği açısından hayati bir zorunluluktur.

İktisat teorisinde değer, bir mal veya hizmetin sağladığı marjinal faydanın ya da nadirliğinin parasal bir projeksiyonu olarak ifade edilmektedir. Ancak tarımsal varlıkların değeri, sadece anlık serbest piyasa arz-talep dengesinde oluşan spot fiyatlarla açıklanabilecek bir olgu değildir. Toprağın fiziksel ve kimyasal yapısı (tekstür, pH, organik madde miktarı), sulama altyapısı ve su kısıtları, iklimsel özellikleri, pazara olan mekânsal yakınlık (konum rantı), parsel morfolojisi, bölgenin ürün deseni esnekliği ve mülkün gelecekte yaratacağı nakit akışları gibi çok sayıda endojen ve eksojen değişken tarımsal değer oluşumunda kümülatif bir rol oynamaktadır. Bu nedenle tarım sektöründe değerlendirme ve kıymet takdiri çalışmaları; agronomi, ekonometri, hukuk ve finans bilimlerinin kesişim kümesinde yer alan, çok sayıda değişkenin

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, atalayhasan46@gmail.com

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, ahmet.aslan@ozal.edu.tr

eş anlı analizini gerektiren disiplinler arası bir uzmanlık alanı olarak kabul edilmektedir (Erkuş et al., 1995; Hardaker et al., 2015).

Tarımsal kıymet takdiri; en geniş tanımıyla tarım arazilerinin, işletme sermayesi unsurlarının, bitkisel ve hayvansal üretim materyallerinin ya da bu varlıklara bağlı ayni ve şahsi hakların belirli bir referans tarihindeki iktisadi değerinin bilimsel, standart ve denetlenebilir yöntemler kullanılarak tahmin edilmesi sürecidir. Bu süreç, kaynak tahsisinin etkinliğini artırmakta, yatırım kararlarını rasyonelleştirmekte ve finansal risklerin makro düzeyde yönetilmesine zemin hazırlamaktadır (Barry & Ellinger, 2012). Son yıllarda iklim değişikliğinin tetiklediği ekstrem hava olayları (don, kuraklık, dolu, sel ve fırtına) tarımsal üretimin kırılganlığını daha da artırmış, bu durum tarım sigortalarını ve dolayısıyla sigorta süreçlerinin kalbi konumunda olan "kıymet takdirini" merkezi bir konuma taşımıştır. Türkiye'de tarım sigortaları uygulamaları büyük ölçüde Tarım Sigortaları Havuzu (TARSİM) sistemi kapsamında yürütülmekte olup, hem sigorta öncesi risk analizlerinde hem de hasar sonrası tazminat hesaplamalarında standartlaştırılmış kıymet takdiri yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışma, söz konusu yöntemlerin teorik altyapısını kurmayı ve tarım sigortaları pratiklerine olan yansımalarını ampirik literatür eşliğinde tartışmayı amaçlamaktadır.

2. Tarımsal Kıymet Takdirinin Kavramsal ve Teorik Temelleri

2.1. Değer, Değerleme ve Kıymet Takdiri Kavramı

Değer kavramı, iktisadi düşünce tarihinin en köklü tartışma alanlarından biridir. Klasik iktisat ekolünün "Emek-Değer Teorisi" değer kaynağını üretim maliyetleri ve harcanan emek zamanı ile açıklarken; Neoklasik ekol değeri marjinal fayda ve subjektif tüketici tercihleri eksenine oturtmuştur. Tarım ekonomisi özelinde ise değer, biyolojik dönüşüm ve doğa bağımlılığı nedeniyle bu iki ekolün sentezini zorunlu kılar. Moschini ve Hennessy (2001), tarımsal üretimdeki risk ve belirsizlik unsurlarının yalnızca üretim miktarını dalgalandırmadığını, aynı zamanda varlığın gelecekteki iktisadi değer oluşum mekanizmasını da stokastik hale getirdiğini savunmaktadır.

Kavramsal olarak "değerleme" (valuation) genel teorik modelleri, normları ve metodolojik çerçeveyi sembolize ederken; "kıymet takdiri" (appraisal) bu soyut yöntemlerin belirli bir zaman diliminde, spesifik bir varlık üzerinde somut olarak uygulanmasıyla ulaşılan nihai takdir işlemidir (Açlar & Çağdaş, 2002). Uluslararası Değerleme Standartları Konseyi (IVSC, 2024) normlarına göre tarımsal kıymet takdirinde üç temel değer tanımı operasyonel öneme sahiptir:

- **Kullanım Değeri (Value in Use):** Bir varlığın, belirli bir işletme yapısı içerisinde mevcut üretim faaliyetine sağladığı içsel, teknik ve marjinal katkının net bugünkü değeridir.
- **Piyasa Değeri (Market Value):** Varlığın, istekli bir alıcı ile istekli bir satıcı arasında, tarafların herhangi bir baskı altında kalmadan, tam bilgiye dayalı olarak serbest piyasa koşullarında gerçekleştirebilecekleri olası takas bedelidir.
- **Gelir Değeri (Income Value):** Varlığın ekonomik ömrü boyunca üretmesi beklenen net nakit akışlarının, uygun bir kapitalizasyon veya iskonto oranıyla referans tarihine indirgenmiş toplam değeridir. Tarım arazilerinin uzun dönemli değer oluşumunda gelir değeri yaklaşımı literatürde baskın teorik modeldir (Rehber, 1984).

2.2. Tarımsal Varlıkların Sınıflandırılması ve Değerleme Kapsamı

Tarımsal işletme yapısını oluşturan varlıklar homojen bir nitelik taşımadığından, kıymet takdiri çalışmalarında varlıkların biyolojik ve teknik ömürlerine göre bir sınıflandırma yapılmaktadır (Erkuş et al., 1995):

1. **Taşınmaz Varlıklar (Toprak ve Arazi Rantı):** Miktarı artırılamayan, üretilmeyen ve coğrafi konumu değiştirilemeyen bir üretim faktörüdür. Arazi değeri, üzerindeki toprak kalitesi ve rantal getirilerin bir fonksiyonudur.
2. **Bitkisel Üretim Varlıkları:** Tek yıllık tarla bitkileri ve sebzeler ile çok yıllık meyve bahçeleri, bağlar ve zeytinlikler olarak ayrılır. Çok yıllık bitkilerde değerlendirme; tesis dönemi, verime yatma dönemi, tam verim çağı ve azalan verim (yaşlılık) dönemi gibi biyolojik fazlara göre dinamikleşir (Barry & Ellinger, 2012).
3. **Hayvansal Varlıklar (Canlı Demirbaşlar):** Sürekli bir biyolojik dönüşüm (büyüme, laktasyon, gebelik) içinde bulunmaları nedeniyle değerleri sabitleşmez. Genetik potansiyel, damızlık değeri ve kasaplık değer ayrımı esastır.
4. **Tarımsal Sabit Sermaye Unsurları:** Traktörler, biçerdöverler, modern basınçlı sulama sistemleri, polikarbon/cam seralar ve soğuk hava depoları bu gruptadır. Kıymet takdirinde fiziksel ve fonksiyonel aşınma (amortisman) hesaplamaları belirleyicidir (Güneş, 2019).

2.3. Tarımsal Varlıkların Muhasebeleştirilmesinde TMS 41 ve Gerçeğe Uygun Değer Yaklaşımı

Uluslararası Finansal Raporlama Standartları (IFRS) kapsamında yer alan IAS 41 (Türkiye'deki karşılığı TMS 41 Tarım Standardı) standardı, tarımsal varlıkların muhasebeleştirilmesinde geleneksel "tarihsel maliyet" (historical cost) yöntemini terk ederek "**gerçeğe uygun değer**" (**fair value**) modelini zorunlu kılmıştır. Standart uyarınca, biyolojik varlıklar (canlı hayvanlar ve hasat edilmemiş bitkisel ürünler) ilk muhasebeleştirilme anında ve her raporlama döneminde, satış maliyetleri düşülmüş gerçeğe uygun değeri üzerinden ölçülmelidir (IASB, 2024).

Argilés ve Slof (2001) tarafından yapılan ampirik çalışmalar, gerçeğe uygun değer yaklaşımının tarımsal işletmelerin finansal performansını ve özkaynak yapısını tarihsel maliyete göre çok daha şeffaf ve gerçeğe yakın yansıttığını ortaya koymuştur. Bu karşılık Elad (2004) ile Herbohn ve Herbohn (2006), özellikle gelişmekte olan ülkelerde aktif ve derin bir tarım piyasasının (active market) bulunmadığı durumlarda, gerçeğe uygun değer belirlenmesinde kullanılan subjektif projeksiyonların finansal tabloların güvenilirliğini (reliability) zedeleyebileceğini savunmaktadır.

Tarım sigortaları (TARSİM) bağlamında TMS 41 standardı, poliçe tanzimindeki "mutabakatlı değer" veya "sigorta bedeli" saptamaları için nesnel bir finansal zemin hazırlar. Sigortalanan canlı demirbaşın veya gelecekteki ürünün finansal raporlardaki gerçeğe uygun değeri, hasar anında ödenecek tazminat tavanının belirlenmesinde asimetrik bilgi (asymmetric information) riskini ve taraflar arası hukuki ihtilafları azaltan bir çıpa vazifesi görmektedir.

3. Tarımsal Kıymet Takdiri Yöntemleri: Teorik Temeller ve Uygulama Yaklaşımları

Tarımsal varlıkların değerinin tahmin edilmesinde literatürde kabul görmüş üç klasik (Maliyet, Gelir, Piyasa) ve son dönemde ekonometrik yazılım altyapılarının gelişmesiyle öne çıkan ileri yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin tarımsal varlık grupları üzerindeki operasyonel etkinlik matrisi ve TARSİM süreçlerindeki fonksiyonel karşılıkları **Tablo 1**'de detaylı olarak sunulmuştur.

3.1. Maliyet (Cost) Yöntemi

Maliyet yöntemi, bir tarımsal varlığın iktisadi değerinin, o varlığın değerlendirme tarihindeki yeniden üretim veya ikame maliyeti esas alınarak hesaplanması ilkesine dayanır. Yöntemin teorik omurgası aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$V_{varlık} = C_{yeniden} - D_{amortisman}$$

Burada; $V_{varlık}$: Varlığın kıymet takdir değeri, $C_{yeniden}$: Değerleme tarihindeki güncel fiyatlarla varlığın yeniden yapım/üretim maliyeti, $D_{amortisman}$: Varlığın yaşına, yıpranma düzeyine göre hesaplanan kümülatif amortisman tutarıdır.

Maliyet yöntemi, tarım sigortalarında özellikle tam verim çağına ulaşmamış genç meyve bahçelerinin/bağların tesis dönemi masraflarının saptanmasında ve sera konstrüksiyonlarının hasar değerlemesinde ikame maliyetini vermesi bakımından işlevseldir. Ancak varlığın piyasada yaratacağı rantsal geliri hesaba katmadığı için iktisadi değerin "alt sınırını" (floor value) temsil eder (Featherstone & Baker, 1987).

3.2. Gelir (Kapitalizasyon) Yöntemi

Gelir kapitalizasyonu yöntemi, tarımsal varlığın değerini, o varlığın gelecekte üreteceği tahmin edilen net gelir serilerinin bugünkü değere indirgenmesi esasına dayandırır. Yöntemin temel matematiksel modeli (Gordon Kapitalizasyon Formülü) şu şekildedir:

$$V = \frac{R}{f}$$

Burada; V: Tarımsal varlığın (özellikle arazi veya tam verimdeki bahçenin) kapitalizasyon değeri (TL/da), R: Taşınmazdan elde edilen yıllık ortalama net gelirdir (TL/da), f: Kapitalizasyon faiz oranı

Tarımsal gelirler; iklimsel şoklar, hastalıklar ve tarım ürünleri fiyatlarındaki yüksek oynaklık (volatilité) nedeniyle yıldan yıla yüksek varyans gösterir. Bu doğrultuda Moschini ve Hennessy (2001), tek bir üretim dönemine ait net gelirin kullanılmasının yanıltıcı olacağını, en az 3 ila 5 yıllık hareketli ortalamaların (moving averages) alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Kapitalizasyon oranı (f) üzerindeki küçük bir değişimin (1 puanlık düşüş veya artış) arazi değerinde yaratacağı marjinal etki çok yüksek olduğundan, modelin duyarlılık analizleri (sensitivity analysis) ile tahkim edilmesi zorunludur (Hardaker et al., 2015).

3.3. Piyasa (Karşılaştırma) Yöntemi

Piyasa yöntemi, etkin ve şeffaf çalışan bir gayrimenkul piyasasında fiyatların mevcut tüm bilgileri yansıttığı varsayımına (Etkin Piyasa Hipotezi) dayanır. Değerlemesi yapılacak mülk ile benzer agro-ekolojik bölgede yer alan, benzer toprak yapısına ve sulama imkanlarına sahip, yakın tarihte satılmış referans mülklerin (emsallerin) fiyatları toplanır. Ardından, emsaller ile hedef mülk arasındaki lokasyon, toprak derinliği, eğim, yola cephe olma gibi farklılıklar

doğrusal düzeltme katsayıları ile standardize edilerek referans piyasa değerine ulaşılır (World Bank, 2020). Gelişmekte olan ülkelerdeki tarım arazisi piyasalarında kayıt dışı işlemlerin, vergi kaçırma amaçlı düşük beyanların ve mülk heterojenliğinin yüksek olması yöntemin ampirik güvenilirliğini kısıtlamaktadır (OECD, 2019).

3.4. Hedonik Fiyat Yöntemi

Hedonik fiyat teorisi (Rosen, 1974), heterojen ve bileşik bir mal olan tarım arazisinin piyasa fiyatının, mülkü oluşturan her bir bağımsız içsel ve dışsal niteliğin örtük (implicit) fiyatlarının bir fonksiyonu olduğunu savunur. Ekonometrik olarak model şu şekilde formüle edilir:

$$\ln(P_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i$$

Burada; P_i : i nolu tarım arazisinin piyasa satış fiyatı, X_{ij} : Arazinin sahip olduğu j nolu fiziksel veya çevresel özellik, β_j : İlgili özelliğin arazi fiyatı üzerindeki marjinal örtük fiyat katsayısı, ε_i : Hata terimidir.

Çiçek ve Hatırlı (2015) tarafından yapılan ampirik analizler, hedonik modellerde fonksiyonel formun doğru seçilmesinin katsayıların tarafsızlığı açısından önemli olduğunu göstermiştir. Tarım sigortalarında hedonik fiyatlama, parsellerin don çukuru veya mikro-klimatik risk kuşaklarında yer alma durumuna göre **aktüeryal risk prim tabanının (tarife modellemesi)** nesnel olarak ayrıştırılmasında gelişmiş bir analitik araç sunmaktadır.

3.5. İleri Yöntemler: Risk ve Belirsizlik Temelli Yaklaşımlar

- **Senaryo Analizi:** Makroekonomik krizler, girdi maliyetlerindeki şoklar veya kuraklık senaryoları altında varlık değerinin değişim aralıklarını simüle eder.
- **Duyarlılık Analizi:** Model girdilerindeki (fiyat ve verim) %10'luk bir değişimin, net gelir ve arazi değeri üzerindeki esneklik katsayısını ölçer. Just ve Weninger (1999), tarımsal değerlendirme modellerinde verim ve fiyat değişkenlerinin hata payına en duyarlı parametreler olduğunu kanıtlamıştır.
- **Stokastik Simülasyonlar (Monte Carlo):** Fiyat ve verim gibi değişkenlere ait geçmiş olasılık dağılımlarını kullanarak binlerce iterasyon gerçekleştirir ve "olası değer olasılık dağılımı" üretir (Hardaker et al., 2015).

Tablo 1: Yöntemlerin Tarımsal Varlık Grupları Üzerindeki Operasyonel Etkinlik Matrisi

Varlık Türü	Tercih Edilen Birincil Yöntem	Temel Girdi ve Analitik Parametreler	Tarım Sigortalarındaki Fonksiyonel Karşılığı
Tarım Arazisi Kıymeti	Gelir (Kapitalizasyon) Yöntemi	Net Gelir (TL/da), Kapitalizasyon Oranı (f)	Kamulaştırma Kanunu (2942 s.K.) Tahtında Bedel Tespiti ve Kredi İpotek Değerlemesi
Tek Yıllık Bitkisel Ürünler	Piyasa + Gelir Entegrasyonu	Bölgesel Hal Fiyatı, Fiili Verim (kg/da)	Hasar Öncesi Poliçe Bedeli Oluşturma ve "Noksanlılık Yöntemi" ile Tazminat Matrahı Hesabı
Çok Yıllık Bitkiler (Genç/Tesis)	Maliyet Yöntemi	Fidan, İşçilik, Amortisman ve Bakım Girdileri	TARSİM Ağaç / Fidan Sigortalarında "Yeniden Tesis Maliyeti" Kapsamında Hasar Tazmini
Çok Yıllık Bitkiler (Tam Verim)	Gelir (Kapitalizasyon) Yöntemi	Ekonomik Ömür, İskonto Edilmiş Gelecek Gelir Akışı	Verim Çağındaki Bağ/Bahçelerin Don, Dolu Sonrası Ürün ve Gövde Değer Kaybı Analizi
Hayvansal Varlıklar	Piyasa (TMS 41 Odaklı)	Yaş, Genetik İrk, Canlı Ağırlık, Laktasyon Eğrisi	Devlet Destekli Hayvan Hayat Sigortalarında "Mutabakatlı Değer" ve Hasar Ölüm Tazminatı
Tarımsal Altyapı ve Seralar	Maliyet Yöntemi	Güncel Yapım Maliyeti, Yıpranma Payı (%)	TARSİM Sera Sigortalarında Konstrüksiyon ve Cam/Plastik Örtü Enkaz/Yenileme Değerlemesi

4. Tarımsal Kıymet Takdirinin Amaçları ve Kullanım Alanları

Tarımsal kıymet takdiri çalışmaları makro ve mikro düzeyde birçok iktisadi karara altlık oluşturur (Tablo 1).

4.1. Tarımsal Kredilendirme ve Finansman Süreçleri

Finans kuruluşları tarafından kullanılan tarımsal kredilerde, borcun geri ödenememe riskine karşılık tarım arazileri, işletme binaları ve endüstriyel seralar teminat (ipotek) olarak alınmaktadır. Barry ve Ellinger (2012), kredi teminat değerlemesinde sadece anlık piyasa fiyatının baz alınmasının finansal kriz dönemlerinde varlık balonlarına veya ani likidite sıkışıklıklarına yol açabileceğini; bu nedenle sürdürülebilir borç taşıma kapasitesini gösteren *Gelir Yöntemi* ile *Piyasa Yöntemi*'nin kombine edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

4.2. Kamulaştırma ve Arazi Düzenleme Uygulamaları

Kamu yararının gerektirdiği durumlarda özel mülkiyete konu tarım arazilerinin devlet tarafından edinilmesi sürecinde ödenecek adil bedelin tespiti tamamen kıymet takdiri hukukuna tabidir. Türkiye'de mülkiyet hakkının korunması ve adil tazminat ilkesi yasal olarak **2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu** (özellikle 11. Maddesi) ile düzenlenmiştir. Kanun, tarım arazilerinin değerinin belirlenmesinde hiçbir yoruma yer bırakmayacak şekilde *"arazinin mevkii ve şartlarına göre olduğu gibi kullanılması halinde getirebileceği net geliri"* esas almıştır. Yargıtay içtihatları ile standardize edilen bu süreçte resmi kurumlarca onaylanmış veriler kullanılarak kapitalizasyon formülü işletilir.

4.3. Miras, Ortaklık ve Hukuki Uyuşmazlıklar

Gelişmekte olan ülkelerde ve Türkiye'de tarım işletmelerinin kahir ekseriyeti aile işletmesi formundadır. Nesiller arası geçişlerde miras hukuku (Türk Medeni Kanunu ve 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu hükümleri uyarınca) ve ortaklığın giderilmesi davalarında mülkiyetin parçalanmasını engellemek amacıyla mahkemelerce görevlendirilen tarım ekonomisti bilirkişiler, işletmenin varlıklarının değerini objektif olarak raporlayarak mülkiyet uyuşmazlıklarının çözümünü sağlarlar.

5. Tarım Sigortalarında Kıymet Takdiri Uygulamaları ve TARSİM

Tarım sigortaları, tarımsal üretimin doğasında var olan sistematik risklerin havuzlama mantığıyla dağıtılmasını sağlayan en etkin risk yönetimi aracıdır. Sigorta mekanizmasının aktüeryal olarak dengede kalabilmesi tamamen kıymet takdirinin hassasiyetine bağlıdır (Goodwin & Smith, 2013).

5.1. Sigorta Öncesi Değerleme (Eks-Ante Değerleme)

Police kurulurken, azami hasar anında alabileceği en yüksek finansal değeri ifade eden "Sigorta Bedeli" saptanır. Türkiye'deki TARSİM modelinde sigorta öncesi değerlendirme, Çiftçi Kayıt Sistemi (ÇKS) verileri üzerinden yürütülmektedir. TARSİM aktüerya departmanı, o üretim yılı için bölgesel bazda "Referans Ürün Fiyatları" ve "Beklenen Bölgesel Ortalama Verim" verilerini sisteme yükler. Sigorta bedeli şu formülle hesaplanır:

$$\text{Sigorta Bedeli} = \text{Parsel Alanı (da)} \times \text{Beklenen Verim (kg/da)} \times \text{Referans Fiyat (TL/kg)}$$

Bu aşamada meydana gelebilecek bir "Aşırı Sigorta" durumu üreticide ahlaki tehlike yaratırken; "Eksik Sigorta" durumu ise hasar anında hasar ikame oranını düşürerek üreticinin finansal olarak mağdur olmasına sebep olur (Goodwin & Smith, 2013).

5.2. Hasar Sonrası Değerleme (Eks-Post Değerleme) ve TARSİM Metotları

Bir hasar ihbarını takiben TARSİM tarafından eğitilmiş bağımsız tarım eksperleri sahaya sevk edilir. Eksperin görevi, meydana gelen fiziksel biyolojik zararı finansal tazminat matrahına dönüştürecek kıymet takdirini yapmaktır. TARSİM hasar tespitinde iki spesifik metodoloji uygulamaktadır (**Bkz. Tablo 1**):

1. **Bitkisel Ürünlerde Noksanlık Yöntemi:** Eksper, hasarlı parseli temsil edecek örnekleme alanları seçer. Bu alanlardaki zarar görmüş bitki/meyve sayısı ile sağlam unsurları sayarak fiziksel hasar oranını saptar. Nihai hasar oranı, verim ve kalite noksanlığının geometrik bileşkesidir.
2. **Çok Yıllık Tesislerde İkame ve Yeniden Yapım Maliyeti Yöntemi:** Don veya fırtına nedeniyle ağaçların/seraların zarar görmesi durumunda; enkaz kaldırma, söküm, yeni fidan tedariki ve bakım masrafları kümülatif olarak maliyet yöntemi mantığıyla hesaplanarak üreticiye tazmin edilir.

6. Kıymet Takdirinde Yapısal Sorunlar ve Tartışma

Tarımsal kıymet takdiri ve sigorta entegrasyonu, uygulamada ampirik literatürün sıklıkla vurguladığı kronik yapısal ve metodolojik darboğazlarla karşı karşıyadır. Bu sorunlar ve etki mekanizmaları **Tablo 2**'de sistematik olarak analiz edilmiştir.

6.1. Bilgi Asimetrisi ve Veri Altyapısı Krizi

Tarımsal değerlemenin en büyük metodolojik açmazı, güvenilir kayıtlı veri eksikliğidir. Çiftçilerin düzenli kayıt tutmaması, Gelir Yöntemi'ndeki net gelir tahminlerinin nesnel veriler yerine uzman yargısına dayanmasına yol açmaktadır. Just ve Weninger (1999) ile OECD (2019) raporları, veri altyapısındaki bu zayıflığın modellerde "Sistematik Ölçüm Hatası Riski" ürettiğini ve bu hataların sigorta prim fiyatlamasını bozarak olumsuz seçim (adverse selection) problemine yol açtığını kanıtlamaktadır.

6.2. Eksper Değerlendirme Varyansı (Subjektiflik)

Saha hasar tespitlerinin eksper kararlarına dayanması, "Değerlendirme Varyansı" denilen kronik bir subjektiflik doğurmaktadır. Aynı parseldeki zarar için farklı eksperlerin farklı oranlar takdir etmesi sisteme olan toplumsal güveni zedelemektedir. Hardaker et al. (2015), standart protokollere tam uyulmadığı durumlarda uzman yargısının yapısal sapmalara (structural biases) dönüşeceğini belirtmektedir.

6.3. İklim Değişikliği ve Doğrusalsızlık Problemi

Geleneksel kıymet takdiri modelleri, geçmiş verilerin geleceğe ait risk profilini temsil ettiği varsayımına dayanır. Ancak FAO (2017) raporlarının ortaya koyduğu üzere, iklim değişikliği tarımsal riskleri doğrusal olmayan (non-linear) bir boyuta taşımıştır. Geçmiş 20 yılın meteorolojik verileri baz alınarak hesaplanan don veya kuraklık olasılığı, cari üretim dönemindeki ekstrem anomali şoklarını açıklamakta yetersiz kalmaktadır.

Tablo 2: Tarımsal Kıymet Takdiri ve Sigorta Süreçlerindeki Yapısal Sorunlar Matrisi

Saptanan Yapısal Sorun	Metodolojik ve Operasyonel Etkisi	Literatür Dayanağı (Ampirik / Kurumsal)	Önerilen Teknolojik ve Politik Çözüm
Veri Kıtlığı ve Bilgi Asimetrisi	Net gelir hesaplarında sapmalara; sigortada olumsuz seçim krizine yol açar.	Just & Weninger (1999); OECD (2019)	ÇKS altyapısının blok zincir tabanlı dijital çiftçi muhasebe sistemleri ile entegrasyonu.
Ekonomik Volatilite ve Fiyat Oynaklığı	Gelir yönteminde statik fiyat kullanımını ve gelecek nakit projeksiyonlarını geçersiz kılar.	Moschini & Hennessy (2001)	Tek yıllık spot fiyat yerine 5 yıllık hareketli geometrik ortalamalar veya fiyat simülasyonları.
Eksper Subjektifliği ve Varyans	Hasar tespitlerinde tutarsız tazminatlara ve hukuki uyumsuzlıklara sebebiyet verir.	Hardaker et al. (2015); TARSİM (2024)	Uzaktan algılama (NDVI indeksleri), RTK destekli dron filoları ve yapay zekâ tabanlı hasar tespit yazılımları.
İklim Değişikliği ve Durağanlık Kaybı	Geçmiş veri temelli aktüeryal modelleri ve hasar tahmin algoritmalarını işlevsiz bırakır.	FAO (2017)	Statik denklemler yerine dinamik, olasılıklı ve iklim projeksiyonlu Monte Carlo simülasyonları.
Kurumsal Metodolojik Uyuşmazlık	Aynı parsel için bankanın, mahkemenin ve sigorta havuzunun çelişen üç farklı değer üretmesi.	Argilés & Slof (2001); OECD (2019)	"Ulusal Tarımsal Değerleme Standartları"nın (UTDS) yasal olarak kurulması ve tekil veri yönetimi.

7. Sonuç ve Politika Önerileri

Tarımsal kıymet takdiri; kırsal kalkınmanın sürdürülebilirliği, tarımsal finansman piyasalarının güvenliği ve devlet destekli tarım sigortalarının (TARSİM) finansal sürdürülebilirliği açısından kaldıraç görevi gören stratejik bir mekanizmadır. Yapılan bu kapsamlı değerlendirmeler, tarımsal değerlemede tek bir yönteme bağlı kalmanın tarım sektörünün biyolojik ve stokastik gerçekliği ile bağdaşmadığını ortaya koymuştur (**Tablo 2**).

Türkiye özelinde TARSİM ve yasal kamulaştırma pratiklerinin kurumsal bir standardizasyon getirdiği kabul edilmekle birlikte, sistemin etkinliğini artırmak amacıyla aşağıdaki stratejik politika önerilerinin hayata geçirilmesi elzemdir:

1. **Uzaktan Algılama ve CBS Tabanlı Entegre Veri Ambarının Kurulması:** Uydu takımyıldızlarından elde edilen yüksek çözünürlüklü multispektral görüntüler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında işlenerek parsel bazında normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksleri (NDVI) haritaları çıkarılmalıdır.
2. **Saha Eksper Sisteminin Yapay Zekâ ile Tahkimi:** Hasar tespit süreçlerindeki değerlendirme varyansını ortadan kaldırmak amacıyla, derin öğrenme (CNN) tabanlı görüntü işleme algoritmaları ve dron (İHA) teknolojileri ile taranan hasarlı alanlar üzerinden nesnel kayıp oranları hesaplanmalıdır.
3. **Dinamik ve Bölgesel Kapitalizasyon Oranı Modellemesi:** Ülke genelinde homojen kapitalizasyon oranı kullanımı yerine; her bir tarım havzası için ürünün pazar riski, bölgenin kuraklık frekansı ve su kısıtlarını birer risk primi olarak modele dahil eden dinamik varlık fiyatlama modellerine geçilmelidir.
4. **Hibrit ve Standart Değerleme Normlarının Kurumsallaştırılması:** Uluslararası Değerleme Standartları (IVS) ile tam uyumlu, Türkiye'ye özgü bir "**Ulusal Tarımsal Değerleme Standartları**" (UTDS) rehberi yayımlanarak tüm finans, kamu ve sigorta kurumları için metodolojik birlik yasal olarak sağlanmalıdır.

Kaynakça

- Açlar, A. ve Çağdaş, V. (2002). Taşınmaz (gayrimenkul) değerlemesi. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Yayını.
- Argilés, J. M., & Slof, E. J. (2001). New opportunities for farm accounting. *European Accounting Review*, 10(2), 361-383. <https://doi.org/10.1080/09638180110038447>
- Barry, P. J., & Ellinger, P. N. (2012). Financial management in agriculture (7th ed.). Pearson Education.
- Çiçek, A. ve Hatırlı, S. A. (2015). Tarım arazisi değerlemesinde hedonik fiyat modelinin kullanımı: Antalya ili örneği. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 21(3), 412-425. <https://doi.org/10.15832/tbd.46194>
- Elad, C. (2004). Fair value accounting in the agricultural sector: Some international perspectives. *European Accounting Review*, 13(4), 621-641. <https://doi.org/10.1080/0963818042000216794>
- Erkuş, A., Bülbül, M., Kırıl, T., Açıl, F. ve Demirci, R. (1995). Tarım ekonomisi. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Eğitim, Araştırma ve Geliştirme Vakfı Yayınları.
- Featherstone, A. M., & Baker, T. G. (1987). An examination of farm land value aging and asset valuation methods. *Western Journal of Agricultural Economics*, 12(2), 112-123. [şüpheli bağlantı kaldırıldı]
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2017). The future of food and agriculture: Trends and challenges. FAO Rome.
- Goodwin, B. K., & Smith, V. H. (2013). What harms agricultural insurance? Valuation, moral hazard, and financial sustainability. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 38(2), 143-158. [şüpheli bağlantı kaldırıldı]
- Gordon, M. J. (1962). The investment, financing, and valuation of the corporation. R.D. Irwin.
- Güneş, E. (2019). Tarımsal kıymet takdiri ve bilirkişilik (3. Baskı). Nobel Akademik Yayıncılık.
- Hardaker, J. B., Lien, G., Anderson, J. R., & Huirne, R. B. (2015). Coping with risk in agriculture: Applied decision analysis (3rd ed.). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781780645841.0000>
- Herbohn, K., & Herbohn, J. (2006). International accounting standard (IAS) 41: What implications for the valuation of biological assets? *Australian Accounting Review*, 16(39), 56-68. <https://doi.org/10.1111/j.1835-2561.2006.tb00023x>
- International Accounting Standards Board [IASB]. (2024). International financial reporting standards: IAS 41 Agriculture. IFRS Foundation.

- International Valuation Standards Council [IVSC]. (2024). International valuation standards (IVS). IVSC London.
- Just, R. E., & Weninger, Q. (1999). Are crop yields normally distributed? Implications for asset valuation and crop insurance. *American Journal of Agricultural Economics*, 81(2), 287-304. <https://doi.org/10.2307/1244482>
- Moschini, G., & Hennessy, D. A. (2001). Uncertainty, risk aversion, and risk management for agricultural producers. In B. L. Gardner & G. C. Rausser (Eds.), *Handbook of agricultural economics* (Vol. 1, pp. 87-153). Elsevier Science. [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(01\)10005-7](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(01)10005-7)
- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2019). *Agricultural risk management systems and data infrastructure frameworks*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/23120190-en>
- Rehber, E. (2014). Tarımsal kıymet takdiri ve kamulaştırma (Gözden Geçirilmiş 4. Baskı). Ekin Basım Yayın Dağıtım. (İlk basım yılı 1984)
- Rosen, S. (1974). Hedonic prices and implicit markets: Product differentiation in pure competition. *Journal of Political Economy*, 82(1), 34-55. <https://doi.org/10.1086/260169>
- Sümer, S. ve Polat, M. (2016). Türkiye'de devlet destekli tarım sigortaları uygulamaları ve TARSİM'in gelişimi. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 22(1), 45-56.
- Tagliarino, N. K., Bununu, Y. A., & Micheal, O. (2018). Compensation for expropriated agricultural land: An international comparative analysis. *Land Use Policy*, 75(2), 415-429. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.045>
- Tarım Sigortaları Havuzu [TARSİM]. (2024). 2024 yılı faaliyet raporu ve hasar tespit istatistikleri. TARSİM Yayınları.
- Williams, J. B. (1938). *The theory of investment value*. Harvard University Press.
- World Bank. (2020). *Agricultural land valuation and sovereign risk management guidelines*. World Bank Group. <https://doi.org/10.1596/34120-en>

5. Bölüm

Tarımsal Sulamada Suyun Tasarruflu Kullanımı

Ali Beyhan UÇAK¹

1. Giriş

Su, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından temel doğal kaynaklardan biridir. Yenilenebilir bir kaynak olarak değerlendirilmesine rağmen, kullanılabilir tatlı su miktarının sınırlı olması ve sektörler arası talebin giderek artması, su yönetimini yalnız teknik değil aynı zamanda ekonomik ve çevresel bir konu hâline getirmektedir. Nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme ve gıda talebindeki yükseliş, özellikle tarım sektöründe kullanılan suyun daha dikkatli planlanmasını gerekli kılmaktadır. Tarımın toplam su tüketimi içindeki yüksek payı dikkate alındığında, sulamada sağlanacak her iyileşmenin su kaynaklarının korunmasına doğrudan katkı sağlayacağı görülmektedir (Çakmak, 2002; Hoekstra ve Mekonnen, 2012).

Gelişmekte olan birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de toprak ve su kaynakları; plansız arazi kullanımı, hızlı nüfus artışı, iklim değişikliği, kuraklık riski ve su kirliliği gibi baskı unsurlarıyla karşı karşıyadır. Bu durum, gelecekte artması beklenen gıda talebinin karşılanmasını daha güç hâle getirmektedir. Mevcut tarım alanlarının büyük ölçüde kullanılıyor olması ve yeni tarım alanlarının sınırlı kalması nedeniyle, üretimi artırmanın temel yollarından biri birim alandan alınan verimin yükseltilmesidir. Ancak bu artışın su tüketimini artırmadan sağlanabilmesi, sulama uygulamalarının bilinçli, ölçülü ve bilimsel temellere dayalı biçimde yürütülmesine bağlıdır (Mekonnen ve Hoekstra, 2016).

Sulama uygulamalarında başarı, yalnızca bitkiye yeterli miktarda su verilmesiyle açıklanamaz. Suyun doğru zamanda, uygun yöntemle ve bitkinin kök bölgesinde kullanılabilir hâlde tutulması gerekir. Bu nedenle sulama planlamasında toprak, bitki ve atmosfer ilişkilerinin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Evapotranspirasyon, toprak nemi, bitki gelişme dönemi, sulama yöntemi ve iklim koşulları birlikte ele alınmadığında, fazla su kullanımı verim artışı sağlamayabileceği gibi derine sızma, yüzey akış, besin maddesi kaybı, tuzluluk ve enerji tüketimi gibi sorunlara da yol açabilmektedir (Allen ve ark., 1998; Pereira ve ark., 2026).

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, abucak@siirt.edu.tr

İklim değışikliğıyle birlikte kurak dönemlerin sıklığı ve şiddeti, yağışların zamansal dağılımı ve atmosferik buharlaşma talebi değışmektedir. Bu değışimler, sulama havzalarında su arzı ile bitki su ihtiyacı arasındaki dengeyi daha kırılgan hâle getirmektedir. Bu nedenle tarımsal su yönetiminde yalnız mevcut koşulların değil, farklı iklim ve su senaryolarının da dikkate alınması gerekmektedir. Matematiksel modeller, bitki gelişim simülasyonları, coğrafi bilgi sistemleri ve doğrusal programlama yaklaşımları, farklı su düzeylerinde ürün deseni, su tüketimi ve ekonomik getirinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Döll ve Siebert, 2002; Jones ve ark., 2003; Jägermeyr ve ark., 2015).

Bu bölümde, tarımsal sulamada suyun tasarruflu kullanımına ilişkin temel sorunlar ve çözüm yaklaşımları genel bir çerçevede değerlendirilmektedir. Öncelikle Türkiye’de su kaynakları ve sulamadaki mevcut durum ele alınmakta, ardından su kayıplarının nedenleri, iklim değışikliğinin sulama yönetimine etkileri, modern sulama sistemleri, dijital tarım uygulamaları, havza ölçeğinde planlama ve çiftçi eğitimi gibi başlıklar incelenmektedir. Böylece tarımsal su tasarrufunun yalnızca teknik bir sulama sistemi seçimiyle değil, bütüncül bir su yönetimi anlayışıyla sağlanabileceğı ortaya konulmaktadır.

2. Su Kaynakları ve Tarımsal Sulamadaki Mevcut Durum

Türkiye’nin toprak ve su varlığı incelendiğinde, tarımsal üretim açısından önemli bir potansiyele sahip olmakla birlikte su kaynakları bakımından zengin ülkeler arasında yer almadığı görülmektedir. Resmî değerlendirmelerde işlenen tarım alanlarının yaklaşık 23-24 milyon ha, ekonomik olarak sulanabilir alan potansiyelinin yaklaşık 8,5 milyon ha ve sulamaya açılan alanın yaklaşık 6,7-7,0 milyon ha düzeyinde olduğu belirtilmektedir. Kullanılabilir su potansiyelinin yaklaşık 98 milyar m³ yüzey suyu ve 14 milyar m³ yer altı suyundan oluştuğı; toplam kullanılabilir su miktarının ise yaklaşık 112 milyar m³ olduğu bildirilmektedir. Kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarının 1.347 m³ civarında olması, Türkiye’nin su stresi yaşayan ülkeler arasında değerlendirilebileceğini göstermektedir (DSİ, 2024; T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

Mevcut su kaynaklarının büyük bölümü tarımsal amaçlı kullanılmaktadır. Türkiye’de toplam su tüketiminin önemli bir kısmının sulamaya ayrılması, su tasarrufuna yönelik çalışmaların öncelikle tarım sektöründe güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Dünya genelinde de benzer bir durum söz konusudur. Özellikle gelişmekte olan bölgelerde tarımsal sulamanın toplam su kullanımı içindeki payı oldukça yüksek iken, gelişmiş ülkelerde sanayi ve kentsel su kullanımı daha belirgin hâle gelebilmektedir. Bu farklılık, ülkelerin ekonomik

gelişmişlik düzeyi, üretim yapısı, sulama altyapısı ve su yönetimi politikalarıyla yakından ilişkilidir (FAO, 2021; T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

Türkiye’de sulanan alanların önemli bir bölümünde yüzey sulama yöntemleri kullanılmaya devam etmektedir. Basınçlı sulama sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte damla ve yağmurlama sulama uygulamaları artmış olsa da, mevcut sulama randımanının yükseltilmesi hâlen öncelikli bir gerekliliktir. Açık kanal sistemlerinden kapalı basınçlı şebekelere geçiş, iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılması bakımından önemlidir. Bunun yanında, yalnız altyapı yatırımı yapılması yeterli değildir. Sulama sistemlerinin projeye uygun işletilmesi, bakım-onarımın düzenli yapılması, filtreleme ve basınç kontrolünün sağlanması ve çiftçilerin bitki-toprak-su ilişkisi konusunda bilgilendirilmesi gerekmektedir (Playán ve Mateos, 2006; Pérez-Blanco ve ark., 2020).

Modern sulama sistemlerine geçiş, su tasarrufu açısından önemli bir araç olmakla birlikte, bu sistemlerin her koşulda otomatik olarak daha az su tüketimi sağlayacağı düşünülmemelidir. Basınçlı sistemlerde sulama süresi, basınç, debi, damlatıcı aralığı, filtrasyon, toprak özellikleri ve bitki gelişme dönemi dikkate alınmadığında beklenen tasarruf sağlanamayabilir. Bu nedenle sulama yönteminin seçimi ve işletilmesi, su kaynağının niteliği, arazi topoğrafyası, toprak tekstürü, bitki türü, iklim koşulları ve üreticinin teknik bilgi düzeyiyle birlikte değerlendirilmelidir (Molden ve ark., 2010; Fereres ve Soriano, 2007).

3. Sulama, Su Kalitesi ve Çevresel Etkiler

Su kaynaklarının sürdürülebilirliği, yalnızca su miktarının korunmasıyla sınırlı değildir. Su kalitesinin korunması da tarımsal üretimin devamlılığı ve ekosistem sağlığı açısından temel bir koşuldur. Tarım ve hayvancılık faaliyetleri, yoğun su tüketiminin yanı sıra gübre, pestisit ve diğer kimyasalların kullanımı nedeniyle yüzey ve yeraltı sularında kirlilik baskısı oluşturabilmektedir. Bu durum, su ekosistemlerinin yanında toprak sağlığı, biyolojik çeşitlilik ve gıda güvenliği üzerinde de olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir (Madjar ve ark., 2024; Khan ve ark., 2022).



Şekil 1. Su kaynaklarında kirlilik ve atık su deşarjına ilişkin örnek görünüm.

Arazi kullanımındaki hatalı uygulamalar, doğal kaynakların üretkenliğini azaltan önemli etkenler arasındadır. Toprak bozulması, özellikle yoğun tarımsal üretim yapılan alanlarda daha hızlı ortaya çıkabilmekte; erozyon, organik madde kaybı, tuzlulaşma, sıkışma ve kimyasal kirlenme gibi süreçler üretim kapasitesini sınırlayabilmektedir. Tarımsal üretim alanlarının kaybı ve su kalitesindeki bozulma, yalnız bugünkü üretimi değil, gelecek dönemlerdeki gıda arzını da tehdit etmektedir (Foley ve ark., 2005; FAO, 2021).

Yüzey ve yeraltı suları birbiriyle etkileşim hâlinde olduğundan, bir kaynaktaki kirlenme diğerini de etkileyebilmektedir. Kirli yüzey suları toprak profilinden süzülerek yeraltı suyuna ulaşabilirken, kirlenmiş yeraltı suları akarsu ve göl sistemlerine karışarak yüzey sularının kalitesini düşürebilmektedir. Özellikle arıtılmadan veya yeterince kontrol edilmeden kullanılan evsel ve endüstriyel atık sular, ağır metal birikimi ve patojen taşınımı gibi riskler nedeniyle tarımsal sulamada dikkatle değerlendirilmelidir.

Atık sularla sulanan sebzelerde kadmiyum, krom ve kurşun gibi ağır metallerin önerilen sınır değerlerin üzerine çıkabildiği ve bu elementlerin bitkiler aracılığıyla besin zincirine taşınabildiği bildirilmektedir. Bu durum, yalnız tarımsal ürün kalitesi açısından değil, insan sağlığı bakımından da önemli bir risk oluşturmaktadır. Dolayısıyla suyun tasarruflu kullanılması kadar güvenli kullanılması da sürdürülebilir tarımsal su yönetiminin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Aftab ve ark., 2023; Trotta ve ark., 2024).

4. İklim Değişikliği ve Tarımsal Su Yönetimi

İklim değişikliği, tarımsal sulama yönetimini doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Sıcaklıklardaki artış, yağış rejimindeki düzensizlikler ve aşırı meteorolojik olayların daha sık görülmesi, bitki su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacı üzerinde belirleyici olmaktadır. Türkiye’de özellikle 1999 yılından sonra ortalama sıcaklıkların çoğu yıl uzun yıllar ortalamasının üzerinde gerçekleşmesi, tarımsal üretim açısından daha sıcak ve kurak dönemlere uyum sağlanması gerektiğini göstermektedir (IPCC, 2023; Demircan ve ark., 2017).

Küresel ısınmanın etkileri yalnız sıcaklık artışıyla sınırlı değildir. Buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi, yağışların zamansal ve mekânsal dağılımının değişmesi, kuraklık ve taşkın olaylarının artması, su kaynakları üzerinde çok yönlü baskılar oluşturmaktadır. Tarım açısından en kritik sonuçlardan biri, yağış miktarındaki toplam değişimden çok yağışın hangi dönemde ve hangi şiddette gerçekleştiğidir. Kısa sürede düşen yoğun yağışlar, bitkinin kullanabileceği suyu artırmak yerine yüzey akışı, erozyon ve taşkın riskini yükseltebilir. Buna karşılık büyüme döneminde yağışların azalması sulama ihtiyacını artırmaktadır (IPCC, 2023).

Su sorunlarını yalnız iklim değişikliğiyle açıklamak yeterli değildir. Artan nüfus, plansız kentleşme, havza ölçeğinde koordinasyon eksikliği, yanlış ürün deseni, uygun olmayan sulama zamanı, yetersiz bakım yapılan sulama altyapısı ve suyun ekonomik değerinin yeterince dikkate alınmaması da su kıtlığını derinleştirebilmektedir. Bu nedenle iklim değişikliğine uyum stratejileri, su arzını artırmaya yönelik yapısal çözümlerle birlikte su talebini azaltan, su verimliliğini yükselten ve üretim desenini havza potansiyeline göre düzenleyen yaklaşımlar içermelidir (Pereira ve ark., 2002; Geerts ve Raes, 2009).

Gelecekteki su ve gıda ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için su kaynaklarının fiziksel, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarıyla birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu çerçevede entegre su kaynakları yönetimi, yalnız suyun dağıtımını değil, kullanım verimliliğini, su kalitesini, ekosistem ihtiyaçlarını, üretici gelirini ve gıda güvenliğini de kapsayan bir planlama yaklaşımı sunmaktadır. İklim değişikliği koşullarında sulama yönetimi, geçmiş iklim ortalamalarına dayalı sabit uygulamalardan çok, değişen koşullara uyum sağlayabilen dinamik karar destek sistemlerine ihtiyaç duymaktadır.

5. Tarımda Su İsrafının Nedenleri

Tarımda su israfı yalnızca gereğinden fazla su verilmesi anlamına gelmemektedir. Su kaynağından tarlaya ulaşınca kadar meydana gelen iletim kayıpları, tarlada uygulama sırasında oluşan yüzey akış ve derine sızma, yanlış zamanda sulama, uygun olmayan ürün deseni, yetersiz sistem bakımı, hatalı

basınç yönetimi ve üretici bilgi eksikliği de su israfının temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle su kayıplarının değerlendirilmesinde yalnız sulama yöntemi değil, bütün sulama zinciri dikkate alınmalıdır.

5.1. Sulama Yöntemi ve Altyapıdan Kaynaklanan Kayıplar

Yüzey sulama yöntemlerinde suyun tarlaya kontrolsüz veya düşük kontrol düzeyiyle verilmesi, buharlaşma, yüzey akış ve derine sızma kayıplarını artırabilmektedir. Karık sulamada su belirli hatlar boyunca ilerlese de, tarla tesviyesi, karık uzunluğu, akış debisi ve infiltrasyon özellikleri uygun değilse su dağılımı homojen gerçekleşmemektedir. Bu durum, tarlanın bazı bölümlerinde fazla sulamaya, bazı bölümlerinde ise yetersiz su alımına neden olabilmektedir. Basıncılı sulama sistemleri bu kayıpları azaltma potansiyeline sahip olmakla birlikte, tasarım ve işletme hataları giderilmediğinde beklenen performansa ulaşamamaktadır (Playán ve Mateos, 2006).

Altyapı kayıpları, suyun kaynaktan üretim alanına ulaşınca kadar geçtiği iletim ve dağıtım sistemlerinde meydana gelen kayıpları ifade etmektedir. Açık kanallarda buharlaşma ve sızma, eski veya çatlak boru hatlarında kaçaklar, bakımı yapılmayan şebekelerde kontrolsüz akışlar önemli su kaybı nedenleridir. Bazı bölgelerde suyun önemli bir bölümü tarlaya ulaşmadan kaybedilebilmekte, bu durum hem kullanılabilir su miktarını azaltmakta hem de sulama maliyetlerini artırmaktadır (Jägermeyr ve ark., 2015).

5.2. İklim, Sulama Zamanı ve Fazla Sulama

Yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem ve rüzgâr gibi meteorolojik etkenler sulama suyunun tarladaki etkinliğini azaltabilmektedir. Günün en sıcak saatlerinde yapılan sulamalar, özellikle yüzey ve yağmurlama sulamada buharlaşma kayıplarını artırabilir. Kurak dönemlerde toprağın su tutma kapasitesi, bitki kök derinliği ve mevcut nem düzeyi dikkate alınmadan yapılan sulamalar ise bitki tarafından kullanılmadan kayba uğrayabilir. Bu nedenle sulama zamanının belirlenmesinde yalnız takvim esaslı uygulamalar yerine toprak nemi, bitki gelişme dönemi ve atmosferik talep birlikte değerlendirilmelidir (Allen ve ark., 1998; Lakhari ve ark., 2024).

Fazla sulama, tarımsal üretimde sık karşılaşılan sorunlardan biridir. Bitkinin gereksinimi üzerinde verilen su, verimi her zaman artırmadığı gibi kök bölgesinde havalanma sorunlarına, besin maddesi yıkanmasına, taban suyu yükselmesine ve tuzluluk riskine neden olabilir. Kısıtlı su koşullarında ise bitkinin suya en duyarlı olduğu dönemlerin belirlenmesi ve suyun bu dönemlere öncelik verilerek uygulanması gerekmektedir. Kısıtlı sulama stratejileri, uygun

bitki ve gelişme dönemi seçildiğinde birim suya karşılık elde edilen verimi artırabilmektedir (Pereira ve ark., 2002; Geerts ve Raes, 2009).

5.3. Ürün Deseni, Yeraltı Suyu Kullanımı ve Yönetimsel Sorunlar

Her bitkinin su tüketimi ve suya duyarlılığı aynı değildir. Pirinç ve mısır gibi yüksek su gereksinimine sahip ürünlerin su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde yoğun biçimde yetiştirilmesi, sulama talebini artırmakta ve yeraltı suyu baskısını yükseltebilmektedir. Buna karşılık, iklim ve toprak koşullarına daha iyi uyum sağlayan ürünlerin seçilmesi, üretim deseninin havza su potansiyeline göre düzenlenmesi ve su ayak izi yüksek üretim sistemlerinin dikkatle değerlendirilmesi su tasarrufu açısından önemlidir (Mekonnen ve Hoekstra, 2011; Baydar ve ark., 2026).

Yeraltı sularının aşırı ve denetimsiz kullanımı, uzun vadede tarımsal üretim için önemli riskler doğurmaktadır. Su seviyesinin düşmesi, daha derin kuyular açılmasına ve daha fazla enerji tüketimine neden olurken; bazı bölgelerde su kalitesinin bozulması ve tuzluluk sorunları da ortaya çıkabilmektedir. Bunun yanında, sulama suyunun çok düşük maliyetli veya kontrolsüz kullanılması üreticiyi tasarrufa yönlendirmeyebilir. Bu nedenle teknik iyileştirmelerle birlikte su fiyatlandırması, ölçüm, izleme, denetim ve teşvik politikalarının da su verimliliğini destekleyecek biçimde düzenlenmesi gerekmektedir (Pérez-Blanco ve ark., 2020).

Bilgi eksikliği de su kayıplarının önemli nedenlerinden biridir. Sulama sisteminin kapasitesinin bilinmemesi, damlatıcı debilerinin kontrol edilmemesi, filtre bakımının ihmal edilmesi, toprak neminin izlenmemesi ve bitki su tüketimi hakkında yeterli bilgiye sahip olunmaması, modern sistemlerde dahi fazla veya yetersiz sulamaya yol açabilmektedir. Bu nedenle tarımda su tasarrufu teknik sorunlar, insan faktörü ve doğal koşulların birlikte değerlendirilmesiyle sağlanabilir.

6. Sulama Yönetimi, Modelleme ve Havza Ölçeğinde Planlama

Türkiye’de su yönetimi anlayışı zaman içinde önemli bir değişim geçirmiştir. Geçmişte daha çok suyun kaynaktan alınarak tarım alanlarına ulaştırılmasına odaklanan yaklaşım, günümüzde sulama sistemlerinin işletilmesi, bakım ve onarımı, performans değerlendirmesi, kurumsal yapı, üretici katılımı ve çevresel sürdürülebilirliği de kapsayan daha geniş bir çerçeveye dönüşmüştür. Sulama yönetimi bu bakımdan, tarımsal üretim hedeflerine ulaşmak amacıyla suyun planlı, ölçülebilir ve etkin kullanımı olarak değerlendirilebilir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

Sulama sezonu öncesinde su varlığı, ürün deseni, sulanacak alan, sistem kapasitesi ve iklim beklentileri dikkate alınarak planlama yapılmalıdır. Sezon boyunca su dağıtımı izlenmeli, uygulama miktarları kaydedilmeli, sistem basınçları ve debileri kontrol edilmeli ve gerektiğinde sulama programı güncellenmelidir. Sezon sonunda ise sulama oranı, sulama randımanı, su dağıtım performansı, üretici memnuniyeti, verim ve ekonomik getiri gibi göstergeler değerlendirilmelidir. Bu tür değerlendirmeler, sonraki yıllarda sulama yönetiminin iyileştirilmesi için temel bilgi sağlar.

Havza ölçeğinde planlama, benzer iklim, toprak, topoğrafya ve su kaynağı özelliklerine sahip alanlarda üretimin daha dengeli yürütülmesine katkı sağlamaktadır. Tarım havzası yaklaşımında amaç, yalnız belirli ürünleri desteklemek değil, ürün desenini mevcut su potansiyeli, pazar koşulları, toprak uygunluğu, iklim riski ve ekonomik getiriyi birlikte değerlendirmektir. Bu kapsamda sürdürülebilir arazi kullanımı, doğal kaynakların bugünkü üretim gereksinimlerini karşılarken gelecek nesillerin üretim olanaklarını da korumasını gerektirmektedir.

Modelleme çalışmaları, sulama yönetiminde karar verme süreçlerini güçlendiren önemli araçlardır. Bitki su tüketimi, toprak su dengesi, sulama zamanlaması, ürün verimi, iklim senaryoları ve ekonomik getiriler bir arada değerlendirildiğinde, farklı su düzeyleri altında uygulanabilecek alternatif stratejiler karşılaştırılabilir. Doğrusal programlama, belirli kısıtlar altında en uygun çözümü arayan bir yöntem olarak su ve toprak kaynaklarının optimum kullanımında yararlı sonuçlar verebilmektedir (Allen ve ark., 1998; Pereira ve ark., 2026).

Optimizasyon temelli yaklaşımlar, su kıtlığı yaşanan dönemlerde hangi ürünlerin ne kadar alanda yetiştirileceği, hangi düzeyde sulama yapılacağı ve üreticinin elde edebileceği ekonomik getirinin nasıl değişeceği konusunda ön değerlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu tür modeller, yalnız en yüksek geliri hedefleyen bir araç olarak değil, su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltan ve üretim riskini yönetilebilir kılan bir karar destek unsuru olarak değerlendirilmelidir (Mucan ve ark., 2025).

III. Tarım ve Orman Şurası ile ulusal planlarda vurgulanan temel yaklaşımlar da sulama yönetiminde veri tabanlarının oluşturulması, modern sulama planlama sistemlerinin yaygınlaştırılması, su potansiyeline uygun ürün desenlerinin belirlenmesi ve iklim değişikliğini dikkate alan dinamik planlama yaklaşımlarının geliştirilmesi yönündedir. Bu hedeflerin uygulamaya aktarılabilmesi için kurumlar arası iş birliği, güncel veri altyapısı ve havza bazlı izleme sistemleri önem taşımaktadır.

Mucan ve ark. (2025) tarafından yürütülen çalışmada doğrusal programlama ve ArcGIS teknolojisi bir arada kullanılarak optimizasyon sonuçları mekânsal olarak

haritalandırılmıştır. Çanakkale ili Biga ilçesinde yer alan Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Python programlama dili kullanılarak optimum bitki deseni analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı su seviyelerine bağlı olarak bitkisel üretim desenlerinin kısa sürede belirlenebileceğini ve bu desenlerin parsel ölçeğinde raporlanabileceğini göstermiştir.

Söz konusu değerlendirmede, suyun yeterli olduğu koşullarda yetiştirilebilecek ürünler ve üreticilerin elde edebileceği gelir düzeyleri belirlenmiş; su kapasitesinin azalması durumunda ise daha dayanıklı ürünlerin üretim planına dâhil edildiği görülmüştür. Bu tür çalışmalar, sulama sahalarında mevcut su miktarına göre ürün deseninin önceden planlanabileceğini, su tüketimi ve ekonomik getirinin tahmin edilebileceğini ve olası kuraklık dönemleri için uygulanabilir stratejiler geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır.

7. Modern Sulama Sistemleri ve Su Tasarrufu Yaklaşımları

Modern sulama sistemleri, suyun bitki kök bölgesine daha kontrollü ve daha yüksek uygulama etkinliğiyle verilmesini amaçlayan teknolojik çözümlerden oluşmaktadır. Bu sistemlerde temel hedef, bitkinin gereksinim duyduğu suyu doğru zamanda, doğru miktarda ve uygun dağılım homojenliğiyle sağlamaktır. Ancak modern sulama sistemleri yalnız ekipman değişimi olarak görülmemelidir. Sistem tasarımı, kurulum kalitesi, işletme basıncı, filtrasyon, bakım, toprak nemi izleme ve kullanıcı eğitimi birlikte ele alındığında su tasarrufu sağlanabilir (Dalkılıç ve ark., 2025).



Şekil 2. Geleneksel ve basınçlı sulama uygulamalarına ilişkin örnek görseller.

7.1. Damla Sulama Sistemi

Damla sulama, suyun düşük basınç altında borular ve damlatıcılar aracılığıyla doğrudan bitki kök bölgesine küçük debilerle uygulanmasını sağlayan bir sulama yöntemidir. Bu sistem, yüzey akışını ve derine sızmayı azaltma potansiyeli nedeniyle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde önemli avantajlar sunmaktadır. Aynı zamanda fertigasyon uygulamalarına olanak sağlaması, gübre kullanım etkinliğini artırabilmekte ve yabancı ot gelişimini sınırlayabilmektedir (Chukalla ve ark., 2015; Jägermeyr ve ark., 2015).

Damla sulama sistemlerinin beklenen performansı gösterebilmesi için sistemin hidrolik açıdan uygun tasarlanması ve düzenli işletilmesi gerekir. Tarsus Ovası'ndaki nektarin bahçelerinde yürütülen bir çalışmada, damla sulama sistemlerinde Christiansen eşdağılım katsayısı, dağılım üniformitesi, emisyon üniformitesi ve uygulama etkinliği gibi göstergelerin üretici koşullarında değişkenlik gösterebildiği; düşük performansın fiziksel tıkanma, basınç değişimi ve işletme-bakım eksiklikleriyle ilişkili olabileceği belirtilmiştir (Baydar ve ark., 2025a). Bu bulgu, damla sulama sistemlerinde yalnız sistem kurulmasının değil, sistemin izlenmesi ve bakımının da su tasarrufu açısından belirleyici olduğunu göstermektedir.

7.2. Yağmurlama ve Diğer Basınçlı Sulama Sistemleri

Yağmurlama sulama, suyun basınçlı boru sistemiyle yağmur damlaları hâlinde bitki veya toprak yüzeyine uygulanmasına dayanmaktadır. Uygun tasarım ve işletme koşullarında farklı eğim ve toprak özelliklerine sahip alanlarda kullanılabilmesi önemli bir avantajdır. Bununla birlikte rüzgâr, yüksek sıcaklık, damla çapı, basınç, başlık aralığı ve çalışma süresi su dağılım homojenliğini etkileyebilir. Bu nedenle yağmurlama sistemlerinde sulama zamanının serin ve rüzgârın düşük olduğu dönemlere göre planlanması, buharlaşma ve sürüklenme kayıplarının azaltılması açısından önemlidir.

Basınçlı sulama sistemlerinin ortak başarısı, uygulama randımanı ve dağılım homojenliğinin yüksek tutulmasına bağlıdır. Sistemde basınç dalgalanmaları, tıkanma, yanlış başlık veya damlatıcı seçimi, uygun olmayan lateral uzunluğu ve yetersiz bakım gibi sorunlar görüldüğünde, suyun tarlada eşit dağılması güçleşir. Bu durum bazı bitkilerin fazla, bazılarının ise yetersiz su almasına yol açarak hem verim kaybına hem de su israfına neden olabilir.

7.3. Akıllı Sulama, Toprak Nemi Yönetimi ve Dijital Tarım

Akıllı sulama sistemleri, sensörler, otomasyon birimleri, iletişim teknolojileri ve karar destek yazılımları yardımıyla sulama zamanını ve miktarını daha hassas biçimde belirlemeyi amaçlamaktadır. Toprak nem sensörleri, meteorolojik

veriler, vana kontrol sistemleri ve uzaktan izleme altyapıları kullanılarak insan hatası azaltılabilir, aşırı sulama önlenir ve sulama kararları gerçek zamanlı verilere dayandırılabilir (Baydar ve ark., 2025b; Bwambale ve ark., 2022).

Toprak nemi yönetimi, sulama kararlarının bilimsel temele oturtulmasında en önemli araçlardan biridir. Her bitkinin kök derinliği, su tüketim hızı ve su stresine duyarlılığı farklıdır. Bu nedenle sulama programının yalnız takvime göre değil, kök bölgesindeki kullanılabilir su miktarına göre düzenlenmesi gerekir. Toprak neminin düzenli izlenmesi, gereksiz sulamaların önlenmesine, bitki stresinin erken belirlenmesine ve su kullanım etkinliğinin yükseltilmesine katkı sağlar (Bwambale ve ark., 2022; Lakhiar ve ark., 2024).

Dijital tarım uygulamaları, sulama yönetiminde daha geniş ölçekli veri kullanımını mümkün kılmaktadır. Hava durumu tahminleri, uydu görüntüleri, coğrafi bilgi sistemleri, insansız hava araçları, toprak sensörleri ve otomasyon sistemleri birlikte kullanıldığında tarla içi farklılıklar daha iyi izlenebilir. Böylece suyun yalnız ihtiyaç duyulan alana ve uygun zamanda verilmesi sağlanarak hem su tasarrufu hem de üretim planlaması güçlendirilebilir (Obaideen ve ark., 2022; Lakhiar ve ark., 2024).

7.4. Ürün Seçimi, Yağmur Suyu Hasadı ve Çiftçi Eğitimi

Su tasarrufu yalnız sulama sisteminin değiştirilmesiyle sağlanamaz. Bölgenin iklimi, toprak özellikleri ve su potansiyeline uygun ürün seçimi de en az sulama yöntemi kadar önemlidir. Kuraklığa daha dayanıklı tür ve çeşitlerin tercih edilmesi, ürün rotasyonunun planlanması ve su tüketimi yüksek ürünlerin sınırlı su kaynaklarına sahip havzalarda dikkatle değerlendirilmesi gerekir. Bu yaklaşım, özellikle iklim değişikliği koşullarında üretim riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Yağmur suyu hasadı, yağışla gelen suyun yüzey akışı şeklinde kaybolmadan toplanması, depolanması ve uygun dönemlerde tarımsal amaçla kullanılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde destekleyici sulama amacıyla önemli bir potansiyele sahiptir. Yağmur suyunun çatı, yüzey veya küçük havza sistemlerinden toplanması; filtrelenmesi ve depolanması, yeraltı su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltabilir ve kurak dönemlerde alternatif su kaynağı sağlayabilir (Oweis ve Hachum, 2006).

Çiftçi eğitimi ve bilinçlendirme çalışmaları, tarımsal su tasarrufunun uygulanabilirliğini belirleyen temel unsurlardandır. Modern sulama sistemlerinin doğru kullanılması, üreticinin sistem kapasitesini, bakım gereksinimlerini, bitki su ihtiyacını, toprak nemini ve sulama zamanlamasını bilmesine bağlıdır. Eğitim programları; doğru ürün seçimi, ölçülü sulama, basınç ve debi kontrolü, filtre bakımı,

gübreleme-sulama ilişkisi ve su kalitesinin izlenmesi gibi konuları kapsadığında, teknolojik yatırımların sahadaki karşılığı güçlenmektedir.

Bu nedenle tarımsal sulamada suyun tasarruflu kullanımı, birbirinden bağımsız uygulamaların toplamı olarak değil, çok bileşenli bir yönetim sistemi olarak görülmelidir. Modern sulama teknolojileri, dijital karar destek araçları, uygun ürün deseni, yağmur suyu hasadı, güvenli su kullanımı ve üretici eğitimi birlikte değerlendirildiğinde su verimliliği artırılabilir ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliği güçlendirilebilir.

8. Sonuç

Son yarım yüzyılda nüfus artışı, kentleşme ve gelir düzeyindeki değişimlere bağlı olarak gıda talebi ve beslenme alışkanlıkları önemli ölçüde değişmiştir. Tahıl ağırlıklı beslenmeden daha fazla hayvansal ürün, sebze, meyve, yağ ve şeker tüketimine yönelim, tarımsal üretimde su talebini artırmakta ve su yönetimini daha karmaşık hâle getirmektedir. Bu nedenle suyun tarımda tasarruflu kullanımı, yalnız üretici düzeyinde ekonomik bir gereklilik değil, aynı zamanda gıda güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir zorunluluktur.

Türkiye’de tarımsal sulamada suyun daha etkin kullanılabilmesi için sulama altyapısının modernleştirilmesi, açık kanal kayıplarının azaltılması, basınçlı sistemlerin uygun tasarım ve işletme koşullarıyla yaygınlaştırılması, sulama suyunun ölçülmesi ve hacim esaslı yönetim yaklaşımlarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında, sulama sistemlerinin performansı düzenli olarak değerlendirilmeli; basınç, debi, dağılım homojenliği, uygulama etkinliği ve bakım koşulları izlenmelidir.

Sürdürülebilir su yönetimi; suyun israf edilmeden kullanılması, su kalitesinin korunması, ürün deseninin havza su potansiyeline göre düzenlenmesi, iklim değişikliği risklerinin planlamaya dâhil edilmesi ve üreticilerin karar alma süreçlerine etkin biçimde katılmasıyla mümkün olabilir. Bu kapsamda modelleme, coğrafi bilgi sistemleri, sensör teknolojileri ve dijital tarım uygulamaları, sulama yönetimini daha ölçülebilir ve öngörülebilir hâle getiren önemli araçlardır.

Sonuç olarak, tarımsal sulamada su tasarrufu tek bir yöntem veya teknolojiyle sağlanabilecek sınırlı bir hedef değildir. Etkin bir su tasarrufu yaklaşımı; doğru sulama yöntemi, uygun sulama zamanı, toprak nemi izleme, ürün deseni planlaması, güvenli su kullanımı, sistem bakımının sürekliliği, çiftçi eğitimi ve havza ölçeğinde karar destek mekanizmalarının birlikte uygulanmasını gerektirir. Böyle bir bütüncül yaklaşım, hem mevcut su kaynaklarının korunmasına hem de iklim değişikliği koşullarında tarımsal üretimin sürdürülebilir biçimde devam ettirilmesine katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Aftab, K., Iqbal, S., Khan, M.R., Busquets, R., Noreen, R., Ahmad, N., Kazimi, S.G.T., Karami, A.M., Al Suliman, N.M.S., Ouladsmame, M. 2023. Wastewater-Irrigated Vegetables Are a Significant Source of Heavy Metal Contaminants: Toxicity and Health Risks. *Molecules*, 28(3), 1371. <https://doi.org/10.3390/molecules28031371>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., Küçükyumuk, C., Dalkılıç, B. 2025a. Evaluation of Hydraulic and Irrigation Performances of Drip Systems in Nectarine Orchards (*Prunus persica* var. *nucipersica*) in The Mediterranean Region. *Water*, 17, 758. <https://doi.org/10.3390/w17050758>
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., Dalkılıç, B. 2025b. Damla Sulamada IoT Tabanlı Otomasyon Sistemi. In: Uçak, A.B., Bozkurt Çolak, Y. (Eds.), *Stratejik Tarım ve Yenilikçi Çözümler*, Duvar Yayınları, İzmir, s. 31-42. ISBN: 978-625-5885-76-0.
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., Dalkılıç, B., Çelik, Y. 2026. Water footprint and water productivity dynamics of Mediterranean rice under climate change and water regime scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1872210. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1872210>
- Bwambale, E., Abagale, F.K., Anornu, G.K. 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>
- Çakmak, B. 2002. Kızılırmak havzası sulama birliklerinde sulama sistem performansının değerlendirilmesi. *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2), 130-141.
- Chukalla, A.D., Krol, M.S., Hoekstra, A.Y. 2015. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 4877-4891. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4877-2015>
- Dalkılıç, B., Bozkurt Çolak, Y., Baydar, A. 2025. Kayısı Üretiminde Modern Sulama Stratejileri ve Su Kaynaklarının Etkin Kullanımı. In: Uçak, A.B., Bozkurt Çolak, Y. (Eds.), *Stratejik Tarım ve Yenilikçi Çözümler*, Duvar Yayınları, İzmir, s. 43-64. ISBN: 978-625-5885-76-0.

- Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., Coşkun, M. 2017. Climate change projections for Turkey: Three models and two scenarios. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 1, 22-43. <https://doi.org/10.31807/tjwsm.297183>
- Döll, P., Siebert, S. 2002. Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38(4), 1037. <https://doi.org/10.1029/2001WR000355>
- DSİ. 2024. DSİ 2024 Yılı İdare Faaliyet Raporu. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- FAO. 2021. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture - Systems at breaking point. FAO, Rome. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>
- Fereres, E., Soriano, M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Geerts, S., Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), 1275-1284. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
- Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M. 2012. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232-3237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jägermeyr, J., Gerten, D., Heinke, J., Schaphoff, S., Kummu, M., Lucht, W. 2015. Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3073-3091. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3073-2015>
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

- Khan, M.M., Siddiqi, S.A., Farooque, A.A., Iqbal, Q., Shahid, S.A., Akram, M.T., Rahman, S., Al-Busaidi, W., Khan, I. 2022. Towards Sustainable Application of Wastewater in Agriculture: A Review on Reusability and Risk Assessment. *Agronomy*, 12(6), 1397. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061397>
- Lakhiar, I.A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Wang, B., Bao, R., Syed, T.N., Chauhdary, J.N., Rakibuzzaman, M. 2024. A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*, 14(7), 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
- Madjar, R.M., Vasile Scăețeanu, G., Sandu, M.A. 2024. Nutrient Water Pollution from Unsustainable Patterns of Agricultural Systems, Effects and Measures of Integrated Farming. *Water*, 16(21), 3146. <https://doi.org/10.3390/w16213146>
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M.A., Kijne, J. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528-535. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>
- Mucan, U., Yıldırım, M., Gündoğdu, K.S. 2025. Tarımsal Su Planlamasında CBS Tabanlı Optimum Bitki Deseni Modeli: Cihadiye Kaynarca Göleti Sulaması Örneği. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22(1), 167-175. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.1707671>
- Obaideen, K., Yousef, B.A.A., AlMallahi, M.N., Tan, Y.C., Mahmoud, M., Jaber, H., Ramadan, M. 2022. An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>
- Oweis, T., Hachum, A. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management*, 80(1-3), 57-73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.004>
- Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175-206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00075-6)

- Pereira, L.S., Salman, M., Paredes, P., López-Urrea, R., Allen, R.G. 2026. Innovations in the Revised FAO56 Guidelines for Computing Crop Water Requirements: Data, Calculation Methods, Irrigation, and Climate Change Challenges. *Water*, 18(7), 793. <https://doi.org/10.3390/w18070793>
- Pérez-Blanco, C.D., Hrast-Essenfelder, A., Perry, C. 2020. Irrigation Technology and Water Conservation: A Review of the Theory and Evidence. *Review of Environmental Economics and Policy*, 14(2), 216-239. <https://doi.org/10.1093/reep/reaa004>
- Playán, E., Mateos, L. 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management*, 80(1-3), 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. 2021. Tarımsal Sulama Sektör Politika Belgesi 2021-2025. Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Trotta, V., Baaloudj, O., Brienza, M. 2024. Risks associated with wastewater reuse in agriculture: investigating the effects of contaminants in soil, plants, and insects. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1358842. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1358842>

6. Bölüm

Sulama Otomasyonu: Referans Evapotranspirasyon Tabanlı Nar Sulama Programının Gerçekleştirme Örneği

Cafer GENÇOĞLAN¹, Serpil GENÇOĞLAN¹

Özet: Bu çalışmada, Nar sulama programını ve damla sulama sistemindeki tüm elemanları kontrol eden bir sulama otomasyon sistemi geliştirilmiştir. Bu sulama otomasyon sisteminde, ETH tabanlı programlanabilir lojik kontrol (PLC) kullanılmıştır. Günlük referans evapotranspirasyonu (ET_o), sıcaklık, nem, rüzgar hızı, solar radyasyon ve yağış gibi iklim parametrelerinden hesaplayan; bu değerleri SD karta kaydeden; günlük ET_o toplayan; günlük ET_o-Peff (etkili yağış) farkı toplamı 35 mm veya üzerine çıktığında bu değer ile parsel alanını, bitki katsayısını ve ıslatma yüzdesini çarparak parsellere uygulanacak su hacmini bulan; su deposundaki su seviyesi 100 cm'ye düştüğünde tekrar 145 cm'ye tekrar dolduran, günlük ET_o-P farkı toplamı 35 mm ve üzerine çıktığında 3 sulama parsellerinden sulamadan önce toprak nemini ölçen, bu değerleri SD karta kaydeden, ana boru başındaki 1 ve parsel başlarındaki 3 adet selenoid vanayı açan, motopompu çalıştıran ve 3 adet dijital su sayacının verilerini alan; gübre uygulama zamanı geldiğinde gübre tankı giriş-çıkış selenoid vanalarını açan ve oransal vanayı %50 kapatan, gübreleme tamamlandığında gübre tankı giriş-çıkış selenoid vanalarını kapatan ve oransal vanayı tamamen açan; dijital su sayacı hacimleri parsellere uygulanacak su hacimlerine eşit olduğunda motopompu, ana boru başındaki 1 ve parsel başlarındaki 3 adet selenoid vanayı kapatan nar sulama otomasyon projesi hazırlanmıştır. Sulama otomasyon panosu, CODESYS-ST dili sulama otomasyon sisteminin kodu yazılmıştır. Sistemin internete bağlanması için statik IP'li win-router planlanmıştır. Sulama otomasyon yazılımı POU's altında 10 adet alt koddan oluşmuştur. Bunlar iklim veri okuması, saatlik sıcaklık, nem, alan1 sulama, alan2 sulama, alan3 sulama, fertigasyon, ET_o_hesapla, sd_kart_veri_yaz, su tank dolum ve toprak nem ölçümü'dür.

Sulama parsellerinin toprak nem içeriğini, deposundaki su seviyesini, selenoid vanaların, motopompun ve su sayaçlarının durumunu gösteren bir görsel ara yüz

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, gencoglan@ksu.edu.tr

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, sgencoglan@ksu.edu.tr

(visulation) hazırlanmıştır. Anılan ara yüz win-router aracığı ile görüntülenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sulama, Nar, Otomasyon, Evapotranspirasyon, Sulama programı

Giriş

Türkiye sahip olduğu toprak ve su kaynakları ile çok değişik iklim koşulları yönünden dünyada tarımsal potansiyeli yüksek olan sayılı ülkeler arasında bulunmaktadır. Ülkemizde işlenen arazi 24 milyon hektardır. Yapılan etütlere göre, mevcut su potansiyeli ile teknik ve ekonomik olarak sulanabilecek arazi miktarı 8.5 milyon hektar olarak hesaplanmıştır (DSİ, 2025). Moutonnet ve Heng (2002) yaptıkları çalışmada Akdeniz ülkeleri için suyun kısıntılı bir kaynak olduğunu, kişi başına düşen toplam su miktarının ise yaklaşık 1700 m³/kişi/yıl olduğunu bildirmişlerdir. Ancak, çoğu Batı Asya ülkelerinde bu rakam 500 m³/kişi/yıl'dan daha azdır. Bu durum gelecekte artan nüfus için olumsuz bir durumdur. Tarım ise suyu en fazla kullanan veya tüketen sektördür. Bu oran yaklaşık %70 civarındadır. Ülkemizin nüfusu 86 milyona ulaşmış bulunmaktadır. Halbuki tarım arazilerinin daha fazla artırma olanağı bulunmamaktadır. Bu durumda artan nüfusumuzun beslenmesi, sanayimize hammadde sağlaması ve dış ödemeler dengesinde katkıda bulunması için tarımsal üretimin artırılması gerekmektedir. Bu husus, ülke çapında iyi bir üretim planlaması ve günün modern tekniklerinin uygulanmasıyla sağlanabilir.

Sulama otomasyon sistemi, sulama yöntemlerine göre sulama programının geliştirilmesinde ve uygulanmasında kullanılmaktadır. Sulama otomasyon sistemi, sulama programı ile birlikte kullanıldığında, daha hassas olmakta, su ve gübre kullanım etkinliğini arttırmakta, işçilik ve enerji giderlerini azaltmakta, verimi ve kaliteyi arttırmakta, insan hatasını en aza indirmekte, sık ve düşük hacimli sulama yapma imkanı sağlamaktadır.

Sulama zamanının belirlenmesinde toprağa, bitkiye ve iklime dayalı çok sayıda yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, bitki ve toprak belirteçleri ile su bütçesi tekniğinden oluşmaktadır. Su bütçesine dayalı yöntemlerinden birisi de Referans Evapotranspirasyon yöntemidir. Referans Evapotranspirasyon (ET_o)'a dayalı sulama programı, tarımda suyun etkin ve sürdürülebilir kullanımı, verimli üretim için kritik bir faktördür. Bu bağlamda, ET_o dayalı sulama programları, bitkilerin su ihtiyacını doğru şekilde belirleyerek optimal sulama uygulamalarının yapılmasını sağlar. ET_o hesaplamaları, hava koşullarına bağlı olarak bitkilerin su kaybını belirler. Bu sayede gereğinden fazla veya yetersiz sulama önlenerek su kaynakları daha verim kullanılır. Bitkilerin ihtiyaç duyduğu su miktarının tam olarak karşılanması, sağlıklı gelişimlerini destekler. Doğru sulama uygulamaları

ile ürün kalitesi ve verimi artırılırken hastalık ve stres faktörleri azaltılır. ETo'ya dayalı sulama programları, gereksiz sulama uygulamalarının önüne geçerek enerji ve sulama ile ilgili diğer girdilerde tasarruf sağlar. Böylece üretim maliyetleri düşerken çevresel sürdürülebilirlik sağlanır. Aşırı sulama, toprak erozyonu, tuzlanma ve yer altı sularının kirlenmesi gibi çevresel sorunlara yol açabilir. ETo temelli sulama, bu riskleri minimize ederek çevre dostu tarımsal uygulamalara katkı sunar. ETo hesaplamaları, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve solar radyasyon gibi iklim faktörlerine dayalı olduğu için sulama programları mevsimsel değişimlere uyum sağlayarak su kullanımını optimize eder.

Ülkemizde mevcut sulanan 5.5 milyon hektar arazide sulama otomasyonu kullanımı yaygınlaştırılarak su, gübre, işçilik ve enerji tasarrufu sağlanabilir. Diğer yandan ülkemizde kendi sulama otomasyonumuzu kurma, oluşturulan bu otomasyon ile yapılacak sulama programını takip ettirme, sulama otomasyonu içindeki motopomp, dijital su saati ve toprak nem algılayıcıları gibi elemanları denetleme, uzaktan bir bilgisayar aracılığı ile bitkiye verilen ve bitkinin tükettiği suyun bilinmesi sulama teknolojisine katkı sağlayabilir. Bunlara ek olarak nar bitkisinden en uygun düzeyde verim alınarak kalitesi geliştirilebilir. Tüm bunlar ülke ekonomisine, bilimine ve teknolojisine katkı sağlayabilir.

Çiftlik seviyesinde sulama programı, genellikle yetiştirici deneyimlerine veya toprak su dengesi (iklim temelli yöntem) belirlenmesine dayanmaktadır. Buna alternatif yaklaşım, toprak suyunun ölçülmesidir. Bitki sulamasında ucuz ve pratik aletlere gereksinim duyulur (Pardossi vd. 2009). Sulama otomasyonunun amacı su stresinin bitki üzerindeki olumsuz etkisini önlemek, su tasarrufu sağlamak ve bitki suya ihtiyaç duyar duymaz su vermektir. Otomatik sulama sistemleri geleneksel sulama sistemleri ile karşılaştırıldığında verimi arttırmakta, su, enerji ve işçilik tasarrufu sağlamaktadır (Mulas, 1986). Bu sulama sistemlerin daha hassas olması, suyu daha randımanlı kullanması ve insan hatasını azaltması gibi birçok üstün yanları vardır (Castanon, 1992). Yabancı ülkelerde Bisconer (2008), damla sulama otomasyon teknolojisi son 30-40 yıldan beri kullanıldığını ve günümüzde damla sulama otomasyonu daha güçlü ve ucuz olduğunu ifade etmiştir.

Otomatik sulama terimi, herhangi bir sulama sisteminin bir kişinin doğrudan müdahalesiyle değil de bir cihaz tarafından kontrol edilmesine denir. Otomatik sulama sistemi, sulama programı bir kontrol sistemine girilerek bu sistemin sulamayı başlatması anlamına gelmektedir. Genellikle 2 otomatik sulama sistemi vardır: 1) açık devre sulama sistemi ve 2) kapalı devre sistemidir. Açık devre sistemi sulamayı zamana bağlı olarak başlatır ve durdurur. Açık devre sisteminde sulama zamanına ve verilecek su miktarına sulayıcı karar verir. İlk otomatik sulama sistemleri, zaman rölelerinden oluşturulmuş ve selenoid vanalar kontrol

edilmiştir. Piyasada ticari olarak farklı birçok özellikte ve fiyatta modelleri vardır (Zazueta ve Ark. 2002). Kurt ve Ark. (2022), sulama ve gübrelemeyi mobil uygulama üzerinden 60 m² bir alanda uygulama yapmışlardır. Şahin (2024), tarımsal sulama konusunda yapay zekâ (AI) yönetimi, derin öğrenme (DL) teknikleri ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarından faydalanabileceğini bildirmiştir. Alpay (2021), Dual Tone Multi Frequency (DTMF) kontrollü sulama sistemi geliştirilmiştir. Kapalı devre otomatik sulama sistemleri, sisteme geri besleyen algılayıcılara sahiptirler, karar verirler ve kararlarını sulama sisteminde uygularlar. Sulayıcı genel stratejiyi belirler ve kontrol sistemi ne kadar suyu ne zaman uygulayacağına karar verir. Programlanabilir kontrolörün ilk örnekleri karışık ve epeyce büyüktür, ancak önemli göze çarpan ilerleme, entegre devrelerin iyileştirilmiş olmasıdır. Bu entegre devreler otomasyon yeteneğini arttırmış ve fiyatını düşürmüştür. Programlanabilir Lojik Kontroller (PLC) ve endüstriyel mikrobilgisayarlar ilk kontrol sistemlerinde yerini almıştır (Sne, 2006).

Bu çalışmanın amacı, programlanabilir lojik kontroller (PLC kullanarak Nar bahçesi için sulama otomasyon sistemi geliştirmektir. Sulama otomasyon yazılımı POU's altında 10 adet alt programdan oluşmuştur. Bunlar iklim VeriOkumasi(), SaatlikSicalikNemAl(), Alan1Sulama(), Alan2Sulama(), Alan3Sulama(), Fertigasyon(), ETo_Hesapla(), sd_kart_veri_yaz(), SuTankDolum() ve ToprakNemOlcumu()'dur. Sulama otomasyon sistemi, günlük referans evapotranspirasyonu (ET_o), iklim parametrelerinden tahmin etmekte; parsellere verilecek su miktarını hesaplatmakta; damla sulama kontrol ünitesini kontrol ettirmekte; toprak nemi ölçtürmekte; günlük hesaplanan referans evapotranspirasyon (ET_o) – etkili yağış miktarı (P) 35 mm ve üzerine çıktığında nar parsellerini sulamaktadır.

Materyal Metot

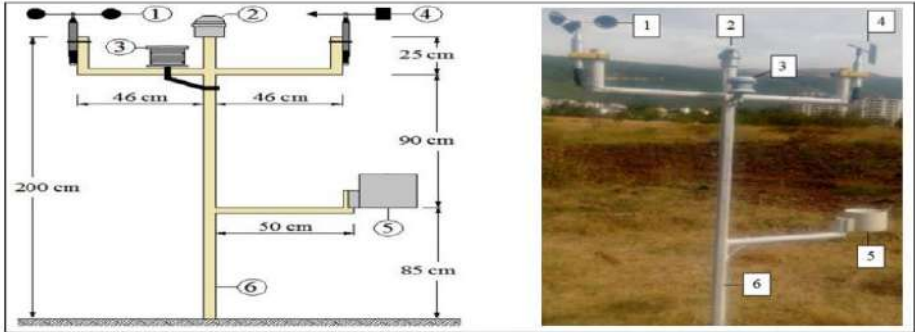
1. Gereksinim Analizi

Bu projenin hazırlanması ve tamamlanabilmesi için gereksinin analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda gereksinim 4 grup altında toplanmıştır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- 1- İklim istasyonu gereksinimleri**
- 2- Sulama sistemi gereksinimleri**
- 3- Otomasyon sistemi donanım gereksinimleri**
- 4- Yazılım gereksinimleri**

1.1-İklim İstasyonu Gereksinimleri

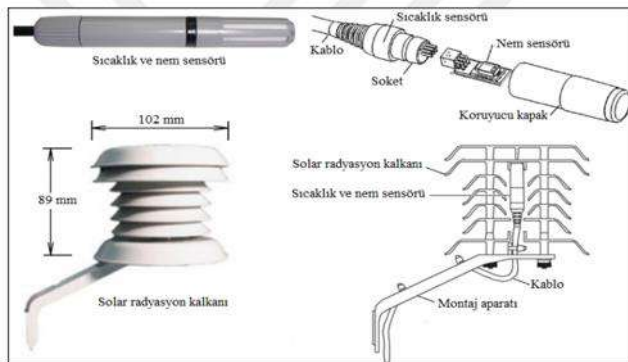
İklim istasyonunda 5 adet sensöre gereksinim vardır. Bunlar sıcaklık, nem, solar radyasyon (piranometre), rüzgar hızı (ananometre) ve yağış ölçer (puliyometre) sensörleridir. Bu sensörleri üzerine bağlamak için bir demir direğe ve sensörleri PLC'ye bağlamak için kabloya gereksinim vardır (Şekil 1).



Şekil 1. İklim istasyonu

Sıcaklık ve Nem Sensörü

Besleme gerilimi 24 VDC, analog çıkışlar 4-20 mA veya 0-10 V, sıcaklık ölçme aralığı -40°C ...80°C, oransal nem ölçme aralığı 0 - %100, çözünürlük sıcaklık için 0.1°C, oransal nem için 0.1 Rh, Doğruluk Bağlı Nem +/- 1.8%, Sıcaklık +/- 0.3°C. Bunlara ek olarak role çıkışlı modullerde RS485 MODBUS RTU haberleşme protokolü vardır (Şekil 2).

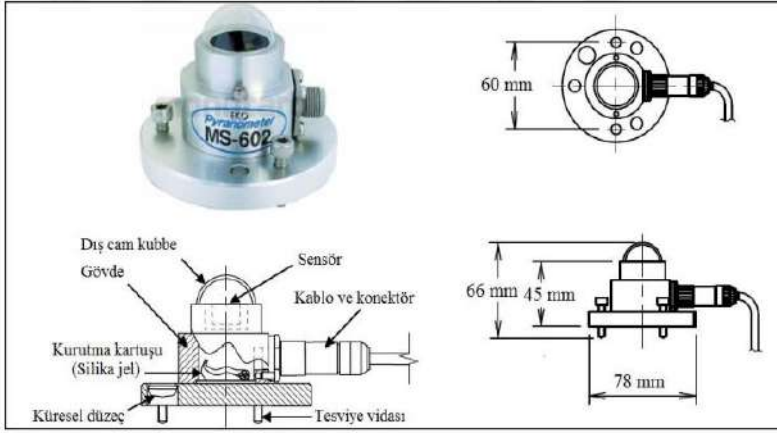


Şekil 2. İklim istasyonu

Solar Radyasyon Sensörü

Solar radyasyon sensörü piranometre (MS 80S pyranometer) olarak adlandırılmaktadır. Dalga Boyu Aralığı 285 ila 3000 nm, ısıtım aralığı 0 -4000

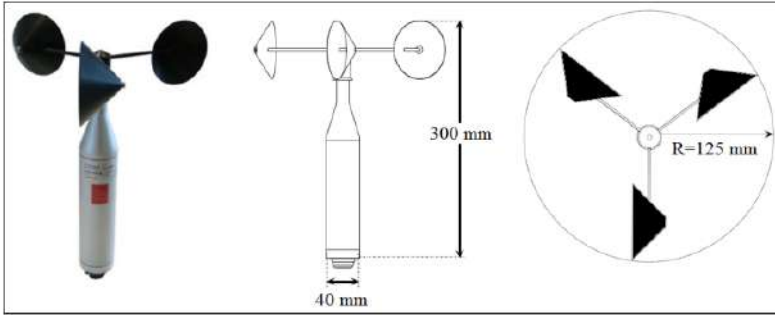
W/m², sinyal çıkışı Modbus 485 RTU / 4-20mA / 0-1V, eğim açısı $\pm 1^\circ$, çalışma sıcaklığı -40 ila 80°C, besleme gerilimi 5 - 30 VDC (Şekil 3).



Şekil 3. Solar radyasyon sensörü (piranometre)

Rüzgar Hızı Sensörü (Ananometre)

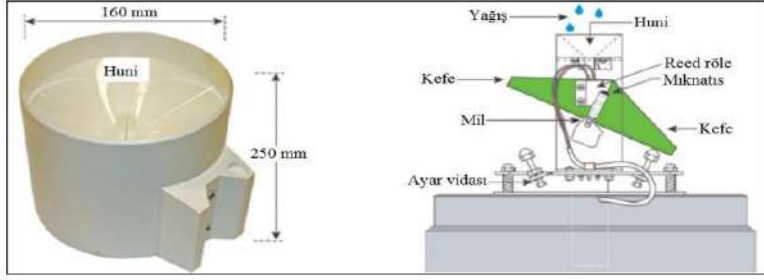
Çıkış sinyali 0 ... 10 VDC, çalışma voltajı 12 ... 36 VDC, Ölçüm Aralığı: 0.5 m/s ... 50 m/s. Ölçüm ≤ 0.5 m/s hassasiyet: ± 0.5 m/s (< 5 m/s) ölçüm aralığının $\pm \%3$ 'ü (≥ 5 m/s) (Şekil 4)



Şekil 4. Rüzgar hızı ölçer sensörü (Ananometre)

Yağış Ölçer (Plüviyometre)

Boyutu 18 cm çapında, 30 cm yüksekliğinde, devirmeli kova yağmur ölçer ağız alanı 200 cm², çıkış Reed Role (N.O.), 24VAC/DC 500mA, çalışma sıcaklığı -20 C ila +50 C (Şekil 5)

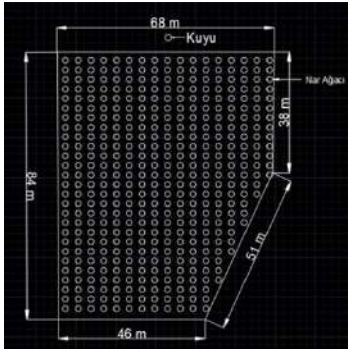


Şekil 5. Yağış Ölçer (Plüviyometre)

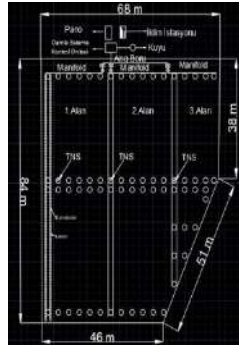
1.2. Sulama Sistemi Gereksinimleri

Proje, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Ziraat Fakültesi 3x4 m düzeninde, dikilen, nar bahçesi için hazırlanmıştır. Alanı yaklaşık 5 dekadır. Nar bahçesinin kuzey kenarın 30 m derinliğinde bir sulama amaçlı derin kuyu bulunmaktadır

Sulama suyu bu kuyudan alınmıştır. Proje alanın denizden ortalama yüksekliği 501 m olup $37^{\circ} 35' N$, $36^{\circ} 49' E$ enlem ve boylamlarında yer almaktadır. Nar Bahçesinin parsel boyutları ve dikim düzeni Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Nar bahçesi kuzey-güney yönünde eğimlidir. Uzun kenarı 84 m ve kısa kenarı ise 68 m uzunluğundadır. Bahçede 12 adet 84 m uzunluğunda nar sırası ve 5 adet kısa nar sıraları mevcuttur. Bahçede toplam 415 nar ağacı bulunmaktadır.



Şekil 6. Nar Bahçesinin genel görünümü



Şekil 7. Nar bahçesinde iklim istasyonu, otomasyon panosu, derin kuyu ve damla sulama kontrol ünitesinin ve damla sulama sistemi konumlandırılması

☒: Selenoid Vana
⊕: Su Sayacı
TNS: Toprak Nem Sensörü
Damaltıcı Debisi $q=4 \text{ L/sn}$
Lateral çapı 16 mm
Manifold çapı 32 mm
Ana boru çapı 63 mm

Nar Bahçesinde İklim İstasyonu, Otomasyon Panosu, Derin Kuyu ve Damla Sulama Kontrol Ünitesinin ve Damla Sulama Sistemi konumlandırılmıştır.

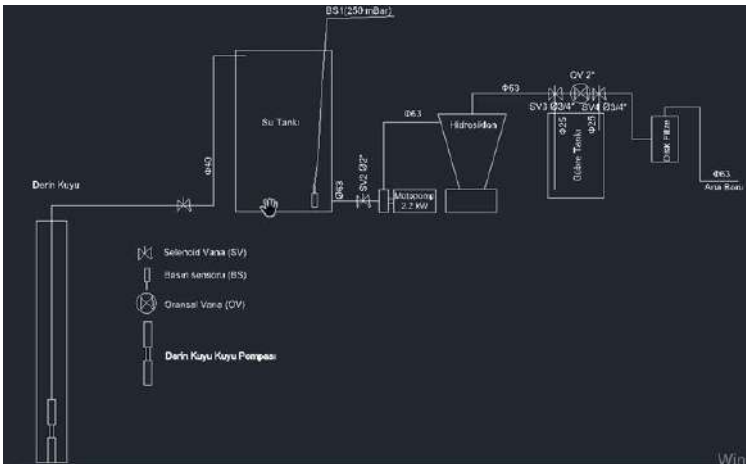
Nar bahçesi 3 alana bölünerek ve her biri ayrı ayrı damla sulama yöntemiyle sulanması planlanmıştır. Birin ve ikinci alanda nar ağacı sayısı 162 ve üçüncü alanda ise 91'dir. Birinci, ikinci ve üçüncü alanlarının sulamasını kontrol etmek için bir selenoid vana ve bir su sayacı yerleştirilmiştir. Ayrıca bu üç alanın toprak nemini kontrol etmek için 3 adet nem sensörü toprak profilinin 15 cm'lik derinliğine ve nar gövdesinde 45 cm uzağa yerleştirilmiştir.

Nar bahçesi damla sulama yöntemiyle sulanmıştır. Bu amaçla 1 atm'lik işletme basıncında damlatıcı debisi 4 L/h (inline), aralığı 71 cm olan iki adet Ø16 lateral, nar bitkisi gövdesinin sağına ve soluna 35.5 cm uzaklığa toprak yüzeyine serilmiştir. Böylece yarı kurak bölgelerde minimum ıslatılan alan oranı olan %30'un üzerindeki bir alanın ıslatılması hesaplanmıştır.

Damla sulama kontrol ünitesinde su deposu, motopomp, hidrosiklon, kum-çakıl filtre, gübre tankı ve disk filtre vardır (Şekil 8). Gübre tankına 2 adet selenoid ve bir adet oransal vana yerleştirilmiştir. Sulama alanlarında her iki laterallerin başına dijital su saati ve selenoid vana sonuna da kör tapalar eklenmiştir. Damla sulama kontrol ünitesi ile lateraller arasındaki ana boru ve manifold boru, Ø32'lik PE'dir.

Sulama Kontrol Ünitesinin ve Sistemin Konumlanması

Latetaller, manifold boruya ve manifold boru da ana boruya bağlanmıştır. Damla sulama sistemine basıncı, 2.2 kW'lık motopompla sağlamıştır. Motopompu da Ø32'lik PE bir boru ile de 7 tonluk su tankına bağlanmıştır. Su tankı da suyu mevcut derin kuyudan almıştır. Derin kuyuda su pompalamak için 2.2 kW'lık motopom kullanılmıştır Su tankı içindeki su seviyesini kontrol etmek için de su içinde çalışan 250 mBar'lık basınç transduseri kullanılmıştır. (Şekil 8).



Şekil 8. Projede kullanılacak damla sulama kontrol birimi

Projede sulama programı, referans evapotranspirasyon (ET_o) yöntemine göre hazırlanmıştır. Bu amaçla, referans evapotranspirasyonu hesaplamasında kullanılan sıcaklık, nem, rüzgar hızı, solar radyasyon nar bahçesi yakınına yerleştirildiği varsayılan bir iklim istasyonundan ölçülmüştür. Bunlara ek olarak bu iklim istasyonunda yağışta ölçülmüştür. Nar gelişimi 4 döneme ayrılmıştır. Sulamaya Nisan ayının başında başlanmıştır. I. Dönem uzunluğu=30 gün, II. Dönem uzunluğu=45 III. Dönem uzunluğu=110 ve IV. Dönem uzunluğu=35 gün olarak alınmıştır. Bunlara göre vejetasyon süresi 220 gündür. Narın I. ve II. gelişme dönemleri birleştirilmiştir. I. ve II dönem için $kc_1=0.52$, III. dönem için $kc_3=0.93$ ve IV. dönem için $kc_4=0.5$ olarak alınmıştır. Narın I ve II gelişme dönemi uzunluğu 75 (Nisan 1 başlayacak ve Haziran ayının 14 sona erecektir) III. Dönem 110 gün (Haziran 14 başlayacak ve Eylül ayının 30 da sona erecektir), IV dönem 35 gündür (Ekim başında başlayacak ve Kasım 5'te sona erecektir). Günlük hesaplanan ET_o-P toplamı yaklaşık 35 mm ve üzerinde olduğunda nar parselleri sulanmıştır.

Sulama Suyunun Hesaplanma Gereksinimi

Sulama programı, referans evapotranspirasyon (ET_o) yöntemine değerleri kullanılarak hazırlanmıştır. Sulama suyu miktarı ise aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I=ET_o*kc*A/R_y$$

Burada I:sulama suyu miktarı (L), ET_o: referans evapotranspirasyona (mm), kc: bitki katsayısı (I. ve II dönem için $kc_1=0.52$, III. dönem için $kc_3=0.93$ ve IV. dönem için $kc_4=0.5$ olarak alınmıştır). A:sulanan alan (m²). R_y: sulama randımanı %85 olarak alınmıştır.

Sulanan Alan ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$A=L*W$$

Burada L:Sulanacak alan uzunluğu (m) ve W:taç genişliği (m)'dir. Çünkü nar ağacının ortalama taç genişliği 1.5 m'dir. Sulanacak alanın uzunluğu aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$L=N*SÜA$$

Burada N: Bir defada sulanacak nar ağacı sayısı (adet), SÜA: Nar ağaçlarının sıra üstü aralığı 3 metredir. Birinci ve ikinci alanda nar ağacı sayısı 162 ve üçüncü

alandan ise 91'dir. Buna göre 1., 2. ve 3. alan sulanacak alan uzunluğu sırasıyla 486, 486 ve 273 metredir. 1., 2. ve 3. sulama alanın yüzeyi sırasıyla 729, 729 ve 409.5 m² dir.

Referans Evapotranspirasyonun (ET_o) Hesaplanma Gereksinimi

ET_o hesabında FAO 56 Penman Monteith eşitliği kullanılmıştır. İklim istasyonunun sıcaklık ve oransal nem değerlerini bir günlük (24 saat) periyotlar halinde her saat başı ölçerek gün sonunda diziye ve SD karta kaydetmesi öngörülmüştür. Ortalama hava sıcaklığı (T) ve oransal nem (RH) değerleri gün içerisinde ölçülen maksimum ve minimum değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Solar radyasyon (RS) ve rüzgar hızı (U₂) bir günlük (24 saat) periyotlar boyunca her saniye yığışımı olarak ölçülerek toplanmış ve bir günlük sürenin saniye cinsinden karşılığına (86400) bölünerek ortalama değerleri belirlenmiştir. Bitki yüzeyine etki eden günlük ortalama net radyasyonun (R_n) hesaplanmasında temel veri olarak RS kullanılmıştır. Pyranometre ile Watt/m²/gün güç birimi cinsinden ölçülen solar radyasyonu, MJ/m²/gün cinsinden güneş enerjisine dönüştürmek amacıyla 0.0864 katsayısı kullanılmıştır (1 Watt/m²/gün=0.0864 MJ/m²/gün).

Ucak ve Arslan (2021), bitki su tüketiminin doğrudan ölçülebildiğini veya iklim verileri kullanılarak tahmin edilebildiğini; uygulamada ise bitki su tüketimi değerlerinin çoğunlukla iklim verilerine dayalı tahmin eşitlikleriyle belirlendiğini ifade etmiştir. Nar ağacına uygulanan sulama suyu miktarının belirlenmesinde günlük ET_o miktarlarına bağlı olarak hesaplanan günlük evapotranspirasyon (ET_o) miktarları kullanılmıştır. Günlük ET miktarlarının belirlenmesinde FAO 56 Penman Monteith eşitliği kullanılmıştır.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

PLC, iklim istasyonundaki sensörlere günlük hava sıcaklığı, oransal nem, solar radyasyon ve rüzgâr hızı iklim parametrelerini ölçtürerek kaydetmiştir. Daha sonra bu parametreleri kullanarak FAO 56 Penman Monteith eşitliğine göre günlük referans evapotranspirasyon miktarlarını hesaplamıştır. Sıcaklık ve nem parametrelerini bir günlük süreler boyunca her saat başı ölçerek kaydetmiş ve gün sonunda büyükten küçüğe doğru sıralayarak maksimum ve minimum değerlerini, bu değerlerin aritmetik ortalamalarını alarak da günlük ortalama sıcaklık ve nem değerlerini belirlemiştir.

PLC, hava sıcaklığı ve oransal nem değerlerini kullanarak sırasıyla; doymuş buhar basıncını, gerçek buhar basıncını ve doymuş buhar basıncı eğrisinin eğimini hesaplamıştır. Ayrıca rakıma bağlı olarak atmosferik basıncı ve psikometrik sabite belirlemiştir.

PLC, solar radyasyon ve rüzgâr hızını bir günlük süreler boyunca her yarım saatte bir ölçerek toplamıştır. Gün sonunda toplam değerlerin aritmetik ortalamalarını alarak, günlük ortalama solar radyasyon ve rüzgâr hızını aşağıda verilen eşitliklere göre belirlemiştir.

$$R_s = (0.0864 \sum R_s) / 48$$
$$U_2 = \sum U_2 / 48$$

Bu çalışma kapsamında solar radyasyonun ölçülmesinde kullanılan sensör (Piranometre) Watt m⁻² güç birimi cinsinden ölçüm yapmaktadır. FAO 56 Penman Monteith eşitliğinde ise solar radyasyon MJ m⁻² gün⁻¹ enerji birimi cinsinden kullanılmaktadır. Bu nedenle, Watt m⁻² güç birimi cinsinden ölçülen toplam solar radyasyon miktarı 0.0864 katsayısı ile çarpılarak MJ m⁻² gün⁻¹ enerji birimine çevrilmiştir (1 Watt m⁻² = 0.0864 MJ m⁻² gün⁻¹). PLC, ortalama solar radyasyon miktarına bağlı olarak güneşten gelen net kısa dalga boylu radyasyonu hesaplamıştır.

FAO 56 Penman Monteith eşitliğinde referans bitki olarak dikkate alınan çim bitkisi için yansıtma-albedo katsayısı 0.23 alınmıştır.

Günlük toprak ısı akısı değişiminin (G) çok düşük düzeylerde gerçekleştiğini ve hesaplamalarda ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda G=0 alınmıştır. Referans evapotranspirasyon miktarı hesaplanan her günün tarihini önce Julian tarihine dönüştürülmüş, daha sonra Julian tarihine bağlı olarak sırasıyla dünya-güneş ters oransal uzaklığı ve solar dikliği hesaplamıştır. FAO 56 Penman Monteith eşitliği ile yapılan referans evapotranspirasyon hesaplamalarında enlem değeri radyan cinsinden kullanılmaktadır. Dolayısıyla, enlem değeri (derece° dakika') önce dereceye ve daha sonra radyana çevrilmiştir. PLC enlem değerine bağlı olarak, sırasıyla güneş batım saatindeki açıyı ve atmosferin dış yüzüne ulaşan radyasyonu hesaplamıştır

Yeryüzüne ulaşan kısa dalga boylu radyasyon olarak tanımlanan solar radyasyon miktarının %23'ü çim yüzeyden geri yansıtılmaktadır ($\alpha.R_s = 0.23R_s$). Geriye kalan %77'lik bölümü ise net kısa dalga boylu radyasyon (R_{ns}) olarak çim yüzeye etki etmekte ve toprak tarafından tutulmaktadır [$(1-\alpha).R_s = 0.77R_s$]. Toprakta tutulan bu radyasyonun bir bölümü havanın sıcaklığına, buhar basıncına ve açık (bulutsuz) gökyüzü radyasyonuna bağlı olarak atmosfere yayılmaktadır. Dünyadan giden net uzun dalga boylu radyasyon olarak adlandırılan bu

radasyon miktarının belirlenmesinde kullanılmıştır. FAO 56 Penman Monteith eşitliği ile yapılan referans evapotranspirasyon hesaplamalarında toprakta tutulan ve topraktan atmosfere yayılan radyasyon miktarları arasındaki farka eşit olan net solar radyasyon miktarı dikkate alınmaktadır. Bitki yüzeyine etki eden bu net radyasyonu hesaplanmıştır.

1.3. Otomasyon Sistemi Donanım Gereksinimleri

Gereksinim Duyulan Uç Elemanlar

Nar bahçesinin sulamasında kullanılacak otomasyon sistemini projelenebilmek için gereksinim duyulan uç elemanların listesi Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1. PLC sisteminin değişkenleri (Giriş ve Çıkışlar) ve kontrol büyüklükleri

Sistem Değişkenleri	Giriş		Çıkış		Kontrol Büyüklükleri
	Dijital (DI)	Analog (AI)	Dijital (DO)	Analog (AO)	
Sıcaklı Sensörü		1			4-20 mA
Nem Sensörü		1			4-20 mA
Rüzgar Hızı Sensörü (Ananometre)		1			4-20 mA
Solar Radyasyon Sensörü		1			4-20 mA
Yağış Ölçer (plüviyometre)	1				24 VDC
Dijital su sayacı	3				24 VDC
Deneme parsellerindeki selenoid vanalar (3 adet 1/2")			3		24 VDC
Kontrol Ünitesinde selenoid vanalar (2 adet 2" ve 1/2")			4		24 VDC
Oransal vana(1 adet 2")				1	0-10 V 24 VAC
Su deposu için 1 adet 200 mB'lık basınç sensörü		1			4-20 mA
Toprak nemi ölçümü için 3 adet toprak nem algılayıcısı		3			4-20 mA
İnvertör (2 adet)			2		220 VAC
Toplam	4	8	9	1	

Sulama otomasyonunda ETo kullanılarak oluşturulan sulama programlın programlanabilir lojik kontrollere (PLC) tarafından kontrol edilmesi amacıyla dijital ve analog giriş ile çıkış sayıları belirlenmiştir. Belirlen dijital-analog giriş-çıkış sayıları ve bunların kontrol büyüklükleri Çizelge 1'de verilmiştir. PLC, tüm toprak nem ve basınç algılayıcılarını, selenoid vanaları, dijital su saatlerini,

motopompu, derin kuyu motopompu, gübre ve su tankını kontrol etmiştir. Çizelge 1’den görüldüğü gibi toplam 4 adet dijital giriş (DI), 10 adet dijital çıkış, 9 adet analog giriş (AI) ve 1 adet analog çıkış vardır. Son sütununda ise uç elemanlarının kontrol büyüklükleri verilmiştir. Kontrol büyüklükleri 220 VAC, 24 VDC, 24 VAC, 0-10 V ve 4-20 mA değerlerine sahiptirler. Bu giriş ve çıkış donanımını karşılayacak PLC ve modülleri seçilmiştir. Oluşturulan sulama programlarının programlanabilir lojik kontrollere (PLC) tarafından kontrol edilmesi amacıyla pano projesi, Çizelge 1’de verilen dijital ve analog giriş-çıkışlar kullanılarak sulama otomasyon pano projesi çizilmiştir. Anılan pano projesi kullanarak pano montajı yapılmıştır. Pano projesi kullanarak CODESYS-ST dilinde sulama otomasyon kodu yazılmıştır. PLC tarafından belirlenen tarih, günlük ETo değerleri, toprak nem içeriği ve sulama suyu miktarı bilgileri modem üzerinden visualisation sayfasına erişilebilmektedir. Kodlar PLC’ye yüklenmiş ve sulama otomasyon sistemi çalıştırılmıştır.

1.4. Yazılım Gereksinimi

Nar sulama otomasyon sistemin kodlarını yazabilmek için Automation Builder yazılımına gereksinim vardır. Bu program ABB firmasının web sitesinden ücretsiz olan sürümü indirilerek bilgisayara yüklenmiştir. Sulama otomasyon sisteminin kodları, Automation Builder içinde yer alan CODESYS-ST programlama dilinde yazılmıştır.

Sulama otomasyon sisteminde her bir uç elemanların kontrol edilebilmesi için bu uç elemanları kontrol eden rölelerin, invertörlerin ve analog giriş-çıkışların değişken tanımlanması gerekir. Rölelerin, dijital girişlerin ve analog giriş-çıkışların değişken tanımlamaları sırasıyla Çizelge 2, Çizelge 3 ve Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 2. Role çıkışlarının değişken tanımlamaları

Kullanılan Yer	Röle Değişken Tanımı	Üç Tanımı
Derin kuyun pompası (2.2 kW)	R1(R1_KP)	İnvertor-1 (2.2 kW)
Su Tankı Girişi	R2(R2_STG)	Selenoid Vana-1(SV1, 1 1/4")
Su Tankı Çıkışı	R3(R3_STC)	SV2 (2")
Pompa (2.2. kW)	R4(R4_SP)	İnvertor-2 (2.2 kW)
Gübre tankı girişi	R5(R5_GTG)	SV3 (3/4")
Gübre tankı Çıkışı	R6(R6_GTC)	SV4 (3/4")
Alan 1 Selenoid Vana	R7(R7_SV_A1)	SV5 (1")
Alan 2 Selenoid Vana	R8(R8_SV_A1)	SV6 (1")
Alan 3 Selenoid Vana	R9(R9_SV_A1)	SV7 (1")

Çizelge 3. Dijital girişleri değişken tanımlamaları

Kullanılan Yer	Dijital Girişin Değişken Tanımlaması	Üç Tanımı
Yağış Ölçer (plüviyometre)	plvm	24 VDC
Alan 1 dijital su sayacı (1")	DSS1	24 VDC
Alan 2 dijital su sayacı (1")	DSS2	24 VDC
Alan 3 dijital su sayacı (1")	DSS3	24 VDC

Çizelge 4. Analog giriş-çıkışların değişken tanımlamaları

Kullanılan Yer	Değişken Tanımı	Analog giriş (AI)	Analog çıkış (AO)
Sıcaklık Sensörü	scklk	1	
Nem Sensörü	nem	1	
Rüzgar Hızı Sensörü (Ananometre)	Ruzgar_Hiz	1	
Solar Radyasyon Sensörü	pyrm	1	
Su Tankı Basınç Sensörü	STBS	1	
Gübre Tankı Oransal Vana	GTOV		1
Alan 1 Toprak Nem Sensörü	TNS1	1	
Alan 2 Toprak Nem Sensörü	TNS2	1	
Alan 3 Toprak Nem Sensörü	TNS3	1	

Basınç ve toprak nem okuma fonksiyon algoritmaları

-Bir fonksiyon blok ile sensörlerin dijital okuma aralığı fiziksel okuma aralığına çevrilmiştir.

-Okumalar 100 ms geciktirilerek filtreleme yapılmıştır.

-Filtrelenen değerlerin 32 adedi kullanılarak hareketli ortalama alınmıştır.

-Sensor okuma değerleri, ortalama değer olarak belirlenmiştir.

Sıcaklık, nem ve solar radyasyon okuması algoritması

- Sıcaklık, nem ve solar radyasyonun pozitif değerleri dışında herhangi bir değer kabul edilmemiştir.

-Sensörlerin sayısal değerleri 0-27648 değerine çevrilmiştir.

-Sensörlerin fiziksel okuma aralıkları ile sensör sayısal değerleri çarpılarak sensör fiziksel değerleri hesaplanmıştır.

SD kart yazma fonksiyon algoritması

-Bir hafıza fonksiyonu tanımlanır.

-Dosya açma fonksiyonu Open_file() kullanılır.

-Dosya açma fonksiyonunun (Open_file()) yürütme (xExecute) true yapılır.

-Dosya açma fonksiyonunda (Open_file())dosya adı (sFileName:=sFileName) ataması yapılır.

-Dosya açma fonksiyonunda (Open_file()) dosya açma modu (eFileMode:=FileMode) seçilir.

- Dosya yazma fonksiyonu (Write_file ()) true yapılır.

-Veriler dosyaya yazılı

-Dosya kapama (Close_file) fonksiyonu ile dosya kapatılır

SD kart Yazma Algoritması

Dosyaya yazma nesne tanımlaması yapıldı (WriteData: write_sd_card)

-Veri kaydı değişkeni, true yapıldı

-Dosyaya yazılacak veriler, string tipinde arka arkaya (concat) sıralandı.

-Dosya adı (fileName_write:='sdcard/nariklimveri.csv') dosya adı değişkenine atanmıştır.

-Veriler . WriteData nesne yardımıyla SD karta kayıt yapılmıştır.

Referans Evapotranspirasyonu Hesaplama Algoritması

-ETo_Yapi ve iklim_Yapi adı altında iki struct tanımlanmıştır.

- Bu iki yapı (struct)'nın atandığı iki adet Retain Persistans Eto_data ve iklim_data dizi tanımlanmıştır.

-Her saat sonunda sıcaklık ve nem değerleri iklim_data dizi-struct yapısına atanmıştır

-Yağış olduğunda puls değerlerini sayarak toplamaktadır.

-Yağış miktarı (mm), toplam puls sayısı, kefe hacmi ile çarpılıyor ve plüviyometre alanına bölünerek bulunuyor.

-Her yarım saatte bir solar radyasyon ve rüzgar hızı değerlerini toplamaktadır.

-Sıcaklık ve oransal nem değerlerini büyükten küçüğe sıralamaktadır.

-Ortalama sıcaklık ve oransal nem değerleri en büyük ve en küçük sıcaklık ve oransal nem değerlerinin toplayarak ve 2'ye bölerek bulunmaktadır.

-Julian day hesaplanmaktadır

-En düşük doymuş buhar basıncı en düşük sıcaklık değerlerinden hesaplanmaktadır.

- En yüksek doymuş buhar basıncı en yüksek sıcaklık değerlerinden hesaplanmaktadır.

-Ortalama doymuş buhar basıncı en düşük ve yüksek iki doymuş buhar basınç değerinin ortalaması alınarak bulunmuştur.

-Buhar basıncının eğimi, ortalama sıcaklık kullanılarak bulunmuştur

- Gerçek buhar basıncı ortalama en yüksek ve en düşük oransal nem kullanılarak bulunmuştur

-Buhar basıncı açığı, doymuş buhar basıncından gerçek buhar basıncı çıkarılarak bulunmuştur.

-Kuzey yârim kürede radyan olarak ifade edilen boylam, enlem derecesi kullanılarak hesaplanmıştır.

-Solar diklik, julian day kullanılarak hesaplanmıştır.

-Güneş batım saatindeki açı, kuzey yârim kürede radyan olarak ifade edilen boylam ve solar diklik kullanılarak hesaplanmıştır.

-Extraterrestrial radyosyon ($\text{MJ m}^{-2} \text{gün}^{-1}$), güneş batım saatindeki açı, kuzey yârim kürede radyan olarak ifade edilen boylam ve solar diklik kullanılarak hesaplanmıştır.

-Açık hava solar radyasyon, yükselti ve extraterrestrial radyosyon kullanarak hesaplanmıştır.

-Net kısa dalga boylu radyasyon hesaplanmıştır.

-Net giden uzun dalga boylu radyasyon hesaplanmıştır.

-Net Radyasyon, net kısa dalga boylu radyasyondan net giden uzun dalga boylu radyasyon çıkarılarak hesaplanmıştır.

-Atmosferik basınç yükseltiden hesaplanmıştır.

-Psikometrik sabite, atmosferik basınçtan hesaplanmıştır.

-Ortalama rüzgar hızı bulunuyor, toplanan rüzgar hızı 48'e bölünerek bulunmuştur.

-Son olarak referans evapotranspirasyon (ET_o) yukarıda verilen değerlerden hesaplanmıştır.

Su Tankı Dolum Algoritması

Su kesintisini önlemek ve sulamayı sürekli yapabilmek için hacmi 7 m³ olan bir su plastik tank kullanılmıştır. Su tankı içerisine 250 mBarlık bir basınç sensörü yerleştirilmiştir. Bu sensör 0-250 cm arasında su sütununu okuyabilmektedir. Tankın su ile dolum işlemi sulama mevsimi içerisinde yapılmaktadır. Sulama mevsimi dışında tüm sulama işlemleri durdurulmuştur.

-Su tankı içerisindeki su seviyesi 100 cm'ye eşit veya küçük olduğunda derin kuyu motopompu çalışmıştır.

- Su tankı giriş vanası açılmıştır.

- Su tankı içerisindeki su seviyesi 145 eşit veya büyük olduğunda derin kuyu motopomp durmuş ve su tankı giriş selenoid vanası kapanmıştır.

Aksiyon (Action) Tanımlama Algoritmaları

Programın okunabilirliğini arttırmak için ve ana programın uzunluğu azaltmak için Alan1SuHesap, Alan2SuHesap, Alan3SuHesap, kc_secim, Ort_RH_T, yagis_hesap ve tarih_don başlıkları altında aksiyon tanımlanmıştır.

-Alan1SuHesap, Alan2SuHesap ve Alan3SuHesap sulama suyunu hesapladı.

- kc_secim, narın gelişme dönemine göre bitki katsayısı (kc) seçildi.

- Ort_RH_T hava neminin ve sıcaklığın ortalama değerleri hesaplandı.
 - yagis_hesap, puls sayıları, mm cinsinden değere dönüştürüldü.
 - tarih_don, kaydedilecek verilerin tipi string tipine dönüştürüldü.
- 2.8. Referans Evapotranspirasyonla yapılan günlük işlemler algoritması
- Referans Evapotranspirasyonla yapılan günlük sabah saat 8:59:03 balarlar ve sonraki gün aynı saate kadar devam eder.
 - Toplam solar radyasyon ve rüzgar hızı struct-dizi değişkenlerine atanır.
 - Ortalama rüzgar hızı, sıcaklık ve ETo hesaplanır.
 - ETo, sıfırdan büyük değilse başa döner, ilk gün olduğu için, sıfırdan büyük ise ikinci gün olduğu için sonraki adımlara geçer.
 - ETo>P ise ETo'dan yağış değeri çıkarılır ve kalan net ETo hesaplanır.
 - ETo=P ise ETo, yağış değerine eşit olduğu için ETo ve yağış sıfır olarak alınır.
 - ETo<P ise ETo, yağış değerinden küçük olduğu için ETo sıfır olarak alınır ve kalan yağış değeri bir sonraki yağış değerine eklenir.
 - Net ETo (yağış çıkarılmış) toplanır.
 - Toplam net ETo değeri 35 eşit veya büyük ise Sulama başlatılır.
 - Bitki gelişme dönemine göre bitki katsayısı (kc) seçilir.
 - Alan 1'in sulama suyu, toplam ETo, kc ve 1. alanın alanı ile çarpılarak sulama suyu hesaplanır
 - Alan 2'nin sulama suyu, toplam ETo, kc ve 2. alanın alanı ile çarpılarak sulama suyu hesaplanır.
 - Alan 3'ün sulama suyu, toplam ETo, kc ve 3. alanın alanı ile çarpılarak sulama suyu hesaplanır.

Alan Birin Sulama Algoritması

- Sulama mevsimi içinde olduğu kontrol edilir.
- SulamaBaslat değişkeni true ise, Alan 2'nin ve 3'ün selenoid vanaları açık değil ise
- Su tankı çıkış selenoid vanasını aç, sulama motopompu çalıştır ve alan 1'in selenoid vanasını aç.
- Su sayaç değeri, sulama suyu miktarına eşit veya büyük olduğunda Alan1'in sulamasını selenoid vanayı kapatarak durdur.

Alan İkinin Sulama Algoritması

- SulamaBaslat değişkeni true ise, alan 1'in sulama suyu miktarı alan 1'in su sayacı farkı 5 den küçük veya 5'eşit ise ve Alan 3'ün selenoid vanası açık değil ise
- Alan 2'nin selenoid vanasını aç.
- Alan 2'nin su sayaç değeri, Alan 2'nin sulama suyu miktarına eşit veya büyük olduğunda Alan 2'nin selenoid vanasını kapatarak durdur.

Alan Üçün Sulama Algoritması

-SulamaBaslat değişkeni true ise, alan 2'nin sulama suyu miktarı alan 2'nin su sayacı farkı 5 den küçük veya 5'eşit ise ve Alan 1'in selenoid vanası açık değil ise

- Alan 3'ün selenoid vanasını aç.

- Alan 3'ün su sayaç değeri, Alan 3'ün sulama suyu miktarına eşit veya büyük olduğunda Alan3'in selenoid vanasını, su tankı çıkış selenoid vanasını ve motopompu kapatarak sulamayı durdur.

Pano Montajı

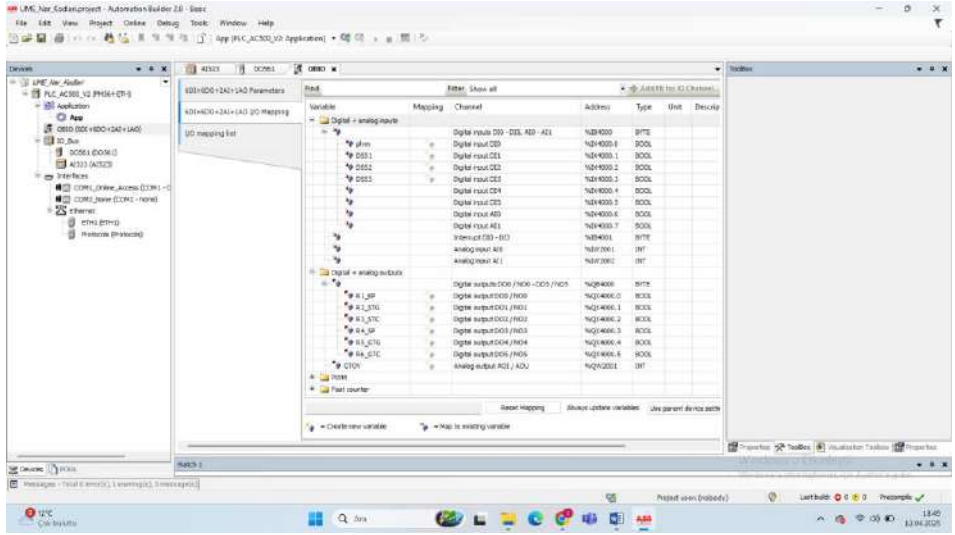
Pano montajı, pano projesine göre yapılmıştır. Projede öngörülen tüm adımlar panoya aktarılmıştır. Pano montajında AC500 PM564-T-ETH PLC, 1 adet DO561, adet AI523, 2 adet invertor, 1 adet dokunmatik panel, 3 adet güç kaynağı, 7 adet otomat, 3G/4G Wireless N router (TL-MR3420)- USB modem, 9 adet role, 38 adet 2.5'luk klemens, ray, kanal ve yaklaşık 100 m 0.75 mm² NYY kablo kullanılmıştır.

PLC'nin Kanal Değişkenlerinin Tanımlanması ve Konfigürasyonu Automation Builder Arayüzünde Kanal Değişken Atamaları (OBIO)

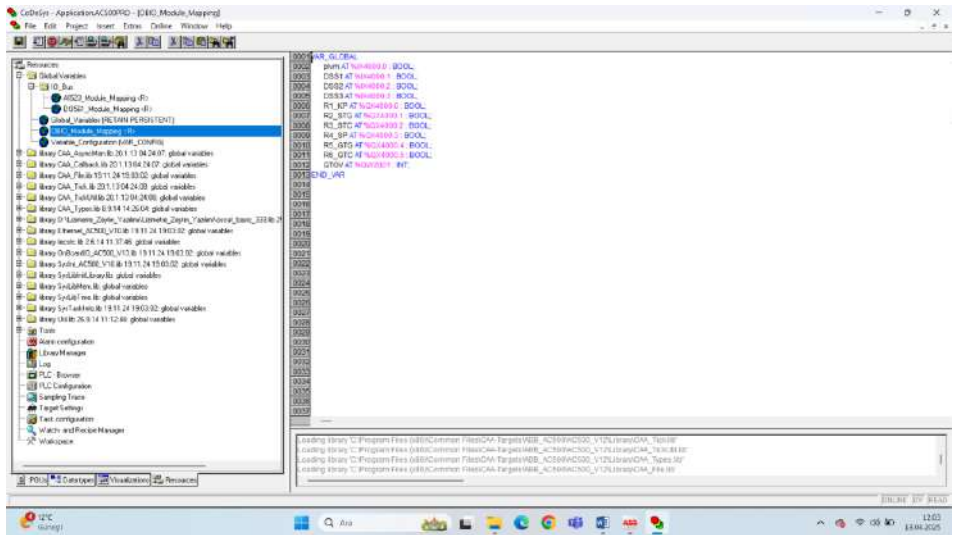
Automation Builder arayüzünde, OBIO daki dijital giriş ve çıkış kanallarının sırasıyla %IX4000.0 ve %QX4000.0 gibi adresleri vardır. Bu adresler, programda doğrudan kullanılabildiği gibi global değişken tanımlanarak kullanılabilmektedir. OBIO giriş-çıkış kanallarına, Şekil 9'da görüldüğü gibi global değişkenler tanımlanmıştır. Bu global değişkenler, plvm AT %IX4000.0 :BOOL, DSS1 AT %IX4000.1:BOOL, DSS2 AT %IX4000.2:BOOL, DSS3 AT %IX4000.3:BOOL, R1_KP AT %QX4000.0:BOOL, R2_STG AT %QX4000.1:BOOL, R3_STC AT %QX4000.2:BOOL, R4_SP AT %QX4000.3:BOOL, R5_GTG AT %QX4000.4:BOOL, R6_GTC AT %QX4000.5:BOOL ve GTOV AT %QW2001:INT şeklinde tanımlanmıştır. Bu global değişkenler, CODESYS arayüzündeki Resources katmanında Global Değişkenler dizininin altındaki OBIO Module Mapping (R) yer almaktadır (Şekil 10).

Automation Builder Arayüzünde Kanal Konfigürasyonu (AI)

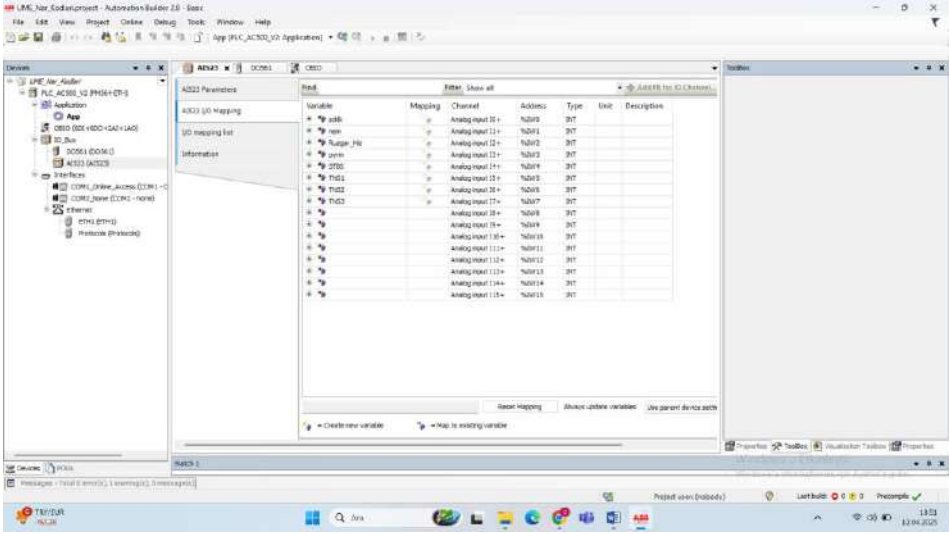
Automation Builder arayüzünde, AI523 analog modülünde giriş kanalları sırasıyla %IW0... %IW15 gibi adresleri vardır. Bu adresler, programda doğrudan kullanılabildiği gibi global değişken tanımlanarak kullanılabilmektedir. AI523 giriş kanallarına, Şekil 11'de görüldüğü gibi global değişkenler tanımlanmıştır. Bu global değişkenler, scklk AT %IW0:INT, nem AT %IW1:INT, Ruzgar_Hiz AT %IW2:INT, pyrm AT %IW3:INT, STBS AT %IW4:INT, TNS1 AT %IW5:INT, TNS2 AT %IW6:INT ve TNS3 AT %IW7:INT eşkinde atanmıştır.



Şekil 9. OBIO giriş-çıkış kanal değişken tanımlanması

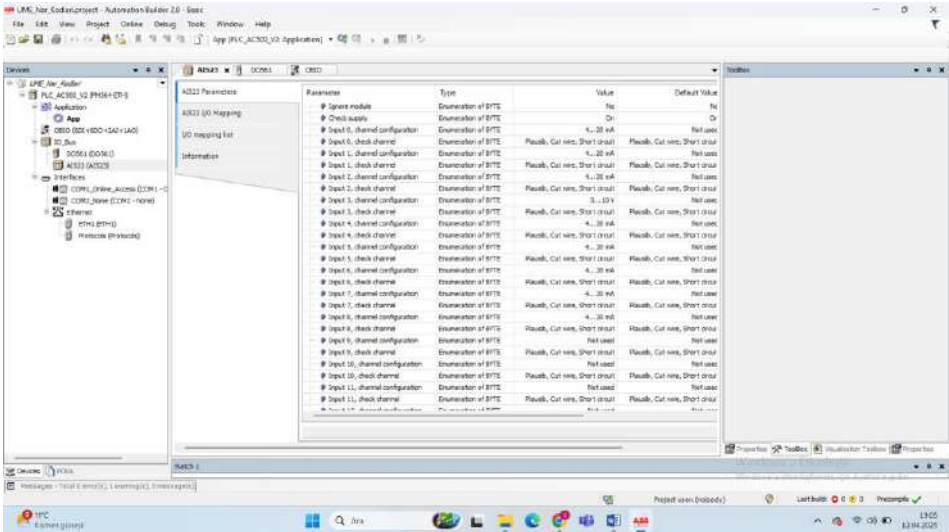


Şekil 10. OBIO giriş-çıkış kanal değişkenlerin atandığı çubuk



Şekil 11. Analog Modülde kanal değişken tanımlaması

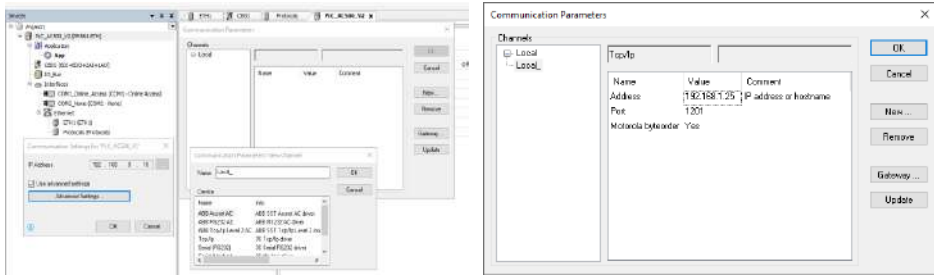
Kanalların konfigürasyonu Şekil 12'deki gibi yapılmaktadır. Sensörün çıkışına göre kanal giriş veya bunun tersi seçilmektedir. Şekil 12'de görüldüğü gibi sensörün çıkışı 4-20 mA olduğunda AI523 analog modülünün girişi 4-20 mA olarak seçilmiştir. Diğer yandan 3. kanalın konfigürasyonu 0-10 V şeklinde yapılmıştır. Çünkü sensörün çıkışı 0-10 voltur.



Şekil 12. Analog Modül kanal konfigürasyonu

PC-PLC Haberleşme Konfigürasyonu

Automation Bulder programını, bilgisayara yükledikten sonra bilgisayar ile PLC arasında haberleşmeyi sağlayabilmek için RJ45 konnektörlü ethernet ara kablosu kullanılmıştır. Bu bağlantı yapıldıktan sonra Automation Builder>Tools>IP-Configuration>Scan'dan PLC'nin IP numarası öğrenilir. Bilgisayarda, Automation Bulder programında, Şekil 5.5'de verilen arayüzlerden yararlanarak PLC'nin IP numarası buraya yazılır. Bilindiği gibi PLC'nin IP numarası 192 başlamaktadır. Kanal local, Port numarası 1201 ve Motorola byteorder Yes olmalıdır. Bilgisayarın IP numarası ise Şekil 13'den ayarlanmıştır. Bunun için Ağ ve internet ayarları>Ethernet>Bağdaştırıcı seçeneklerini değiştir>Ethernet/WI-FI>Ethernet Protokol Sürüm 4(TCP/TCPv4>Özelliklerden Şekil 13 gelmektedir. Şekil 13'de IP numarası yazılır. Bu IP numarasının ilk 3 değeri PLC'nin IP numarası ile aynı son değeri ise farklı yazılmalıdır. Örneğin PLC'nin IP numarası 192.168.1.25 ise bilgisayarın IP numarası 192.168.1.50 olmalıdır. Bu şekilde bilgisayar ile PLC online bağlantı yapar veya haberleşebilir.

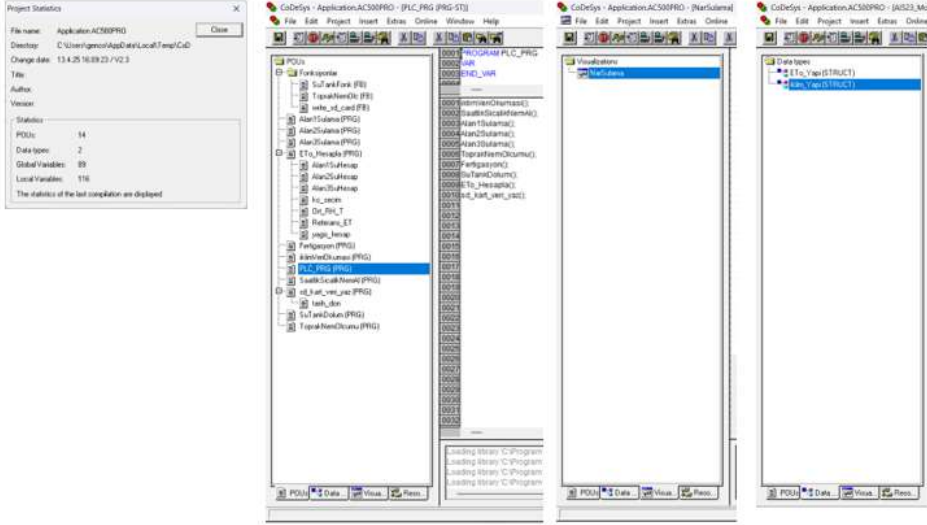


Şekil 13. PLC IP Konfigürasyonu

Sulama Otomasyon Mimarisi

Sulama otomasyon kodu, CODESYS ST dili kullanılarak yazılmıştır. Sulama otomasyon kodları Şekil 14'de verilmiştir. Projede 14 adet POU's (program organisation unit), 2 Data_Types, 89 Global Variables, 116 adet local variables kullanılmıştır. Bunlardan 9 adedi POU's altındaki alt koddan (object), 3 adedi ise fonksiyon bloktan oluşmuştur. Bu alt kodlar, iklimVeriOkumasi(), SaatlikSicalikNemAl(), Alan1Sulama(), Alan2Sulama(), Alan3Sulama(), ToprakNemOlcumu(), Fertigasyon(), SuTankDolum(), ETo_Hesapla() ve sd_kart_veri_yaz() şeklindedir. PLC_PRG(PRG) ana programdır. Alt kodlar, PLC_PRG(PRG) ana program altında verilmiştir. Bunlara ek olarak SuTankFonk (FB), ToprakNemOlc(FB) ve Write_SD_Card(FB) gibi 3 adet fonksiyon blok ve 7 adet aksiyon (action) tanımlanmıştır. Bu aksiyonlar Alan1SuHesap, Alan2SuHesap, Alan3SuHesap, kc_secim, Ort_RH_T, Referens_ETo, yagis_hesap ve tarih_don'dür. Data çubuğu altında ETo_Yapi (Struct) ve

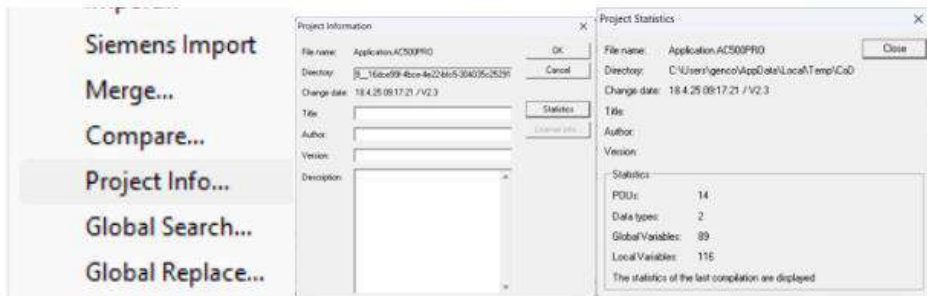
iklim_Yapi (Struct) adları altında iki adet yapı tanımlanmıştır. Visulation çubuğu altında NarSulama başlıklı bir görselleştirme arayüzü oluşturulmuştur. Tüm global değişkenler ise Resorces çubuğu altında verilmiştir.



Şekil 14. Sulama otomasyon kodları

Kod Yazılımda Kullanılan Değişkenler

Projenin istatistik bilgileri Şekil 15’de verilmiştir. Projenin istatistik bilgilerine CODESYS arayüzünde Project>Project information>Statistics ten ulaşılmıştır. Projede 14 POU’s, 2 data tipi, 89 global değişken ve 116 lokal değişken kullanılmıştır (Şekil 15). Burada her bir alt programda kullanılan global ve lokal değişken adları ve kullanım amaçları verilecektir.



Şekil 15. Projenin istatistikleri

AI523 Modül Mapping te Kullanılan Global Değişkenler

Aşağıda verilen sensörlere atanan değişken tipi int tir. Değişkenlerde yapılacak sayısal işlemler buna göre yapılmaktadır. Bunlar global değişkenler olduğu için tüm alt programlarda kullanılmaktadır. Bu değişkenler iklim verilerinin, nar bahçesindeki bölünen alanlarda toprak neminin ölçümünde ve su tankı basınç ölçümünde kullanılmıştır.

VAR_GLOBAL

```
scklk AT %IW0 : INT; (*Hava sıcaklığı ölçüm sensörü*)
nem AT %IW1 : INT; (*Hava nemi ölçüm sensörü*)
Ruzgar_Hiz AT %IW2 : INT; (*rüzgar hızı ölçüm sensörü*)
pyrm AT %IW3 : INT; (*Solar radyasyonu ölçüm sensörü*)
STBS AT %IW4 : INT; (*Su Tankı basınç ölçüm sensörü*)
TNS1 AT %IW5 : INT; (*Alan 1 için Toprak Nemi ölçüm sensörü*)
TNS2 AT %IW6 : INT; (*Alan 2 için Toprak Nemi ölçüm sensörü*)
TNS3 AT %IW7 : INT; (*Alan 3 için Toprak Nemi ölçüm sensörü*)
```

END_VAR

DO561 Modül Mapping'te Kullanılan Global Değişkenler

Aşağıda verilen selenoid vanalara atanan değişken tipi bool dur. Değişkenlerde yapılacak dijital işlemler buna göre yapılmaktadır. Bunlar global değişkenler olduğu için tüm alt programlarda kullanılmaktadır. Bu değişkenler, nar bahçesindeki alan 1, 2 ve 3'ün sulamasını selenoid vana aracılığı ile kontrol etme amaçlı kullanılmıştır.

VAR_GLOBAL

```
R7_SV_A1 AT %QX0.0 : BOOL; (*Alan 1'in sulamasında kullanılan
selenoid vana*)
R8_SV_A2 AT %QX0.1 : BOOL; (*Alan 2'nin sulamasında kullanılan
selenoid vana*)
R9_SV_A3 AT %QX0.2 : BOOL; (*Alan 3'ün sulamasında kullanılan
selenoid vana*)
END_VAR
```

Global Değişkenler: RETAIN

Referans evapotranspiyasyonun hesaplanmasında alanların sulamasında kullanılan değişkenler tanımlanmıştır. Değişkenler hem global ve hem de retain olarak tanımlanmıştır. Retain olarak tanımlandığında elektrik kesilse bile o anki değerini korumaktadır. Örneğin her yarım saatte bir solar radyasyonu ve rüzgar hızını toplamaktadır. Eğer gün için elektrik kesintisi olduğunda mevcut toplanan

değerleri kaybetmeyecek ve elektrik geldiğinde mevcut değerler üzerine toplamaya devam edecektir.

VAR_GLOBAL RETAIN

ETo_data: ARRAY [1..30] OF ETo_Yapi; (*ETo hesaplamasında kullanılan değişkenler*)

iklim_data:ARRAY[1..24] OF iklim_Yapi; (*Sıcaklık ve nem ölçümünde kullanılan değişkenler*)

yagis:WORD:=0; (*yağış ölçümünde kullanılan değişkenler*)

i:BYTE:=1; (*indis değişkeni*)

j:BYTE:=1; (*indis değişkeni*)

Topl_Rs,Topl_Ruz_Hiz: REAL; (*Toplam solar radyasyon ve ruzgar hızı değişkeni*)

alan1_sayac: INT; (*Alan 1 sayaç değişkeni*)

alan2_sayac: INT; (*Alan 2 sayaç değişkeni*)

alan3_sayac: INT; (*Alan 3 sayaç değişkeni*)

Sulama_Suyu_Mik1:INT; (*Alan 1 için hesaplanan su miktarı*)

Sulama_Suyu_Mik2:INT; (*Alan 2 için hesaplanan su miktarı*)

Sulama_Suyu_Mik3:INT; (*Alan 3 için hesaplanan su miktarı*)

OlcToprakNem1, OlcToprakNem2, OlcToprakNem3:ToprakNemOlc;

END_VAR

Global Değişken Ataması

Yağış ölçümünde kullanılan sabitler ve dizinlerin indisinde kullanılan sayıcılar verilmiştir. Sulama suyunun hesaplanmasının önemli bir parametre olan bitki katsayısı (kc) verilmiştir.

VAR_GLOBAL

Birim_Hacim: WORD:=4448;(*Pluviyometrenin her bir kaşığının hacmi 4448 mm³*)

Pluviyometre_alani: WORD:=20096;(*Pluviyometrenin çapı 160 mm ve alanı 20096 mm²*)

(*iklm_veri AT %RW0.0: Nem_scklk; bunun yeri VAR_GLOBAL içerisidir*)

sicaklik, Or_Nem: REAL;

saat:CLOCK;

tarih: CLOCK_DT;

g_ETo, Topl_ETo : REAL;

G_BS_H: STRING(5); (*G_US_H*)

veri_kayit: BOOL;

```

BS_SY: WORD;
kc:REAL;(*bitki katsayısı*)
Slm_mkt1: REAL;
Slm_mkt2: REAL;
Slm_mkt3: REAL;
SulamaBaslat:BOOL;
CTU_1,CTU_2: CTU;
CTU1Reset: BOOL;
CTU2Reset: BOOL;

END_VAR

```

OBIO Module Mapping (Global Değişkenler) Değişken Ataması

Plüviyometrenin, dijital su sayaçlarının çıkışları ve damla sulama kontrol ünitesindeki selenoid vanaların kontrolünü yapan değişkenler aşağıda verilmiştir. Oransal vananın çıkışının tipi int ve diğer değişkenlerin tipi ise bool dur.

```

VAR_GLOBAL
    plvm AT %IX4000.0 : BOOL;
    DSS1 AT %IX4000.1 : BOOL;
    DSS2 AT %IX4000.2 : BOOL;
    DSS3 AT %IX4000.3 : BOOL;
    R1_KP AT %QX4000.0 : BOOL;
    R2_STG AT %QX4000.1 : BOOL;
    R3_STC AT %QX4000.2 : BOOL;
    R4_SP AT %QX4000.3 : BOOL;
    R5_GTG AT %QX4000.4 : BOOL;
    R6_GTC AT %QX4000.5 : BOOL;
    GTOV AT %QW2001 : INT;

END_VAR

```

Sulama Otomasyon Kodları

Referans Evapotranspirasyon Hesaplama Alt Kodu (ETo_Hesapla (PRG))

Narın günlük sulama suyu miktarını hesaplayabilmek için günlük referans evapotranspirasyonu hesaplayan ETo_Hesapla kod yazılmıştır. Bu kodu yazabilmek için bir adet gerçek zamanlı saat (real time clock (RTC)), bir adet yükselen kenar tetikleyicisi (rising trigger, R_TRIG) ve iki adet yukarı sayıcı (CTU) kullanılmıştır. Ayrıca ETo_Hesapla kod altında 7 adet aksiyon (action) tanımlanmıştır. Bunlara ek olarak işlemlerin sıralı yapılabilmesi için CASE OF

END_CASE komutu kullanılmıştır. Kodda hesaplama işlemlerine, saatin 08:56:30 değerine eşit olmasıyla R_trig tetiklenmiş ve kod çalışmaya başlamıştır.

CASE in step=0 koşulunda 1 ve 2 yukarı sayıcının resetleri false çekilmiş ve step=10 atanmıştır.

CASE in step=10 koşulunda 1 ve 2 yukarı sayıcının CTU_1.CV=1 ve CTU_2.CV=1 olmuştur. Sonra ETo_Data yapısına gün, toplam solar radyasyon ve toplam rüzgar hızı atanmıştır. Step=20 yapılmıştır.

CASE in step=20 koşulunda ortalama oransal nem, sıcaklık ve yağış hesaplanmıştır. Step=30 atanmıştır.

CASE in step=30 koşulunda günlük ETo>0 ise işlemlere devam edilmiş değilse step=0'a dönmüştür. Step=40 atanmıştır.

CASE in step=40 koşulunda günlük hesaplanan ETo değeri, yağış değerinden büyük ise ETo'dan günlük yağış değeri çıkarılmış sonra da yagis:=0 ve ETo_data[CTU_1.CV].g_yagis:=0 atanmıştır.

Hesaplanan ETo değeri, yağış değerine eşit ise, ETo_data[CTU_1.CV].g_ETo:=0, yagis:=0 ve ETo_data[CTU_1.CV].g_yagis:=0 atanmıştır. Step=50 atanmıştır.

CASE in step=50 koşulunda günlük Topl_ETo:=0 atanmış ve günlük net ETo'lar toplatılmıştır. Eğer net ETo toplamaları 35 mm büyük ise bitki katsayısı (kc) seçilmiş, alan 1, 2 ve 3 için sulama suyu hesaplanmış, sayıcı 1 ve 2'nin mevcut değerleri sıfırlanmış, kayıt yapılmıştır. Step=60 atanmıştır.

Eğer net ETo toplamaları 35 mm büyük değilse kayıt yapılmış ve step=0 dönmüştür.

CASE in step=60 koşulunda tüm yapılarıdaki diziler, toplam ETo, solar radyasyon, rüzgar hızı sıfırlanmıştır. Step=0 atanarak kod başına dönmüştür.

Alan1 Su Hesabı Aksiyonu

Alan 1'in sulama suyu hesaplatılmıştır. $Slm_mkt1 := Topl_ETo * kc * Alan1$ şeklinde bir eşitlik kullanılmıştır. Eşitlikte Toplam ETo , ETo_Hesapla kodundan hesaplatılmıştır. Bitki gelişim katsayısı ($kc=kc12$) bitkinin gelişme dönemlerine göre kc_secim aksiyonundan seçtirilmiştir. kc12, 1 Nisandan Haziran ayının 14. gününe kadar 0.52 alınmış ve alan 1 ise 729.0 m² olarak verilmiştir.

Alan2 Su Hesabı Aksiyonu

Alan 2'nin sulama suyu hesaplatılmıştır. $Slm_mkt1 := Topl_ETo * kc * Alan1$ şeklinde bir eşitlik kullanılmıştır. Eşitlikte Toplam ETo , ETo_Hesapla kodundan hesaplatılmıştır. Bitki gelişim katsayısı ($kc=kc3$) bitkinin gelişme dönemlerine göre kc_secim aksiyonundan seçtirilmiştir. Kc3, Haziran ayının 14. gününden Eylül ayının 30'una kadar 0.93 alınmış ve alan 1 ise 729.0 m² olarak verilmiştir.

Alan3 Su Hesabı Aksiyonu

Alan 3'ün sulama suyu hesaplatılmıştır. $Slm_mkt1:=Topl_ETo*kc*Alan1$ şeklinde bir eşitlik kullanılmıştır. Eşitlikte Toplam ETo , ETo_Hesapla kodundan hesaplatılmıştır. Bitki gelişim katsayısı ($kc=kc4$) bitkinin gelişme dönemlerine göre kc_secim aksiyonundan seçtirilmiştir. Kc4, Ekim ayının 1'inden Kasım ayının 5'ine kadar 0.5 alınmış ve alan 1 ise 409.5 m² olarak verilmiştir.

Bitki Gelişim Katsayısı Seçimi Aksiyonu

Bitki gelişim katsayısı, bitki su tüketimini etkileyen bitki ve toprak parametresini içermektedir. ETo ise yalnızca iklim parametrelerini içermektedir. Bitki su tüketimi etkileyen etmenler ise bitki, toprak ve iklim parametreleridir. ETo, kc ile çarpıldığında bitki su tüketimini etkileyen tüm parametreler dahil edilmektedir. Bitki gelişim katsayısı kc bitki gelişim dönemlerine göre adlandırılmaktadır. Birinci bitki gelişme dönemi k1, ikinci gelişme dönemi k2 ve üçüncü gelişme dönemi k3 gibi adlandırılabilir. Bazen de dönemlerde birleştirilebiliyor. Örneğin birinci ve ikinci dönem birleştirildiğinde kc katsayısı, kc12 şeklinde adlandırılabilir. Bitkin gelişme dönemi, fenolojik evrelere göre belirlenmektedir. Bu projede 1 Nisandan Haziran ayının 14. gününe kadar birinci ve ikinci dönem ve $kc12=0.52$, Haziran ayının 14 gününden Eylül ayının 30'una kadar üçüncü dönem ve $Kc3=0.93$ ile Ekim ayının 1'inden Kasım ayının 5'ine kadar olan süre dördüncü dönem olarak ve $Kc4=0.5$ alınmıştır.

Ortalama Oransal Nem ve Sıcaklık Aksiyonu

Oransal nem ve sıcaklık değerleri iklim_data[CTU_2.CV].RH:=Or_Nem ve iklim_data[CTU_2.CV].T:=sicaklik yapılarında ve dizilerinde tutulmuştur. Bu yapıda tutulan oransa nem ve sıcaklık değerleri büyükten küçüğü iç içe iki for to by do end_for tapısı ve if the end_if komutu kullanılarak sıralatılmıştır. Eğer elektrik kesintisi gibi nedenlerden dolayı oransal nem ve sıcaklık değerlerinden biri eksik olduğunda bir önceki saatteki ölçülen oransal nem ve sıcaklık değerleri bir sonraki oransal nem ve sıcaklık değerlerine atanmıştır. En sonundan günlük ortalama oransal nem ve sıcaklık değeri, en büyük ve en küçük değerler toplanmış ve ikiye bölünerek ortalama oransal nem ve sıcaklık değerleri bulunmuştur (EK-2.1.5.).

Referens Evapotranspirasyon Hesaplama Aksiyonu

Yeryüzünden atmosfere giden uzun dalga boylu ışın miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra pironometre ile ölçülen değerden çıkarılarak net solar radyasyon hesaplanmıştır. FAO-56 Penman Monteith eşitliğinde, D = Doygun buhar basıncı eğrisinin eğimi (kPa °C⁻¹), Rn = Bitki yüzeyindeki net radyasyon (MJ/m² gün), G

= Zemin ısı değişim yoğunluğu ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{gün}$), Psbt = Psikrometrik sabit ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), $u_2 = 2$ m yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı (m/s), e_s = Ortalama doygun buhar basıncı (kPa), e_a = Gerçek buhar basıncı (kPa), $e_s - e_a$ = Buhar basıncı açığı (kPa) ve T = Sıcaklık ($^\circ\text{C}$) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Yağış Hesaplama Aksiyonu

Her gün saat 08:59:30'dan saat 08:59:30'a kadar X4:1 klemensinden plüviyometreye 24 VDC gönderilmiş, yağışın oluşumu sırasında plüviyometrenin oluşturduğu 24 VDC pulslar X4:2 klemensinden (Ek-1 Şekil 14), PLC'ye plvm AT %IX4000.0 adresinden giriş yapılmıştır. F_TIG kullanılarak saydırılmış ve yagis değişkenine atanmıştır. Plüviyometre kefesinin birim hacmi 4448 mm^3 , plüviyometrenin ağız çapı 160 mm ve alanı ise 20096 mm^2 'dir. Puls sayısı ile kefe hacmi çarpılmış ve plüviyometrenin alanına bölünerek düşen yağışın derinlik cinsinde değeri bulunmuştur. Sonrada $\text{ETo_data[i].g_yagis}$ atanmıştır.

Fertigasyon Kod Yazımı

Fertigasyon Nisan, Mayıs, Haziran ve Temmuz Aylarının başında yapılmıştır. Uygulanacak sıvı gübre miktarı 4'e bölünmüş ve bu 1/4'lük gübre, gübre takına konulmuş ve damla sulama yöntemiyle ağaçların kök bölgesine uygulanması planlanmıştır. Kod yazımında R_TRIG, TP(timer) ve CASE OF END_CASE yapısı kullanılmıştır. Fertigasyona, Alan 1 7.R1, 2 7.R2 ve 3 7.R3 selenoid vanaları (Ek-1 Şekil 9) true olduktan diğer bir ifade ile sulamalar başladıktan 5 dakika sonra başlatılmıştır. PLC'nin AOU 11 analog çıkışından, önce oransal vana (GTOV)'ya 13900 sayısal değeri GTOV AT %QW2001 adresi üzerinden gönderilmiştir. Böylece GTOV %50 oranında açılmıştır. Sonrada 6.R6 rolesi üzerinden gübre tankı giriş vanası, 6.R5 rolesi üzerinden ise çıkış vanası açılarak gübreleme başlatılmıştır.

İklim Verisi Alma

Projede kullanılan iklim verilerini okutan sensörlerin okuduğu sayısal değerleri belirli sınırlar için kalmasını ve sensörlerin okuduğu sayısal değerleri gerçek değerler çeviren kod yazılmıştır. Her bir sensörün değerleri okuma ve gerçek değerlere çevirme yöntemi aşağıda verilmiştir.

Yağış Değeri Alma

Günlük düşen yağış miktarını milimetre cinsinden belirlemek için yağış sonucu plüviyometre kefeklerin dolup boşalması sonucu 24 VDC pulslar

oluşturmaktadır. Bu pulsler F-TRIG aracılı ile $yagis=yagis+1$ şeklinde bir sayıcı kullanılarak saydırılmıştır.

Solar Radyasyon Değeri Alma

Piranometre sensörünün 4-20 mA değerlerine karşı üretilen 0-27648 arasında değişen değerler kullanılmıştır. Bunun dışındaki değerler dikkate alınmamıştır. Piranometre sensör değerleri ve el piranometresi ile 30 adet solar radyasyon değerleri ölçülmüştür. Piranometre sensör değerleri bağımsız ve el piranometre değerleri bağımlı değişken alınarak $pym*0.268+84.04$ şeklinde kalibrasyon eşitliği elde edilmiştir. Bu kalibrasyon eşitliğinden yararlanarak solar radyasyon değeri okunmuştur.

Rüzgar Hızı Değeri Ölçmesi

Anemometre sensörünün ürettiği 0-27648 arasında değişen değerler kullanılmıştır. Bunun dışındaki değerler dikkate alınmamıştır. Anemometre sensörünün ürettiği 20 mA değerine karşılık 50 m/s'lik rüzgar hızı değeri karşı gelmektedir. Rüzgar hızı, anemometre sensörünün sayısal değeri 50 ile çarpılmış ve 27648 değerine bölünerek elde edilmiştir.

Toplam Solar Radyasyon ve Rüzgar Hızı Değeri Alma

Günlük solar radyasyon ve rüzgar hızını bulmak için solar radyasyon ve rüzgar hızı değerleri, her saat başında ve ortasında (her yarım saatte bir) toplanmıştır.

Nem Değeri Ölçme

Oransal nem sensörünün ürettiği 0-27648 arasında değişen değerler kullanılmıştır. Bunun dışındaki değerler dikkate alınmamıştır. Anemometre sensörünün ürettiği 20 mA değerine karşılık %100 nem değeri karşı gelmektedir. Nem değeri, nem sensörünün sayısal değeri 100 ile çarpılmış ve 27648 değerine bölünerek elde edilmiştir.

Sıcaklık Değeri Ölçme

Sıcaklık sensörünün ürettiği 0-27648 arasında değişen değerler kullanılmıştır. Bunun dışındaki değerler dikkate alınmamıştır. Sıcaklık sensörünün ürettiği 20 mA değerine karşılık 100 °C'lik sıcaklık değeri karşı gelmektedir. Sıcaklık değeri, sıcaklık sensörünün sayısal değeri 100 ile çarpılmış ve 27648 değerine bölünerek elde edilmiştir.

Saatlik Sıcaklık ve Nem Değeri Atama

ETo hesaplamalarında en büyük ve en küçük sıcaklık ve nem değerleri kullanılmaktadır. Bu nedenle saatlik sıcaklık ve nem değerlerini kod EK-2.4. görüldüğü gibi iklim_data[CTU_2.CV].T:=sicaklik ve iklim_data[CTU_2.CV].RH:=Or_Nem şeklindeki yapı-diziye atanmıştır.

SD Karta Veri Yazma

Veri Kayıt programı tarih, sıcaklık, nem, rüzgar hızı, yağış, solar radyasyon, TN_A1, TN_A2, TN_A3, ETo, Toplam Eto, net ETo, Sulama suyu miktarı Alan 1, Sulama suyu miktarı Alan 2 ve Sulama suyu miktarı Alan 3 verilerini SD kartta bulunan *narveri.csv* adlı dosyaya her gün saat 8:59:30 de, Referans Evapotranspiasyon Hesaplama Alt Kodu (ETo_Hesapla (PRG)) başlığı altında verilen veri_kayit=true olduğu zaman kaydetmektedir. Verileri SD karta yazdırmada, write_sd_card fonksiyon bloğu kullanılmıştır.

Su Tankı Dolumu

Sulama mevsimi boyunca sulamanın yapılacağı zamanda sulama suyunun mevcut olması için 7 tonluk bir su tankı konulmuştur. Su tankı sürekli doluya yakın tutulmaya çalışılmıştır. 6.R1 ile 6.R2 roleleri X5:1,2 ve X5:3,4 klemensleri üzerinden true yapılmıştır. Tank içerisindeki AI4.4 aracılığı ile ölçülen su seviyesi 100 cm'ye veya altına düştüğünde önce invertör 6.R1 rolesi üzerinden start yapılmış ve derin kuyu pompası çalıştırılmıştır. Sonrada su tankı içerisindeki su seviyesi 145 cm'ye eşit veya büyük olunca motopomp ve su tankı giriş rölesi false yapılmıştır.

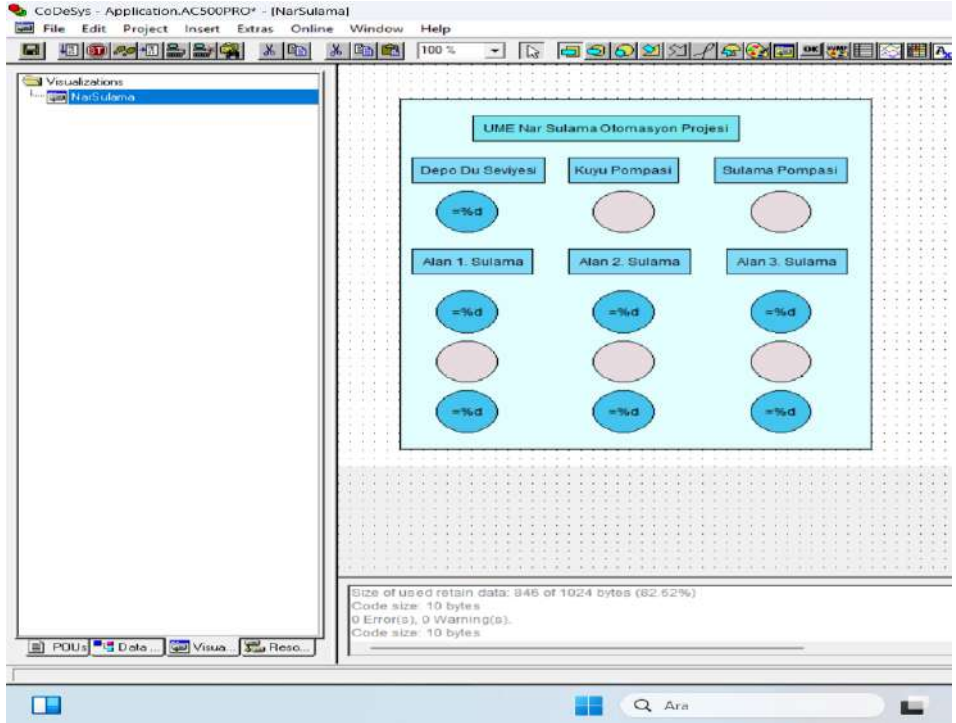
Toprak Nem Ölçümü

Alan 1, 2 ve 3'te narın 0-30 cm'lik kök derinliğinde toprak nemini okumak için fonksiyon bloklar oluşturulmuştur. Fonksiyon bloğun bir girişi ve bir çıkışı tanımlanmıştır. Sensörün 0-27648 arasında değişen dijital değerlerini 0-100 arasında değişen toprağın hacimsel su içeriğine LIN_TRAFO denilen bir fonksiyonla dönüştürülmüştür. Çevredeki gürültü etkisini azalmak için filtrasyon ve hareketli ortalamalar kullanılmıştır. Bu fonksiyon bloktan, verilen nesneler türetilmiş (Global Değişkenler: RETAIN) ve bu nesnelerden toprak nemi ölçme kodu yazılmıştır.

Görselleştirme (Visualuzation) İşlemi

İnternet üzerinden canlı olarak kuyu ve sulama motopomplarının ve Alan 1, 2 ve 3 selenoid vanaları durumunu, sulama suyu miktarlarını ve su sayaçlarının değerlerini aşağıda verilen görsel ekran(kontrol panel)'dan takip edilebilmektedir

(Şekil 16). Bu görsel ekran, SCADA olarak adlandırılmaktadır. Bu ekran, CODESYS yazılımının Görselleştirme (Visualization) bölümünde PLC başlıklı bir obje açılmış, bu obje üzerinde çizilmiş ve sonra her bir uç elamanın değişkeni atanarak tamamlanmıştır. İnternete bağlanmak için de PLC'nin port ayarları yapılmış ve bilgisayara Java programı yüklenmiş, bağlanacak bilgisayarın güvenlik ayarları yapılmıştır. Tüm işlemlerden sonra uzaktan PLC'ye bağlanmıştır.



Şekil 16. Kontrol Paneli

Kaynaklar

- Alpay, T. 2021. Düşük Maliyetli DTMF tabanlı akıllı sulama sistemi. Computer Science, (Special), 242-249.
- Bisconer I. 2008. Maximize drip irrigation benefits by automating, Toro Micro-Irrigation.
- Castanon, G. 1992. The automation irrigation, Maquinas Tractors Agrícolas 3 (2), 45-49.
- DSİ 2025. https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/dsi_2023_yili_faaliyet_raporu.pdf#page=40 (İndirme Tarihi: 22.04.2025)
- Kurt, C., Yılmaztürk, İ., Okur, F., Menemen, A., Bahtiyar, B., & İplikçi, S. (2022). Nesnelerin İnterneti Tabanlı Tarımsal Sulama Otomasyon Sistemi Geliştirilmesi. *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 149-153.
- Mulas, P. 1986. Developments in the automation of irrigation. *Culture Protelle* 15(6), 17-19.
- Pardossi A., Incrocci L., Incrocci G., Malorgio F., Battista P., Bacci L., Rapi B., Marzalletti P., Hemming J., ve Balendonck J. 2009. Root Zone Sensors for Irrigation Management in Intensive Agriculture, *Sensors* 9, 2809-2835.
- Sne, M. 2006. ICT in water supply and irrigation management, Center for International Agricultural Development Cooperation, Ministry of Agriculture and Rural.
- Şahin, H. 2024. Tarımsal Akıllı Sulama Sistemlerinde Yapay Zekâ, Derin Öğrenme ve Nesnelerin İnterneti Uygulamaları. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 20(1), 41-60.
- Zazueta, F.S., Smajstrla, A.G., Clark, G.A. 2002. Irrigation System Controllers. IFAS Extension, Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Gainesville, FL 32611.

7. Bölüm

Damla Sulama Sistemlerinden Kaynaklanan Plastik Kirliliği ve Türkiye ile Akdeniz Bölgesi İçin Yenilikçi, Sürdürülebilir Çözüm Stratejileri

Servet TEKİN¹

1. Giriş

Dünya nüfustaki artış, iklim değişikliği ve su kaynakları üzerindeki baskının giderek yoğunlaşması, tarımsal üretimde suyun daha verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, gıda güvenliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda geliştirilen modern sulama yöntemleri arasında yer alan damla sulama sistemleri, suyun doğrudan bitki kök bölgesine kontrollü olarak verilmesini sağlayarak su kullanım etkinliğini artırmaktadır. Gopal ve ark. (2026), damla sulama sistemlerinin geleneksel yüzey sulama yöntemlerine göre önemli ölçüde su tasarrufu sağladığını ve bitkisel üretimde verim artışına katkıda bulunduğunu belirtmektedir. Benzer şekilde FAO (2023), dünya genelinde yaklaşık 22 milyon hektarlık tarım alanında damla sulama teknolojilerinin kullanıldığını bildirmektedir.

Türkiye’de de son yıllarda modern sulama uygulamalarının yaygınlaştırılmasına yönelik politikalar ve destek programları sayesinde damla sulama sistemlerinin kullanımında önemli artışlar yaşanmıştır. Tarım ve Orman Bakanlığı (2025) verilerine göre yaklaşık 3,2 milyon hektarlık tarım alanında damla sulama sistemleri kullanılmaktadır. Özellikle Akdeniz Bölgesi’nde yoğun olarak gerçekleştirilen narenciye, örtü altı sebzeçilik, muz ve avokado yetiştiriciliği gibi üretim faaliyetleri, suyun etkin kullanımını zorunlu kılmakta ve damla sulama teknolojilerinin yaygınlaşmasını teşvik etmektedir. Bununla birlikte, damla sulama sistemlerinin yaygın kullanımı çevresel açıdan bazı yeni sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sistemlerde kullanılan borular, damlatıcılar, filtreler ve bağlantı elemanları çoğunlukla polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) gibi sentetik polimerlerden üretilmektedir. Geyer ve ark. (2017), bu polimerlerin dayanıklı olmalarına rağmen doğal ortamda oldukça yavaş bozunduklarını ve uzun süre çevrede

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü, servettekin@ksu.edu.tr

kalabildiklerini belirtmektedir. Kullanım süresi boyunca güneş ışınımı, sıcaklık değişimleri, mekanik aşınma ve kimyasal etkilere maruz kalan plastik ekipmanlar zamanla fiziksel bozulmaya uğramakta ve mikroplastik oluşumuna zemin hazırlamaktadır (Rillig ve Lehmann, 2020).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan mikroplastik kirliliğinin yalnızca bir atık yönetimi sorunu olmadığını, aynı zamanda toprak ve su ekosistemleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermektedir. deSouza Machado ve ark. (2018), mikroplastiklerin toprak yapısını ve su hareketini değiştirebildiğini, Tian ve ark. (2021) ise bu parçacıkların ağır metaller ve pestisitler gibi kirleticileri adsorbe ederek çevresel riskleri artırabildiğini bildirmiştir. Ayrıca Horton ve Dixon'a (2018) göre tarım alanlarından taşınan mikroplastikler, yüzey suları ve yeraltı sularına ulaşarak sucul ekosistemlerde de yaygın bir kirlilik kaynağı oluşturmaktadır.

Bu çalışma, damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliğinin oluşum mekanizmalarını, toprak ve su ekosistemleri üzerindeki etkilerini ve Akdeniz Bölgesi özelindeki ekolojik ve ekonomik sonuçlarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca mevcut yönetim yaklaşımları, biyobozunur malzemeler ve yenilikçi teknolojiler ışığında sürdürülebilir çözüm seçenekleri tartışılarak geleceğe yönelik politika önerileri sunulmaktadır.

2. Damla Sulama Sistemlerinde Plastik Kirliliğinin Kaynakları

Damla sulama sistemleri, suyun bitki kök bölgesine kontrollü ve düşük debili olarak iletilmesini sağlayan modern sulama teknolojileri arasında yer almaktadır. Su kullanım etkinliğini artırması, gübre kayıplarını azaltması ve verimliliği yükseltmesi nedeniyle dünya genelinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Gopal ve ark., 2026). Bununla birlikte, bu sistemlerin büyük ölçüde plastik esaslı bileşenlerden oluşması, kullanım süreci ve sonrasında önemli miktarda plastik atığın ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, tarımsal plastik kirliliğinin en önemli kaynaklarından birinin damla sulama sistemleri olduğunu göstermektedir (FAO, 2021).

Damla sulama altyapısı; lateral borular, ana iletim hatları, damlatıcılar, filtreler, vanalar ve çeşitli bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Bu bileşenlerin üretiminde çoğunlukla polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) gibi sentetik polimerler kullanılmaktadır. Geyer ve ark. (2017), bu malzemelerin dayanıklılık ve düşük maliyet avantajları nedeniyle yaygın tercih edildiğini, ancak doğada bozunma sürelerinin oldukça uzun olduğunu belirtmektedir. Özellikle mevsimlik tarımsal üretim yapılan alanlarda kullanılan ince çaplı lateral boruların kullanım ömrü kısa olmakta ve her üretim sezonunun sonunda önemli miktarda plastik atık ortaya çıkmaktadır.

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliği yalnızca kullanım ömrünü tamamlamış ekipmanlardan oluşmamaktadır. Sulama sezonu boyunca plastik materyaller sürekli olarak güneş ışınımı, sıcaklık değişimleri, mekanik gerilmeler ve sulama suyunda bulunan kimyasal bileşiklerin etkisi altında kalmaktadır. Rillig ve Lehmann'a (2020) göre bu çevresel faktörler plastik yüzeylerinde çatlaklar ve yapısal bozulmalar oluşturarak parçalanma süreçlerini hızlandırmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık ve yoğun ultraviyole ışınımının görüldüğü Akdeniz iklim koşullarında bu bozunma süreci daha hızlı gerçekleşmektedir (Hanifah ve ark, 2024).

Plastik kirliliğinin önemli bir diğer kaynağı ise kullanım sonrası atık yönetimindeki yetersizliklerdir. Türkiye'de tarımsal plastik atıkların önemli bir kısmı geri dönüşüm sistemine dahil edilememekte, çoğu zaman tarla kenarlarında biriktirilmekte veya açık alanda yakılmaktadır (Doru ve Atış, 2025). Gündoğdu ve ark. (2022), kırsal alanlarda plastik atık toplama ve geri dönüşüm altyapısının yetersiz olmasının bu sorunun temel nedenlerinden biri olduğunu belirtmektedir. Kontrolsüz şekilde çevreye bırakılan plastik ekipmanlar zamanla fiziksel ve kimyasal bozunmaya uğrayarak daha küçük parçacıklara ayrılmakta ve çevrede kalıcı kirlilik oluşturmaktadır.

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliğinin en kritik boyutlarından biri mikropplastik ve nanoplastik oluşumudur. deSouza Machado ve ark. (2018), sulama ekipmanlarının kullanım sırasında aşınması sonucu oluşan plastik parçacıkların doğrudan toprak ortamına taşındığını bildirmektedir. Benzer şekilde Rillig ve ark. (2019), damlatıcı kanalları ve boru yüzeylerinde meydana gelen aşınmaların mikropplastik oluşumunu artırdığını ve bu parçacıkların sulama suyu aracılığıyla kök bölgesinde biriktiğini ortaya koymuştur. Bu durum, damla sulama sistemlerini yalnızca plastik tüketen bir teknoloji olmaktan çıkararak aynı zamanda mikropplastiklerin çevreye yayılmasında aktif bir kaynak haline getirmektedir.

2.1. Damla Sulama Kaynaklı Plastik Atıklar

Damla sulama sistemleri, yüksek su kullanım verimliliği sağlamaları nedeniyle modern tarımın vazgeçilmez teknolojileri arasında yer almakla birlikte, yoğun plastik kullanımına bağlı olarak önemli miktarda atık oluşumuna neden olmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan lateral borular, ana iletim hatları, damlatıcılar, filtreler, vanalar ve bağlantı elemanları çoğunlukla polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) gibi sentetik polimerlerden üretilmektedir. Geyer ve ark. (2017), bu malzemelerin dayanıklılık, esneklik ve düşük maliyet avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edildiğini, ancak kullanım ömürlerinin sonunda önemli bir çevresel yük oluşturduğunu belirtmektedir.

Tarımsal sulama sistemlerinde en yaygın kullanılan malzeme polietilendir. Özellikle ince cidarlı lateral borular, ekonomik olmaları nedeniyle mevsimlik üretim yapılan alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak bu boruların kullanım ömrü genellikle bir ila birkaç üretim sezonu ile sınırlıdır. Hanifah ve ark., 2024'e göre yüksek sıcaklık, yoğun ultraviyole ışınımı ve mekanik zorlanmalar, plastik ekipmanların fiziksel dayanımını azaltarak erken deformasyon ve kırılmalara neden olmaktadır. Bu nedenle birçok üretici, kullanım ömrünü tamamlayan ekipmanları her sezon yenilemek zorunda kalmaktadır.

Türkiye'de son yıllarda damla sulama sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte tarımsal plastik tüketiminde de önemli artışlar yaşanmıştır. Tarım alanlarında kullanılan damla sulama altyapısı, her yıl büyük miktarda plastik atığın oluşmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, tarımsal plastik atıkların önemli bir bölümü geri dönüşüm sistemine kazandırılamamaktadır. (Doru ve Atış, 2025), özellikle toprak, gübre ve pestisit kalıntılarıyla kirlenmiş sulama ekipmanlarının geri dönüşüm maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle çoğu zaman ekonomik olarak değerlendirilemediğini belirtmektedir.

Damla sulama kaynaklı plastik atıkların yönetimindeki en önemli sorunlardan biri, bu atıkların dağınık ve yaygın bir şekilde oluşmasıdır. Endüstriyel plastik atıkların aksine, tarımsal plastikler geniş üretim alanlarına dağılmış durumdadır ve toplanmaları önemli lojistik zorluklar içermektedir. FAO (2021), birçok ülkede kullanım ömrünü tamamlayan sulama ekipmanlarının tarla kenarlarında depolandığını, gömüldüğünü veya açık alanda yakıldığını bildirmektedir. Bu uygulamalar hem çevresel kirliliği artırmakta hem de toprak, hava ve su kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır.

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik atıklar yalnızca hacimsel bir atık sorunu oluşturmamakta, aynı zamanda mikroplastik oluşumunun da temel kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir. Kullanım süresince aşınan ve parçalanmış plastik ekipmanlardan kopan küçük parçacıklar doğrudan tarım toprağına karışmakta ve uzun süre çevrede kalabilmektedir (deSouza Machado ve ark., 2018). Bu nedenle damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik atıkların etkin biçimde yönetilmesi, yalnızca atık miktarının azaltılması açısından değil, aynı zamanda mikroplastik kirliliğinin önlenmesi bakımından da büyük önem taşımaktadır.

2.2. Mikroplastik Oluşumu ve Yayılımı

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliğinin en önemli boyutlarından biri, kullanım sürecinde ve sonrasında ortaya çıkan mikroplastik ve nanoplastik oluşumudur. Mikroplastikler genellikle 5 mm'den küçük plastik

parçacıklar olarak tanımlanırken, nanoplastikler 100 nm'den daha küçük boyutlara sahip parçacıkları ifade etmektedir (Rillig ve Lehmann, 2020). Bu parçacıklar, çevreye doğrudan salınan birincil mikroplastiklerden farklı olarak, büyük plastik materyallerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler sonucunda parçalanmasıyla oluşan ikincil mikroplastikler şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Damla sulama sistemlerinde kullanılan polietilen (PE), polipropilen (PP) ve PVC esaslı materyaller, kullanım süreleri boyunca yoğun çevresel stres faktörlerine maruz kalmaktadır. Ultraviyole (UV) ışınımı, sıcaklık dalgalanmaları, mekanik aşınma, basınç değişimleri ve sulama suyundaki kimyasal bileşenler, polimer zincirlerinde bozulmalara neden olarak plastiklerin kırılganlaşmasını hızlandırmaktadır (Wijesooriya ve ark., 2023). Özellikle yüksek güneşlenme süresine sahip bölgelerde fotooksidatif bozunma süreçleri daha hızlı gerçekleşmekte ve plastik yüzeylerden sürekli olarak küçük parçacıklar kopmaktadır.

Mikroplastik oluşumunda damla sulama ekipmanlarının çalışma koşulları da önemli rol oynamaktadır. Sulama sırasında boru iç yüzeylerinde meydana gelen sürtünme, damlatıcı kanallarındaki hidrodinamik aşınma ve sistem içerisindeki partikül hareketleri plastik materyallerin zamanla yıpranmasına neden olmaktadır. deSouza Machado ve ark. (2018), bu aşınma sonucunda ortaya çıkan plastik parçacıkların sulama suyu ile birlikte doğrudan bitki kök bölgesine taşındığını bildirmiştir. Benzer şekilde Rillig ve ark. (2019), damla sulama sistemlerinin yalnızca plastik tüketen bir teknoloji değil, aynı zamanda aktif bir mikroplastik dağıtım mekanizması olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Oluşan mikroplastikler toprak ortamında birikmekle kalmamakta, çeşitli taşıma mekanizmaları aracılığıyla daha geniş ekosistemlere yayılabilmektedir. Horton ve Dixon'a (2018) göre yağışlar, yüzey akışı, erozyon ve drenaj sistemleri, mikroplastiklerin tarım alanlarından uzaklaşarak nehirler, göller ve yeraltı su kaynaklarına taşınmasına neden olmaktadır. Böylece başlangıçta lokal ölçekte ortaya çıkan plastik kirliliği zamanla bölgesel ve hatta küresel boyutta çevresel bir soruna dönüşebilmektedir.

Mikroplastiklerin çevresel risklerini artıran bir diğer özellik ise yüksek yüzey alanlarına sahip olmalarıdır. Tian ve ark. (2021), mikroplastiklerin ağır metaller, pestisit kalıntıları ve çeşitli organik kirleticileri adsorbe ederek çevredeki toksik maddelerin taşınımını kolaylaştırdığını belirtmiştir. Bu durum, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel bir kirletici değil, aynı zamanda kirleticilerin yayılımında etkili bir taşıyıcı olarak da işlev gördüğünü göstermektedir. Sonuç olarak damla sulama sistemlerinden kaynaklanan mikroplastik oluşumu ve yayılımı, toprak ve su ekosistemlerinde uzun süreli çevresel etkiler yaratabilecek önemli bir kirlilik mekanizması olarak değerlendirilmektedir.

3. Plastik Atıkların Toprak ve Su Ekosistemlerine Etkileri

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik atıklar ve bunların parçalanmasıyla oluşan mikroplastikler, tarımsal ekosistemlerde giderek artan bir çevresel baskı unsuru haline gelmiştir. Uzun süre çevrede kalabilmeleri, fiziksel ve kimyasal özelliklerini büyük ölçüde koruyabilmeleri ve farklı çevresel ortamlarda taşınabilmeleri nedeniyle bu kirleticiler hem toprak hem de su ekosistemlerini etkilemektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin toprak yapısını, mikrobiyal faaliyetleri, besin döngülerini ve su kalitesini olumsuz etkileyerek ekosistem fonksiyonlarında bozulmalara yol açtığını ortaya koymaktadır (Rillig ve Lehmann, 2020; Wijesooriya ve ark., 2023). Bu etkiler özellikle yoğun sulama uygulamalarının gerçekleştirildiği tarımsal üretim alanlarında daha belirgin hale gelmektedir.

3.1. Toprak Ekosistemleri Üzerindeki Etkiler

Toprak, bitkisel üretimin temel ortamı olmasının yanı sıra çok sayıda fiziksel, kimyasal ve biyolojik sürecin gerçekleştiği karmaşık bir ekosistemdir. Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan mikro ve nanoplastikler, toprak ortamında birikerek bu süreçleri farklı mekanizmalar aracılığıyla etkilemektedir. Araştırmalar, plastik kökenli parçacıkların toprak yapısını değiştirdiğini, kirleticilerin taşınımını kolaylaştırdığını ve toprak biyotasının işleyişini bozduğunu göstermektedir (Iqbal ve ark., 2028; Zang ve ark., 2020). Bu nedenle mikroplastik kirliliği, günümüzde tarım topraklarının sürdürülebilirliği açısından önemli çevresel risklerden biri olarak kabul edilmektedir.

3.1.1. Fiziksel Etkiler

Damla sulama sistemlerinde kullanılan plastik ekipmanlar zamanla parçalanarak toprakta mikro ve nanoplastik birikimine neden olmaktadır. Bu parçacıklar, toprak agregatlarının yapısını ve stabilitesini olumsuz etkileyerek fiziksel özelliklerde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Iqbal ve ark. (2028), mikroplastiklerin agregatlar arasındaki bağlanmayı zayıflattığını ve bunun sonucunda toprak porozitesi, hidrolik iletkenlik ve infiltrasyon kapasitesinde azalmalar meydana geldiğini bildirmiştir. Toprak yapısındaki bu değişimler, su ve hava hareketinin kısıtlanmasına neden olarak bitki gelişimini doğrudan etkilemektedir.

Mikroplastikler ayrıca toprak gözenek sistemini değiştirerek kök bölgesindeki su dağılımını ve oksijen transferini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Özellikle düzensiz şekilli plastik parçacıkların makro ve mikro gözenekleri kısmen tıkaması, suyun toprak profilindeki hareketini sınırlandırmakta ve köklerin ihtiyaç duyduğu oksijen miktarını azaltmaktadır (Wijesooriya ve ark., 2023). Bu

durum kök uzunluğu, kök hacmi ve ince kök gelişimi gibi morfolojik özelliklerde gerilemeye yol açabilmektedir.

Toprak-su ilişkileri üzerindeki etkiler, kurak ve yarı kurak bölgelerde daha belirgin hale gelmektedir. Bakhshae ve ark. (2025), mikroplastik birikiminin toprağın su tutma kapasitesini azaltarak faydalı su miktarında düşüşe neden olduğunu bildirmiştir. Bunun sonucunda toprak nemi daha hızlı azalmakta ve bitkilerde su stresi daha erken ortaya çıkmaktadır. Ayrıca çimlenme döneminde suyun tohum çevresinde tutulmasını zorlaştıran mikroplastikler, fide gelişimini ve bitki çıkış oranlarını da olumsuz etkileyebilmektedir.

3.1.2. Kimyasal Etkiler

Mikro ve nanoplastikler, yalnızca fiziksel kirleticiler olarak değil, aynı zamanda çeşitli çevresel kirleticilerin taşınmasında rol oynayan kimyasal vektörler olarak da değerlendirilmektedir. Polietilen (PE), polipropilen (PP) ve PVC gibi polimerler, hidrofobik yüzey özellikleri sayesinde ağır metaller, pestisit kalıntıları, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) ve endokrin bozucu bileşikler gibi kirleticileri adsorbe edebilmektedir. Hahladakis ve ark. (2018), mikroplastiklerin yüksek özgül yüzey alanları nedeniyle bu kirleticilerin çevrede daha uzun süre kalmasına ve biyoyararlanımlarının artmasına neden olduğunu belirtmiştir. Bu durum, tarım topraklarında kirletici yükünün zamanla artmasına ve çevresel risklerin büyümesine yol açmaktadır.

Toprak ortamına giren mikroplastik-kirletici kompleksleri, kirleticilerin hareketliliğini ve yayılımını artırmaktadır. Luo ve ark. (2025) göre plastik yüzeylerine bağlanan pestisitler ve ağır metaller, toprak profilinde daha geniş alanlara taşınabilmekte ve rizosfer bölgesinde birikebilmektedir. Özellikle ağır metallerin değişen pH ve redoks koşulları altında yeniden serbest kalabilmesi, bitki kökleri tarafından alınma riskini artırmaktadır. Bu durum yalnızca bitki gelişimini olumsuz etkilemekle kalmamakta, aynı zamanda gıda zinciri yoluyla insan sağlığı açısından da potansiyel risk oluşturmaktadır.

Mikroplastikler, toprakta gerçekleşen biyogeo-kimyasal süreçleri de doğrudan etkileyebilmektedir. Wijesooriya ve ark. (2023), mikroplastiklerin ve taşıdıkları toksik bileşiklerin nitrifikasyon, denitrifikasyon ve karbon mineralizasyonu gibi temel süreçlerden sorumlu mikroorganizmalar üzerinde baskılayıcı etki oluşturduğunu bildirmiştir. Bu baskı sonucunda dehidrogenaz, üreaz, fosfataz ve β -glukosidaz gibi toprak verimliliği açısından kritik öneme sahip enzimlerin aktivitelerinde azalma meydana gelmektedir. Enzim aktivitelerindeki bu düşüş, organik maddenin parçalanmasını ve besin elementlerinin bitkiler tarafından kullanılabilir formlara dönüşümünü yavaşlatmaktadır.

Azot ve karbon döngüleri üzerindeki etkiler, tarımsal üretim açısından özel önem taşımaktadır. Liu ve ark. (2024), mikroplastik kirliliğinin nitrifikasyon sürecinde görev alan mikroorganizma topluluklarını olumsuz etkileyerek amonyumun nitrat formuna dönüşümünü yavaşlattığını belirtmiştir. Benzer şekilde, organik karbonun ayrışmasında görev alan heterotrofik mikroorganizmalardaki azalma, karbon mineralizasyonunu ve toprak solunumunu sınırlandırmaktadır. Bu süreçler sonucunda besin maddelerinin döngüsü yavaşlamakta, toprak verimliliği düşmekte ve bitkilerin besin elementlerinden yararlanma kapasitesi azalmaktadır.

3.1.3. Biyolojik Etkiler

Mikro ve nanoplastikler, toprak ekosistemlerinde yaşayan mikroorganizmalardan makrofaunaya kadar geniş bir biyolojik topluluğu etkileyerek ekosistem işleyişinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Toprak biyotası, organik madde ayrışması, besin döngüleri, karbon depolanması ve bitki beslenmesi gibi temel ekosistem süreçlerinin sürdürülmesinde kritik rol oynamaktadır. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar, mikroplastik birikiminin toprak biyolojik çeşitliliği ve fonksiyonları üzerinde önemli baskılar oluşturduğunu göstermektedir (Zang ve ark., 2023).

Mikroplastikler öncelikle toprak mikrobiyal topluluklarının yapısını ve çeşitliliğini değiştirmektedir. Özellikle bitki gelişiminde önemli rol oynayan mikoriza mantarları ile azot bağlayıcı bakterilerin faaliyetleri mikroplastik kirliliğinden olumsuz etkilenmektedir. Zang ve ark. (2023), mikroplastiklerin mikoriza kolonizasyon oranlarını düşürdüğünü ve Rhizobium ile Azotobacter gibi azot fiksasyonu gerçekleştiren bakterilerin aktivitesini azalttığını bildirmiştir. Bu durum, bitkilerin besin maddelerine erişimini sınırlandırmakta ve büyüme performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

Toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkiler de biyolojik işleyiş açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır. Mikroplastiklerin neden olduğu stres koşulları, fosfataz, dehidrogenaz, selüloz ve β -glukosidaz gibi enzimlerin aktivitelerinde azalmaya yol açmaktadır. Shah ve ark. (2023), bu enzimlerde meydana gelen düşüşlerin organik madde ayrışmasını ve besin elementlerinin mineralizasyonunu yavaşlattığını belirtmiştir. Sonuç olarak karbon, azot ve fosfor döngülerinin işleyişi zayıflamakta, toprak verimliliğinin sürdürülebilirliği olumsuz etkilenmektedir.

Mikroplastikler yalnızca mikrobiyal organizmaları değil, aynı zamanda toprak faunasını da doğrudan etkilemektedir. Solucanlar, nematodlar ve diğer detritivor organizmalar plastik parçacıkları besin zannederek tüketebilmektedir. Ya ve ark. (2021), mikroplastik alımının bu organizmalarda sindirim sistemi bozuklukları,

oksidatif stres, enerji kaybı ve üreme başarısında azalma gibi etkiler oluşturduğunu bildirmiştir. Özellikle solucan popülasyonlarında meydana gelen azalma, toprak agregat oluşumu, biyolojik karışım (bioturbasyon) ve organik madde dönüşümü gibi süreçleri olumsuz etkilemektedir.

Toprak biyotasında meydana gelen bu değişimler, ekosistem hizmetlerinin zayıflamasına neden olmaktadır. Besin döngülerinin yavaşlaması, organik madde ayrışmasının azalması ve biyolojik çeşitlilikteki kayıplar; toprak sağlığını, bitki üretkenliğini ve karbon depolama kapasitesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle mikroplastik kirliliği, yalnızca bireysel organizmalar üzerinde değil, tüm bitki-mikrop-fauna etkileşim ağları üzerinde etkili olan ve tarımsal ekosistemlerin sürdürülebilirliğini tehdit eden önemli bir biyolojik stres faktörü olarak değerlendirilmektedir.

Su Ekosistemleri Üzerindeki Etkileri

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan mikro ve nanoplastikler, yalnızca tarım topraklarında birikmekle kalmamakta, çeşitli taşınım mekanizmaları aracılığıyla yüzey ve yeraltı su kaynaklarına da ulaşabilmektedir. Yağışlar, yüzey akışı, drenaj suları ve erozyon süreçleri, tarım alanlarında biriken plastik parçacıkların su ortamlarına taşınmasında temel rol oynamaktadır. Horton ve Dixon (2018), tarımsal alanların mikroplastiklerin tatlı su ekosistemlerine taşınmasında önemli kaynaklardan biri olduğunu belirtmiştir. Bu durum, başlangıçta karasal ortamda ortaya çıkan kirliliğin zamanla nehir, göl, baraj ve kıyısız ekosistemlere yayılmasına neden olmaktadır.

Su ortamlarına ulaşan mikroplastikler, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle uzun süre çevrede kalabilmektedir. Düşük yoğunluğa sahip plastik parçacıklar su yüzeyinde taşınırken, daha yoğun veya biyofilm tabakasıyla kaplanan parçacıklar su kolonunda askıda kalabilmekte ya da sedimentlere çökmektedir (Yang ve ark., 2025). Böylece mikroplastikler, su ekosistemlerinin farklı bileşenlerinde birikerek geniş bir canlı grubunu etkileyebilmektedir.

Mikroplastiklerin en önemli etkilerinden biri sucul organizmalar tarafından tüketilmeleridir. Balıklar, kabuklular, yumuşakçalar ve planktonik organizmalar bu parçacıkları besin olarak algılayarak bünyelerine alabilmektedir. Wright ve Kelly (2017), mikroplastiklerin sindirim sisteminde birikerek beslenme davranışlarını, büyüme performansını ve enerji kullanımını olumsuz etkilediğini bildirmiştir. Ayrıca plastik parçacıkların fiziksel tahriş, doku hasarı ve oksidatif stres oluşturabildiği belirtilmektedir. Bu etkiler, bireysel organizmalardan başlayarak popülasyon ve ekosistem düzeyine kadar uzanan sonuçlar doğurabilmektedir.

Mikroplastikler aynı zamanda çeşitli kirleticiler için taşıyıcı görevi görmektedir. Tourinho ve ark. (2019), plastik yüzeylerinde biriken ağır metaller, pestisitler ve kalıcı organik kirleticilerin sucul canlıların bünyesine geçerek toksik etkileri artırabileceğini belirtmiştir. Bu durum, kirleticilerin besin zinciri boyunca taşınmasına ve biyobirikim riskinin yükselmesine neden olmaktadır. Özellikle ekonomik değere sahip balık türlerinde görülen mikroplastik birikimi, insan sağlığı açısından da dikkat çekici bir sorun olarak değerlendirilmektedir.

Su kalitesi üzerindeki etkiler de giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Mikroplastikler suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilmekte, mikrobiyal toplulukların yapısını etkileyebilmekte ve bazı patojen mikroorganizmalar için yaşam alanı oluşturabilmektedir. Bu durum, su kaynaklarının ekolojik durumunu bozarken aynı zamanda sulama, içme suyu temini ve balıkçılık gibi faaliyetler üzerinde de olumsuz sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir ((Hanifah ve ark., 2024).

4.1. Ekosistem Üzerindeki Etkiler

Akdeniz Bölgesi'nde yoğun olarak kullanılan damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik atıklar, başta tarım toprakları olmak üzere çeşitli ekosistem bileşenleri üzerinde baskı oluşturmaktadır. Bölgenin yüksek güneşlenme süresi ve sıcaklık koşulları, plastik materyallerin fotooksidatif bozunmasını hızlandırmakta ve mikroplastik oluşumunu artırmaktadır (Wijesooriya ve ark., 2023). Oluşan mikroplastikler zamanla toprakta birikerek fiziksel yapıyı, mikrobiyal faaliyetleri ve besin döngülerini olumsuz etkilemektedir.

Akdeniz havzasında görülen düzensiz ve zaman zaman şiddetli yağışlar, mikroplastiklerin yüzey akışıyla tarım alanlarından uzaklaşmasını kolaylaştırmaktadır. Bu süreç sonucunda plastik parçacıklar drenaj kanalları, akarsular, sulama rezervuarları ve kıyısız ekosistemlere taşınabilmektedir (Horton ve Dixon, 2018). Böylece başlangıçta tarımsal üretim alanlarıyla sınırlı olan kirlilik, daha geniş ekolojik sistemlere yayılmaktadır.

Mikroplastiklerin toprak ve su ortamlarında birikmesi, bölgedeki biyolojik çeşitlilik üzerinde de olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Mikrobiyal topluluklarda meydana gelen değişimler, organik madde ayrışması ve besin döngülerinin yavaşlamasına neden olurken; toprak faunasında görülen azalmalar ekosistem işleyişini zayıflatmaktadır (Zang ve ark., 2020). Benzer şekilde sucul ortamlara ulaşan plastik parçacıklar, balıklar ve diğer sucul organizmalar tarafından tüketilerek ekolojik riskleri artırmaktadır.

4.2. Ekonomik Etkiler

Damla sulama sistemleri, su tasarrufu ve verim artışı sağlayarak tarımsal üretime önemli katkılar sunmasına rağmen, bu sistemlerden kaynaklanan plastik kirliliği çeşitli ekonomik maliyetleri de beraberinde getirmektedir. Kullanım ömrünü tamamlayan sulama ekipmanlarının yenilenmesi, toplanması, taşınması ve geri dönüştürülmesi süreçleri üreticiler için ek mali yük oluşturmaktadır. Özellikle küçük ölçekli işletmelerde geri dönüşüm altyapısının yetersiz olması nedeniyle plastik atıkların etkin şekilde yönetilememesi, ekonomik kayıpları artırmaktadır (FAO, 2021).

Mikroplastiklerin toprak kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri, uzun vadede tarımsal verimlilikte düşüşlere neden olabilmektedir. Toprak yapısının bozulması, su tutma kapasitesinin azalması ve besin döngülerindeki aksaklıklar bitki gelişimini sınırlandırarak ürün miktarı ve kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Bakhshae ve ark., 2025). Verim kayıpları, özellikle yüksek katma değerli ürünlerin yetiştirildiği Akdeniz Bölgesi'nde üreticilerin gelirlerinde azalmaya yol açabilecek önemli bir risk olarak değerlendirilmektedir.

Plastik kirliliğinin ekonomik etkileri yalnızca tarımsal üretimle sınırlı değildir. Mikroplastiklerin su kaynaklarına taşınması, sulama suyu kalitesinin korunması ve arıtma süreçleri için ek maliyetler doğurabilmektedir. Ayrıca sucul ekosistemlerde meydana gelen bozulmaların balıkçılık, rekreasyon ve turizm gibi ekonomik faaliyetler üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği belirtilmektedir ((Hanifah ve ark, 2024). Akdeniz kıyılarında çevresel kirliliğin artması, bölgenin doğal kaynak değerleri üzerinde de baskı yaratmaktadır.

Atık yönetimi ve çevresel rehabilitasyon çalışmaları da önemli maliyet kalemleri arasında yer almaktadır. Tarımsal plastik atıkların toplanması, ayrıştırılması ve geri dönüştürülmesi için gerekli altyapının kurulması önemli yatırımlar gerektirmektedir. Bununla birlikte, plastik kirliliğinin önlenmesine yönelik harcamaların uzun vadede çevresel zararların giderilmesi için yapılacak harcamalardan daha düşük olduğu vurgulanmaktadır (Macheca ve ark., 2024). Bu nedenle etkin atık yönetimi sistemlerinin geliştirilmesi, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

5. Mevcut Yönetim Yaklaşımları ve Yetersizlikler

Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan plastik atıkların çevresel etkilerinin artmasıyla birlikte, birçok ülkede bu atıkların yönetimine yönelik çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik atıkların yönetiminde temel yaklaşım; atık oluşumunun azaltılması, kullanım ömrünü tamamlayan ekipmanların toplanması, geri dönüştürülmesi ve uygun bertaraf yöntemlerinin uygulanmasıdır. Avrupa Birliği başta olmak üzere birçok

ülkede döngüsel ekonomi yaklaşımı çerçevesinde tarımsal plastiklerin geri kazanımını teşvik eden politikalar yürürlüğe konulmuştur (Tumu ve ark, 2023).

Geri dönüşüm, damla sulama kaynaklı plastik atıkların yönetiminde en yaygın uygulanan yöntemlerden biridir. Polietilen ve polipropilen esaslı sulama ekipmanları teknik olarak geri dönüştürülebilmekte ve yeni plastik ürünlerin üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Ancak tarımsal alanlardan toplanan plastiklerin çoğu zaman toprak, organik madde, gübre ve pestisit kalıntılarıyla kirlenmiş olması geri dönüşüm süreçlerini zorlaştırmaktadır.

Türkiye’de tarımsal plastik atıkların yönetimine ilişkin çeşitli yasal düzenlemeler bulunmasına rağmen uygulamada önemli eksiklikler devam etmektedir. Tarım ve Orman Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen çalışmalar kapsamında atıkların kaynağında ayrıştırılması ve geri kazanılması teşvik edilse de kırsal alanlarda toplama altyapısının yetersiz olması önemli bir sorun oluşturmaktadır (Gündoğdu ve ark. (2022). Özellikle küçük ve dağınık işletmelerde kullanım ömrünü tamamlayan sulama ekipmanlarının düzenli şekilde toplanması ve geri dönüşüm tesislerine ulaştırılması çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

Mevcut yönetim sistemlerinin karşılaştığı en önemli sorunlardan biri ekonomik sürdürülebilirliktir. Tarımsal plastik atıkların toplanması, taşınması ve işlenmesi süreçleri yüksek lojistik maliyetler gerektirmektedir. Macheca ve ark. (2024) göre birçok bölgede geri dönüştürülmüş plastiklerin ekonomik değerinin düşük olması, üreticilerin ve geri dönüşüm işletmelerinin sürece katılımını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle bazı üreticiler kullanım ömrünü tamamlayan plastikleri tarla kenarlarında depolamakta, toprağa gömmekte veya açık alanda yakmaktadır. Bu uygulamalar ise çevresel kirliliği daha da artırmaktadır. Bir diğer önemli yetersizlik, mikroplastik kirliliğinin mevcut yönetim stratejilerinde yeterince dikkate alınmamasıdır. Günümüzdeki uygulamalar çoğunlukla görünür plastik atıkların toplanmasına odaklanırken, çevreye yayılmış mikro ve nanoplastiklerin izlenmesi ve kontrolüne yönelik sistemler oldukça sınırlıdır ((Hanifah ve ark, 2024). Oysa damla sulama ekipmanlarının kullanım sürecinde dahi mikroplastik oluşabildiği bilinmektedir. Bu durum, yalnızca atık yönetimine dayalı yaklaşımların sorunun çözümünde yeterli olmadığını göstermektedir.

6. Sürdürülebilir Çözüm Yaklaşımları

Damla sulama sistemlerinin sağladığı tarımsal avantajların korunabilmesi ve plastik kirliliğinin azaltılabilmesi için sürdürülebilir çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda biyobozunur malzemeler, yenilikçi sulama teknolojileri, geri dönüşüm sistemlerinin güçlendirilmesi ve döngüsel ekonomi temelli uygulamalar bu alanda öne çıkan stratejiler arasında

yer almaktadır. Bu yaklaşımlar yalnızca plastik atık miktarını azaltmayı değil, aynı zamanda mikroplastik oluşumunu önlemeyi ve doğal kaynakların daha etkin kullanılmasını amaçlamaktadır.

6.1. Biyobozunur ve Alternatif Malzemeler

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliğinin azaltılmasına yönelik en umut verici yaklaşımlardan biri, geleneksel petrol bazlı polimerlerin yerine biyobozunur ve çevre dostu malzemelerin kullanılmasıdır. Geleneksel polietilen ve PVC esaslı ürünler doğada yüzlerce yıl kalabilirken, biyobozunur polimerler belirli çevresel koşullar altında mikroorganizmalar tarafından parçalanarak su, karbondioksit ve biyokütleye dönüşebilmektedir (Tumu ve ark, 2023). Bu özellikleri sayesinde çevrede kalıcı plastik birikiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Tarımsal uygulamalarda en yaygın araştırılan biyobozunur materyaller arasında polilaktik asit (PLA), polihidroksialkanoatlar (PHA) ve nişasta bazlı biyoplastikler yer almaktadır. Miles ve ark. (2017), bu materyallerin uygun koşullarda geleneksel plastiklere kıyasla çok daha hızlı bozunabildiğini ve çevresel yükü azaltabildiğini belirtmektedir. Özellikle kısa ömürlü tarımsal ekipmanlarda ve tek sezonluk uygulamalarda biyobozunur malzemelerin kullanımı önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Biyobozunur malzemelerin yanı sıra geri dönüştürülmüş hammaddelerden üretilen alternatif ürünler de plastik tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Döngüsel ekonomi yaklaşımı kapsamında, kullanım ömrünü tamamlamış sulama ekipmanlarından elde edilen geri dönüştürülmüş polimerlerin yeni tarımsal ürünlerin üretiminde kullanılması teşvik edilmektedir (Tumu ve ark, 2023). Bu uygulama hem hammadde tüketimini azaltmakta hem de plastik atıkların ekonomiye yeniden kazandırılmasını sağlamaktadır.

Bununla birlikte biyobozunur malzemelerin yaygın kullanımının önünde bazı teknik ve ekonomik engeller bulunmaktadır. Üretim maliyetlerinin geleneksel plastiklere göre daha yüksek olması, dayanıklılık özelliklerinin her uygulama için yeterli olmaması ve farklı iklim koşullarında bozunma performanslarının değişkenlik göstermesi bu teknolojilerin yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır (Hanifah ve ark, 2024). Ancak çevresel maliyetlerin giderek artması ve sürdürülebilir üretim anlayışının güçlenmesi, biyobozunur malzemelere yönelik yatırımların hızla artmasına neden olmaktadır.

6.2. Yenilikçi Teknolojiler ve Endüstriyel Uygulamalar

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliğinin azaltılmasında teknolojik yenilikler önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda geliştirilen yeni

nesil sulama ekipmanları, hem plastik kullanımını azaltmayı hem de sistemlerin kullanım ömrünü uzatarak atık oluşumunu sınırlandırmayı hedeflemektedir. Daha dayanıklı polimerlerin kullanılması, geri dönüştürülmüş hammaddelerin üretim süreçlerine entegre edilmesi ve modüler tasarımların geliştirilmesi bu alandaki temel yenilikler arasında yer almaktadır (Tumu ve ark., 2023).

Sulama sistemlerinde meydana gelen tıkanmaların azaltılmasına yönelik geliştirilen fiziksel su şartlandırma teknolojileri de plastik atık oluşumunun dolaylı olarak azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle kireçlenme ve tortu oluşumunu kontrol etmeyi amaçlayan teknolojiler, damlatıcı performansını artırarak ekipmanların kullanım süresini uzatabilmektedir. Böylece sistem bileşenlerinin daha seyrek değiştirilmesi mümkün olmakta ve plastik tüketimi azaltılmaktadır.

Endüstriyel ölçekte uygulanan geri dönüşüm teknolojileri de sürdürülebilirlik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Mekanik geri dönüşüm yöntemleri sayesinde kullanım ömrünü tamamlayan polietilen ve polipropilen esaslı sulama ekipmanları yeniden işlenerek farklı ürünlerin üretiminde kullanılabilir. Son yıllarda geliştirilen kimyasal geri dönüşüm teknolojileri ise plastik atıkların temel yapı taşlarına ayrıştırılarak yeniden hammadde olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Macheca ve ark., 2024).

Gelecekte dijital tarım uygulamaları, sensör destekli sulama sistemleri ve yapay zeka tabanlı yönetim araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte sulama altyapılarının daha verimli kullanılması beklenmektedir. Bu teknolojiler, ekipman ömrünün uzatılması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi yoluyla plastik atık oluşumunun azaltılmasına katkı sağlayabilecek önemli araçlar olarak değerlendirilmektedir.

6.3. Stratejik Önlemler ve Atık Yönetimi

Damla sulama kaynaklı plastik kirliliğinin azaltılabilmesi için teknolojik çözümlerin yanı sıra etkili atık yönetimi stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Bu kapsamda öncelikli yaklaşım, atık oluşumunun kaynağında azaltılmasıdır. Daha uzun ömürlü ekipmanların tercih edilmesi, düzenli bakım uygulamalarının yaygınlaştırılması ve üreticilerin bilinçlendirilmesi plastik tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir.

Kullanım ömrünü tamamlayan sulama ekipmanlarının etkin şekilde toplanması sürdürülebilir atık yönetiminin temel unsurlarından biridir. FAO (2020), tarımsal plastiklerin geri kazanım oranlarının artırılabilmesi için bölgesel toplama merkezlerinin oluşturulmasını ve lojistik altyapının güçlendirilmesini önermektedir. Bu yaklaşım, özellikle küçük ölçekli işletmelerde geri dönüşüm süreçlerine katılımı artıracak önemli bir uygulama olarak görülmektedir.

Atık yönetiminde üretici sorumluluğu yaklaşımı da giderek önem kazanmaktadır. Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) sistemleri kapsamında üreticiler, piyasaya sürdükleri ürünlerin kullanım sonrası süreçlerinden de sorumlu tutulmaktadır. Bu uygulama hem geri dönüşüm oranlarının yükselmesine hem de çevre dostu ürün tasarımlarının teşvik edilmesine katkı sağlamaktadır (Macheca ve ark., 2022). Bunun yanında çiftçilere yönelik eğitim programları, teknik destek hizmetleri ve ekonomik teşvikler de plastik atık yönetiminin başarısını artırabilecek önemli araçlardır. Atıkların açık alanda yakılması veya çevreye terk edilmesi gibi uygulamaların önlenmesi, yalnızca çevresel risklerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir tarım hedeflerine ulaşılması bakımından da kritik öneme sahiptir.

7. Politika Önerileri ve Gelecek Perspektifleri

Damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliğinin etkin biçimde yönetilebilmesi için teknik çözümlerin yanı sıra güçlü politika mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda öncelikle tarımsal plastik atıklara yönelik ulusal stratejilerin geliştirilmesi ve mevcut mevzuatın uygulama etkinliğinin artırılması gerekmektedir. Atık toplama, geri dönüşüm ve izleme süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması, çevresel etkilerin azaltılmasında önemli rol oynayacaktır.

Tarımsal plastiklerin geri dönüşümünü teşvik edecek ekonomik araçların geliştirilmesi de büyük önem taşımaktadır. Depozito sistemleri, geri dönüşüm destekleri, vergi teşvikleri ve üretici sorumluluğu uygulamaları, plastik atıkların kayıtlı sistemlere kazandırılmasını kolaylaştırabilir. Aynı zamanda biyobozunur ve çevre dostu malzemelerin kullanımını destekleyen teşvik mekanizmaları, sürdürülebilir teknolojilerin yaygınlaşmasını hızlandırabilir.

Gelecekte mikroplastik kirliliğinin izlenmesine yönelik araştırmaların artırılması gerekmektedir. Özellikle tarım topraklarında ve sulama sistemlerinde mikroplastik oluşum miktarlarının belirlenmesi, risk değerlendirmelerinin yapılması ve standart izleme yöntemlerinin geliştirilmesi önemli araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca mikroplastiklerin bitki, toprak ve insan sağlığı üzerindeki uzun dönemli etkilerine ilişkin bilgi eksikliklerinin giderilmesi gerekmektedir.

İklim değişikliği, su kıtlığı ve artan gıda talebi dikkate alındığında damla sulama sistemleri gelecekte de tarımsal üretimin temel bileşenlerinden biri olmaya devam edecektir. Ancak bu teknolojilerin çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirilebilmesi için plastik kullanımının azaltılması, döngüsel ekonomi uygulamalarının yaygınlaştırılması ve yenilikçi teknolojilerin desteklenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda geliştirilecek politika ve uygulamalar, hem

tarımsal üretimin devamlılığını hem de doğal kaynakların korunmasını destekleyecektir.

8. Sonuç

Damla sulama sistemleri, su kaynaklarının etkin kullanımı ve tarımsal verimliliğin artırılması açısından modern tarımın en önemli teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle su kıtlığının giderek arttığı kurak ve yarı kurak bölgelerde, suyun kontrollü ve hedefe yönelik uygulanmasını sağlayarak sürdürülebilir tarımsal üretime önemli katkılar sunmaktadır. Ancak bu sistemlerde yaygın olarak kullanılan polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) esaslı plastik materyaller, kullanım ömürlerinin sonunda önemli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Damla sulama sistemlerinin yaygınlaşmasına paralel olarak artan plastik tüketimi, tarımsal alanlarda plastik atık ve mikroplastik birikimini hızlandıran önemli bir faktör haline gelmiştir. Bu çalışmada, damla sulama sistemlerinden kaynaklanan plastik kirliliğinin oluşum mekanizmaları, çevresel etkileri ve çözüm yaklaşımları kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalar, sulama sistemlerinde kullanılan plastik ekipmanların ultraviyole ışınımı, sıcaklık değişimleri, mekanik aşınma ve kimyasal etkileşimler sonucunda zamanla parçalanarak mikro ve nanoplastiklere dönüştüğünü göstermektedir. Oluşan bu parçacıklar yalnızca toprakta birikmekle kalmamakta, yüzey akışı ve drenaj süreçleriyle su ekosistemlerine de taşınabilmektedir.

Toprak ekosistemleri üzerindeki etkiler incelendiğinde, mikroplastiklerin toprak agregat yapısını bozduğu, porozite ve hidrolik iletkenlik gibi fiziksel özellikleri değiştirdiği görülmektedir. Bunun yanında ağır metaller ve pestisitler gibi kirleticileri adsorbe ederek kimyasal riskleri artırdığı, mikrobiyal topluluklar ve toprak faunası üzerinde baskı oluşturarak biyolojik süreçleri olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bu etkiler sonucunda besin döngülerinin yavaşladığı, toprak verimliliğinin azaldığı ve bitki gelişiminin olumsuz yönde etkilendiği ortaya konulmuştur.

Su ekosistemleri açısından değerlendirildiğinde ise mikroplastiklerin yüzey ve yeraltı sularına taşınarak sucul organizmalar üzerinde çeşitli olumsuz etkiler oluşturduğu görülmektedir. Plastik parçacıkların sucul canlılar tarafından tüketilmesi, fiziksel ve toksik etkilerin ortaya çıkmasına neden olurken; kirleticileri taşıma özellikleri nedeniyle ekolojik risklerin daha da büyümesine yol açmaktadır. Bu durum, mikroplastik kirliliğinin yalnızca tarım alanlarıyla sınırlı olmayan, geniş ölçekli bir çevre sorunu olduğunu göstermektedir.

Akdeniz Bölgesi özelinde değerlendirildiğinde, yoğun sulama uygulamaları ve yüksek plastik kullanımının bölgeyi mikroplastik kirliliği açısından hassas

hale getirdiği gör÷lmektedir. Bölgenin iklim koşulları plastiklerin parçalanma süreçlerini hızlandırırken, tarımsal faaliyetlerin yoğunluğu hem ekolojik hem de ekonomik etkilerin daha belirgin hale gelmesine neden olmaktadır. Toprak kalitesindeki bozulmalar, verim kayıpları, atık yönetimi maliyetleri ve çevresel zararların giderilmesine yönelik harcamalar, plastik kirliliğinin ekonomik boyutunu oluşturmaktadır.

Mevcut atık yönetimi uygulamaları ve geri dönüşüm sistemleri sorunun çözümüne katkı sağlamakla birlikte, toplama altyapısındaki eksiklikler, ekonomik kısıtlar ve mikroplastiklerin yeterince dikkate alınmaması nedeniyle istenilen başarı düzeyine ulaşılamamaktadır. Bu nedenle yalnızca atık yönetimine dayalı yaklaşımlar yerine, plastik kullanımını azaltan ve atık oluşumunu kaynağında önleyen bütüncül stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Biyobozunur malzemelerin geliştirilmesi, geri dönüştürülebilir ürün tasarımlarının yaygınlaştırılması, yenilikçi sulama teknolojilerinin kullanılması ve döngüsel ekonomi uygulamalarının güçlendirilmesi, damla sulama kaynaklı plastik kirliliğinin azaltılmasında önemli fırsatlar sunmaktadır. Bunun yanında etkin geri dönüşüm sistemleri, üretici sorumluluğu uygulamaları, ekonomik teşvikler ve çiftçi eğitim programları sürdürülebilir çözüm sürecinin temel bileşenleri olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, damla sulama sistemleri tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir teknoloji olmakla birlikte, plastik kullanımına bağlı çevresel etkilerin göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Gelecekte çevre dostu malzemelerin geliştirilmesi, mikroplastik kirliliğinin düzenli olarak izlenmesi ve etkin politika araçlarının uygulanması sayesinde damla sulama teknolojilerinin çevresel sürdürülebilirliği artırılabilir. Böylece hem tarımsal üretimin devamlılığı sağlanabilecek hem de toprak ve su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunulabilecektir.

Kaynaklar

- Bakhshae, A., Babakhani, P., Ashiq, M.M. Bell, K., Salehi, M., Jazaei, F.(2025). Potential impacts of microplastic pollution on soil–water–plant dynamics. *Sci Rep* 15, 9784.
- deSouza Machado AA, Kloas W, Zarfl C, Hempel S, Rillig MC. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob Change Biol.*;24: 1405–1416
- Doru, S. Atış, E. (2025). Çiftçilerin tarımsal plastik atıklara yönelik tutumlarının çevresel sürdürülebilirlik açısından incelenmesi. *Ege Univ., Ziraat Fak. Derg.*, 62 (1): 87-100.
- FAO. (2020). *Plastics and Sustainability: Towards a Circular Economy for Plastics in Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/cb1487en/cb1487en.pdf>
- FAO. (2021). *Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7856en>.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Gopal, R., Ashoka, P., Mohanty, L. K., Bhoi, S. P., Rout, S., Khokale., S. K., Kumar, V. (2026). Advancements in Irrigation Technologies and Water Management Strategies for Sustainable Agriculture: A Comprehensive Review. *Archives of Current Research International*, 26(4): 226–246.
- Gündoğdu, R., Önder, D., Gündoğdu, S., Gwinnett, C. (2022). Plastics derived from disposable greenhouse plastic films and irrigation pipes in agricultural soils: A case study from Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 87706–87716.
- Hahladakis, J. N., et al. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179-199.
- Hanifah M.R.A., Manaf L.A., Zulkeflee, Z., Andriyono, S. (2024). Advancing circular economy approaches in plastic waste management: A systematic literature review in developing economies, *Sustainable Production and Consumption*, 51: 420-431,
- Horton, A. A., Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*, 5(2): e1268.
- Iqbal, B., Zhao, T., Yin, W., Zhao, Z., Xie, Q., Khan, K.Y., Zhao, X., Nazar, M., Li, G., Du, D. (2023). Impacts of soil microplastics on crops: A review, *Applied Soil Ecology*, 181, 104680.
- Liu, Y., Chen, S., Zhou, P., Li, H., Wan, Q., Lu, Y., Li, B. (2024) Differential impacts of microplastics on carbon and nitrogen cycling in plant-soil

- systems: A meta-analysis, *Science of The Total Environment*, 948, 174655.
- Luo, Q., Tan, H., Ye, M., Jho, E.H., Wang, P., Iqbal, B., Zhao, X., Shi, H., Lu, H., Li, G. (2025). Microplastics as an emerging threat to human health: An overview of potential health impacts. *J Environ Manage*, ;387: 125915.
- Macheca, A.D., Mutuma, B., Adalima, J.L., Midheme, E., Lucas, L.H.M, Ochanda, V.K., Mhlanga, S.D. (2024). Perspectives on Plastic Waste Management: Challenges and Possible Solutions to Ensure Its Sustainable Use. *Recycling*, 9(5): 77.
- Miles, C., DeVetter, L., Ghimire, S., Hayes, D. G. (2017). Suitability of Biodegradable Plastic Mulches for Organic and Sustainable Agricultural Production Systems. *HortScience*, 52(1), 10–15.
- Rillig, M. C., Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science*, 368(6498), 1430-1431.
- Rillig, M.C., Lehmann, A., de Souza Machado, A.A. and Yang, G. (2019), Microplastic effects on plants. *New Phytol*, 223: 1066-1070.
- Shah, T., Ali, A., Haider, G., Asad, M., Munsif, F. (2023). Microplastics alter soil enzyme activities and microbial community structure without negatively affecting plant growth in an agroecosystem, *Chemosphere*, 322, 138188.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2025). Su Kaynakları ve Tarımsal Sulama İstatistikleri, 2024. Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, İstatistik Bülteni No: 042. Ankara.
- Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y., Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25:100311.
- Tourinho, P. S., Kočí, V., Loureiro, S., van Gestel, C. A. M. (2019). Partitioning of chemical contaminants to microplastics: Sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation. *Environmental Pollution*, 252, 1246–1256.
- Tumu, K., Vorst, K., Curtzwiler, G. (2023). Global plastic waste recycling and extended producer responsibility laws, *Journal of Environmental Management*, 348, 119242,
- Wijesooriya, M., Wijesekara, H., Sewwandi, M., Soysa, S., Rajapaksha, A.U., Vithanage, M., Nanthi Bolan, N. (2023). Microplastics and Soil Nutrient Cycling. *Microplastics in the Ecosphere: Air, Water, Soil, and Food*, First Edition. Edited by Vithanage, M., Vara Prasad. M.N.V. John Wiley & Sons. 321-338.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647.

- Ya, H., Jiang, B., Xing, Y., Zhang, T., Lv, M., Wang X. (2021). Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment, *Science of The Total Environment*, 798, 149338,
- Yang L, Yang W, Li Q, Zhao Z, Zhou H, Wu P. (2025). Microplastics in Agricultural Soils: Sources, Fate, and Interactions with Other Contaminants. *J Agric Food Chem*. 28;73(21):12548-12562.
- Zang, H., Zhou, J., Marshall, MR., Chadwick, D.R., Wen, Y., Jones, D.L. (2020). Microplastics in the agroecosystem: are they an emerging threat to the plant-soil system? *Soil Biol. Biochem*. 148: 107926.

8. Bölüm

Tarla Bitkilerinde Sulama Suyu Yönetiminin Optimize Edilmesi Su Yönetimi ve Verimli Sulama Kullanım İçin Stratejiler

**Haq NAWAZ^{1*}, Ulaş ŞENYİĞİT¹, Cengiz TÜRKAY¹,
İlknur AKGÜN¹**

ÖZET

Artan su kıtlığı, iklim değişikliği ve yükselen gıda talebi, tarımsal üretimde su kaynaklarının daha etkin ve sürdürülebilir kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Tarla bitkilerinde sulama suyu yönetimi, ürün verimliliğinin artırılması, su kullanım etkinliğinin iyileştirilmesi ve tarımsal sistemlerin çevresel değişimlere karşı dayanıklılığının güçlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, sulama suyu yönetiminin temel prensipleri, farklı sulama yöntemleri, bitki su gereksinimini etkileyen faktörler, evapotranspirasyon temelli sulama planlaması, sulama suyu kaynakları ve kalitesi ile su kullanım etkinliğini artırmaya yönelik stratejiler kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca hassas sulama teknolojileri, sensör tabanlı yönetim sistemleri, uzaktan algılama uygulamaları, eksik sulama yaklaşımları ve iklim değişikliğine uyum stratejileri ele alınmıştır. Sulama yönetiminde karşılaşılan teknik, ekonomik ve kurumsal zorluklar incelenmiş, sürdürülebilir su kullanımını destekleyen yenilikçi uygulamalar ve geleceğe yönelik perspektifler tartışılmıştır. Sonuç olarak, teknolojik gelişmelerin etkin su yönetimi politikaları, çiftçi eğitimi ve kurumsal iş birlikleri ile desteklenmesi, tarımsal üretimde su verimliliğinin artırılması ve uzun vadeli gıda güvenliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler – Sulama suyu yönetimi, su kullanım etkinliği, hassas sulama, evapotranspirasyon, iklim değişikliği

¹ *Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, e-mail: haqnawaz63@aup.edu.pk, ORCID No: 0000-0002-4997-4792 (Sorumlu Yazar)

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, ulassenyigit@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0002-4864-0790

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, ORCID No: 0000-0003-3857-0140

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, ORCID No: 0000-0002-7476-7226

ABSTRACT

Increasing water scarcity, climate change, and the growing demand for food have made the efficient and sustainable use of water resources an essential requirement for agricultural production. Irrigation water management in field crops plays a critical role in improving crop productivity, enhancing water use efficiency, and strengthening the resilience of agricultural systems to environmental changes. This chapter comprehensively reviews the fundamental principles of irrigation water management, various irrigation methods, factors influencing crop water requirements, evapotranspiration-based irrigation scheduling, irrigation water sources and quality, and strategies for improving water use efficiency. In addition, precision irrigation technologies, sensor-based management systems, remote sensing applications, deficit irrigation approaches, and climate change adaptation strategies are discussed. Technical, economic, and institutional challenges associated with irrigation management are examined, while innovative practices and future perspectives supporting sustainable water use are highlighted. Overall, integrating technological advancements with effective water management policies, farmer education, and institutional collaboration is essential for enhancing water productivity in agriculture and ensuring long-term food security.

Keywords – Irrigation water management, water use efficiency, precision irrigation, evapotranspiration,

GİRİŞ

Sulama, küresel tarımsal verimliliği artırmada ve gıda güvenliğini sağlamada temel bir rol oynamaktadır. Dünyadaki ekili arazilerin yalnızca yaklaşık %20'si sulanmasına rağmen, bu alanlar toplam mahsul üretiminin yaklaşık %40'ını karşılamakta ve sulamanın küresel gıda talebini karşılamadaki kritik önemini ortaya koymaktadır (Su ve Singh, 2024). Tarım sektörü, küresel tatlı su çekiminin yaklaşık %70'ini tüketmekte olup, bu kullanımın büyük bölümü sulama amaçlıdır (Meier vd., 2018; FAO, 2011). Son elli yılda dünya genelinde sulanan alanlar yaklaşık %70 oranında artarken, tarımsal su tüketimi iki kattan fazla yükselmiştir. Bu durum, artan gıda talebini karşılamak için sulamaya olan bağımlılığın giderek arttığını göstermektedir (Wriedt vd., 2009).

Sulama, yalnızca verimi artırmakla kalmaz, aynı zamanda yağışa bağlı üretimdeki değişkenliği azaltarak üretim istikrarını güçlendirir. Nitekim sulama, yağmurla beslenen sistemlere kıyasla küresel buğday verimini ortalama $34 \pm 9\%$, mısır verimini ise $22 \pm 13\%$ oranında artırmaktadır (Davis vd., 2021). Ayrıca sulama, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde çoklu ekim döngülerinin uygulanmasına imkân tanımakta, böylece toplam üretim potansiyelini ve çiftlik gelirini artırmaktadır (Dünya Bankası, 2023). Bu süreç, kırsal kalkınmayı destekleyerek istihdamın artmasına ve yoksulluğun azaltılmasına da önemli katkı sağlamaktadır (Su ve Singh, 2024; Dünya Bankası, 2023). Bununla birlikte, sürdürülebilir olmayan sulama uygulamaları uzun vadeli çevresel riskler taşımaktadır. Aşırı veya hatalı sulama, toprak tuzlanması, yeraltı suyu seviyelerinde düşüş ve su kalitesinin bozulması gibi olumsuzluklara yol açarak tarımsal sürdürülebilirliği tehdit etmektedir (Meier vd., 2018; Davis vd., 2021). Bu nedenle, artan su kıtlığı ve iklim değişikliğinin baskısı altında küresel gıda üretimini sürdürmek için su kullanım verimliliğini artırmaya ve iklim dostu sulama yönetimi stratejileri geliştirmeye yönelik çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Su kıtlığı, günümüzde tarım ve gıda güvenliğini etkileyen en kritik küresel sorunlardan biri hâline gelmiştir. Tarım sektörü hâlen tatlı su kaynaklarının en büyük kullanıcısı konumundadır (Abou-Shady vd., 2023). Nüfus artışı, kentleşme ve iklim değişikliği, sınırlı su kaynakları üzerindeki baskıyı artırarak birçok sulama bölgesinde ciddi stres koşullarına neden olmuştur. Dünya genelinde tarım arazilerinin %15-25'inin, sulamanın fiziksel olarak mümkün olmasına rağmen ekonomik veya kurumsal kısıtlamalar nedeniyle yeterince kullanılmadığı “ekonomik su kıtlığı” bölgelerinde yer aldığı bildirilmektedir (Schyns vd., 2019). Bu bölgelerde sulama altyapısının ve yönetiminin iyileştirilmesi, 620 ile 840 milyon arasında kişiye yetecek düzeyde ek gıda üretimi sağlayabilecektir (Schyns vd., 2019). İklim değişikliğinin bu tabloyu

daha da ağırlaştırması beklenmektedir. 2050 yılına kadar, evapotranspirasyonun artması ve yağış desenlerindeki değişim nedeniyle, tarım arazilerinin %80'inden fazlasında tarımsal su kıtlığının artacağı tahmin edilmektedir (Liu vd., 2022). Bu durum, suyun etkin kullanımına ve yenilikçi sulama yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine duyulan aciliyeti açıkça ortaya koymaktadır. Hassas sulama, eksik sulama ve arıtılmış atık su kullanımı gibi yöntemler, kabul edilebilir verim düzeylerini korurken su kullanım verimliliğini önemli ölçüde artırabilecek stratejilerdir (Feres ve Soriano, (2007)

Bu bölümün temel amacı, değişen iklim ve çevresel koşullar altında sürdürülebilir tarımsal üretime katkı sağlayan ilkeleri, uygulamaları, zorlukları ve yenilikleri ele alarak tarla bitkilerinde sulama suyu yönetimine dair kapsamlı bir anlayış geliştirmektir. Etkili sulama yönetimi; ürün verimliliğini optimize etmek, sınırlı su kaynaklarını korumak ve tarım sistemlerinin kuraklık ile iklim değişkenliğine karşı dayanıklılığını artırmak için hayati önem taşımaktadır. Bu kapsamda, bölümde küresel tarımda sulamanın önemi, gıda güvenliği, verimlilik ve kırsal geçim kaynaklarına olan katkısı incelenmektedir. Ayrıca su kıtlığının küresel ve bölgesel boyutları ele alınarak, verimli ve sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarına duyulan acil ihtiyaç tartışılmaktadır. Yüzey, yağmurlama ve damla sulama sistemleri gibi geleneksel ve modern yöntemlerin avantajları, sınırlamaları ve verimlilik düzeyleri karşılaştırılmakta; bunun yanında hassas sulama, sensör tabanlı yönetim, eksik sulama ve arıtılmış atık su kullanımı gibi yenilikçi teknolojiler değerlendirilmektedir. Gelişmekte olan tarım sistemlerinde sulama yönetimini etkileyen politika, ekonomik ve çevresel faktörler de analiz edilerek, sulama suyu yönetiminin sürdürülebilirliği çok yönlü bir bakış açısıyla ele alınmaktadır.

Bu bölüm, tahıllar ve baklagiller başta olmak üzere çeşitli agroklimatik koşullarda yetiştirilen temel tarla bitkilerinde sulama yönetiminin hem teorik hem de pratik yönlerini kapsamaktadır. Küresel ve bölgesel düzeyde gerçekleştirilen araştırmalardan elde edilen bulguların senteziyle, farklı sulama sistemlerinin performansına ve gelecekteki iklim ile su mevcudiyeti senaryoları altındaki potansiyel gelişmelere ilişkin bütüncül bir perspektif sunulmaktadır. Böylece, mevcut bilgi birikimi ve teknolojik yenilikleri bir araya getirerek su kullanım verimliliğini artırmak, ürün verimliliğini iyileştirmek ve sürdürülebilir tarımsal su yönetimini teşvik etmek isteyen araştırmacılar, tarım uzmanları, politika yapıcılar ve öğrenciler için kapsamlı bir başvuru kaynağı oluşturulması amaçlanmaktadır.

Tarla Bitkilerinde Sulama Uygulamalarına Genel Bakış

Tarla bitkilerinde sulama uygulamaları genel olarak yüzey sulama (tava, uzun tava ve karık vb.), basınçlı sistemler (yağmurlama, mikro yağmurlama, damla veya mikro sulama) ve gelişmiş hassas ya da sensör tabanlı sistemler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Her bir sistem, bitki türü, toprak özellikleri, iklim koşulları ve ekonomik olanaklara bağlı olarak farklı düzeylerde verimlilik, işletme koşulları ve uygunluk göstermektedir. Geleneksel yüzey sulama yöntemleri özellikle tava ve karık yöntemleri dünya genelinde hâlen yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, yağmurla beslenen tarıma kıyasla genellikle daha yüksek verim sağlasa da, yüzey akışı ve derin sızma yoluyla su kayıplarının fazla olması ve sulama homojenliğinin düşük olması gibi önemli dezavantajlara sahiptir (FAO, 2023).

Buna karşılık, yağmurlama sulama gibi basınçlı sistemlerin daha yüksek uygulama homojenliği ve su kullanım verimliliği sağladığı birçok çalışmada ortaya konmuştur. Chauhdary vd. (2024), özellikle otomasyon ve hassas kontrol teknolojileriyle entegre edildiğinde yağmurlama sistemlerinin yerçekimi esaslı sulama yöntemlerine kıyasla sulama suyu kullanımında %20-30 oranında tasarruf sağladığını ve mahsul verimini %20-27 oranında artırdığını bildirmiştir. Damla veya mikro sulama sistemleri ise suyun doğrudan kök bölgesine iletilmesini sağlayarak en yüksek verimlilik düzeyini sunmaktadır. Tarla bitkileri üzerinde yapılan araştırmalar, damla sulamanın geleneksel yüzey sulama yöntemlerine göre %20-70 arasında su tasarrufu ve %10-60 arasında verim veya su kullanım etkinliği artışı sağladığını göstermektedir (Ali ve Mubarak, 2017; Zafari vd., 2019).

Sulama planlaması ve yönetim stratejileri, suyun sadece uygulanma biçimi kadar, uygulanma zamanının ve miktarının belirlenmesinde de kritik bir rol oynamaktadır. Liang vd. (2021), buğdayda toprak altı damla sulama sisteminin yüzey damla sulamaya göre evapotranspirasyonu yaklaşık %26 oranında azalttığını, buna karşın daha yüksek verim ve biyokütle üretimi sağladığını belirtmiştir. Benzer şekilde, alternatif karık sulama ve kısmi kök kuruluğu (Partial Root Zone Drying) gibi teknikler, %50'ye yakın su tasarrufu sağlarken verimde ciddi kayıplara neden olmadan üretkenliği sürdürebilmektedir.

Günümüzde toprak nemi, bitki örtüsü sıcaklığı ve bitki su içeriği sensörleriyle desteklenen hassas sulama teknolojileri hızla gelişmektedir. Bu sistemler, uzaktan algılama tabanlı evapotranspirasyon ölçümleri, otomasyon ve veri analitiğiyle entegre edilerek, sulama kararlarını gerçek zamanlı verilere dayandırmaktadır. Liang vd. (2021), hassas sulamayı; sızma kayıplarını azaltan artıran, toprak nem dağılımında homojenliği sağlayan ve toprak mikrosistemini iyileştiren bir teknoloji olarak tanımlamıştır. Jenkins ve Block (2024) ise, veriye

dayalı hassas sulama sistemlerinin sabit programlara dayalı sulama yerine gerçek bitki su talebine göre zamanlama ve hacim belirlemesiyle su kullanımını optimize ettiğini vurgulamıştır. Bu yaklaşımlar, hem su kaynaklarının korunmasını hem de tarımsal üretimde verimlilik ve sürdürülebilirliğin artırılmasını mümkün kılmaktadır.

Tarla Bitkilerinin Su İhtiyacı

Bitkilerin ihtiyaç duyduğu su miktarı; tür, iklim koşulları, toprak özellikleri ve büyüme mevsiminin uzunluğuna bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir.



Bu farklılıkların doğru şekilde anlaşılması, etkili sulama planlaması ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Tarla bitkilerinin yaklaşık mevsimsel su gereksinimleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı tarla bitkilerinde büyüme dönemi boyunca ortalama su tüketimi (mm)

Arpa	450 – 650	Fıstık	500 – 700
Yulaf	451 – 650	Bezelye	35
Buğday	452 – 650	Patates	500 – 700
Fasulye	300 – 500	Sorgum	450 – 650
Pamuk	700 – 1300	Ayçiçeği	600 – 1000
Mısır	500 – 800	Şeker kamışı	1500 – 2500
Yonca	800 – 1600	Soya	450 - 700

Bitkilerin Su İhtiyacını Etkileyen Faktörler

Bitkinin su ihtiyacı; optimum verimi elde etmek için gerekli sulama miktarı ve zamanlamasını belirleyen iklim, toprak ve bitkiyle ilgili faktörlerin karmaşık etkileşiminden kaynaklanır. Bu faktörlerin doğru değerlendirilmesi, hem verimli sulama programlarının hem de sürdürülebilir su yönetim sistemlerinin tasarımı için kritik öneme sahiptir (Allen vd., 1998).

İklimsel Faktörler

Yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem ve kuvvetli rüzgâr koşulları, evapotranspirasyon oranlarını artırarak bitkilerin su gereksinimini yükseltir. Buna karşılık, yüksek nem oranı ve bulutlu hava koşulları su ihtiyacını azaltıcı yönde etki gösterir (Howell, 2001). Ayrıca güneşlenme süresi, radyasyon yoğunluğu ve yağış dağılımı da bitki su tüketim doğrudan etkileyen önemli iklimsel unsurlardır.

Toprak Faktörleri

Toprak tekstürü, yapısı, organik madde içeriği ve su tutma kapasitesi, bitkilerin suya erişiminde belirleyici rol oynamaktadır (Hillel, 2013). Kumlu topraklar düşük su tutma kapasitesine sahip olduklarından daha sık sulama gerektirirken; ince dokulu (killi) topraklar suyu daha uzun süre muhafaza edebilmekte, ancak havalanmayı ve kök gelişimini kısıtlayabilmektedir (Allen vd., 1998). Toprak sıkışması ve zayıf yapı ise suyun sızma ve süzülme oranlarını azaltarak hem kök penetrasyonunu hem de verimli su kullanımını olumsuz etkilemektedir (Pereira vd., 2015).

Bitkilerin Büyüme Aşaması ve Fizyolojik Faktörler

Su ihtiyacı genellikle bitkinin erken vejetatif döneminde düşük seviyededir, çiçeklenme ve generatif dönemde hızla artar, olgunluk döneminde ise tekrar azalmaktadır (FAO, 2023). Çiçeklenme ve tane dolum aşamaları, su stresine en duyarlı gelişme evreleri olup bu dönemlerde yaşanan su yetersizliği önemli verim kayıplarına neden olabilmektedir (Howell, 2001).

Yeraltı Suyu Seviyesi

Yeraltı su tabakası toprak yüzeyine yakın olduğunda, kılcal yükselme yoluyla kök bölgesine ek su sağlanabilmekte ve bu durum sulama ihtiyacını azaltabilmektedir (Hillel, 2013). Buna karşılık, yeraltı su seviyesinin derin olduğu alanlarda bitkiler tamamen yüzey veya yapay sulama sistemlerine bağımlı hâle gelmektedir (Allen vd., 1998).

Bitki Türü

Farklı bitki türleri, yaprak alanı, kök derinliği, fenolojik gelişim süresi ve terleme oranı gibi morfofizyolojik özellikler nedeniyle değişen su gereksinimleri göstermektedir. Örneğin, mısır ve şeker kamışı, geniş yaprak alanı ve uzun büyüme dönemi nedeniyle buğday veya arpaya kıyasla daha yüksek su ihtiyacına sahip olmaktadır (FAO, 2023).

Arazinin Eğim Durumu

Arazi eğimi, sulama suyunun dağılımı ve sızma oranı üzerinde doğrudan etkilenmektedir. Dik eğimli arazilerde yüzey akışı artmakta, bu da bitkilerin suya erişimini azaltmakta ve toprak erozyonu riskini yükseltmektedir (Doorenbos ve Kassam, 1979). Buna karşılık, hafif eğimli veya düz araziler suyun daha homojen dağılmasına olanak tanımakta, kök bölgesinde su tutulumunu artırmakta ve tava veya karık sulama gibi yüzey yöntemlerinin verimliliğini yükseltmektedir (FAO, 2023).

Toprak Drenajı

Drenaj kapasitesi, kök gelişimi ve bitki sağlığı açısından belirleyici bir unsurdur. Drenajı iyi olan topraklar su birikimini önleyerek köklerin oksijen alımını kolaylaştırmakta, oysa drenajı zayıf olan topraklar su stresi, kök hastalıkları ve besin sızmalarıyla sonuçlanabilmektedir (Hillel, 2013). Bu nedenle, sulama miktarı, drenaj özellikleri dikkate alınarak planlanmalı; taban suyunun yükselme riskine neden olmadan yeterli su temini sağlanmalıdır.

Sulama Sistemi Türü

Uygulanan sulama sisteminin tipi, hem suyun uygulama verimliliğini hem de bitkilerin gerçek su alımını belirlemektedir. Yüzey sulama yöntemlerinde akış ve derin sızma kayıpları nedeniyle su kullanım etkinliği genellikle düşüktür. Buna karşılık, yağmurlama ve damla sulama gibi basınçlı sistemler daha homojen su dağılımı ve daha yüksek su kullanım verimliliği sunmaktadır (Chauhdary vd., 2024; Ali ve Mubarak, 2017). Toprak altı damla sulama veya hassas sulama sistemleri ise bitki su talebine ve toprak nem durumuna dayalı olarak su uygulamasını optimize eden en gelişmiş yaklaşımlar arasındadır.

Toprağa Uygulanan Organik Gübre Miktarı

Organik gübreler, toprağın organik madde içeriğini artırarak su tutma kapasitesini iyileştirmekte, toprak yapısını güçlendirmekte ve yüzeyden buharlaşma kayıplarını azaltmaktadır (Abou-Shady vd., 2023). Bu sayede, organik madde yönünden zengin topraklarda sulama sıklığı azalabilir ve kısa süreli su yetersizliklerine karşı daha yüksek dayanıklılık sağlanabilir.

Bitki Su Tüketimi (ET) ve Tahmin Yöntemleri

Bitki su tüketimi (ET), toprak yüzeyinden gerçekleşen buharlaşma (E) ile bitkilerin terleme (T) yoluyla kaybettiği suyun toplamını ifade etmektedir. Bu parametre, bitkilerin su gereksiniminin belirlenmesinde temel bir göstergedir. ET'nin doğru tahmini, sulama programlarının planlanması, su kullanım verimliliğinin artırılması ve değişken iklim ile toprak koşullarında sürdürülebilir bitki üretiminin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır (Allen vd., 1998; Pereira vd., 2015). ET, başta sıcaklık, güneş radyasyonu, nem ve rüzgâr hızı olmak üzere iklim koşullarına; ayrıca bitkinin yaprak alanı, kök derinliği, büyüme aşaması ve toprak suyu mevcudiyetine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Hillel, 2013).

ET'nin Bileşenleri

Evapotranspirasyon iki ana bileşenden oluşmaktadır.

Evaporasyon (E): Toprak yüzeyinden gerçekleşen su kaybını ifade eder ve bu süreç, toprak nemi, dokusu, organik madde miktarı ve yüzey örtüsü gibi faktörlerden etkilenmektedir. Özellikle çıplak veya kaba dokulu topraklarda buharlaşma oranı daha yüksek gerçekleşmektedir.

Transpirasyon (T): Bitkilerin fotosentez sürecinde stomaları aracılığıyla gerçekleştirdiği su kaybı olarak ifade edilmektedir. Transpirasyon oranı, bitki türü, yaprak alan indeksi, büyüme evresi ve stoma iletkenliği gibi fizyolojik özelliklerle yakından ilişkilidir (Doorenbos ve Kassam, 1979).

Belirli bir dönemde gerçekleşen toplam evapotranspirasyon (ET_c), bitkinin sulama gereksinimini belirlemede kullanılmakta ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

Burada; ET_0 referans evapotranspirasyon, K_c ise bitki türünü, gelişim evresini ve çevresel koşulları yansıtan bitki katsayısını (crop coefficient) temsil etmektedir (Allen vd., 1998).

ET Tahmin Yöntemleri

Bitki su tüketimini tahmin etmek için doğrudan ölçüm yöntemlerinden ampirik modellere ve uzaktan algılama temelli fiziksel modellere kadar çok sayıda yaklaşım geliştirilmiştir.

Doğrudan Ölçüm Yöntemleri

Lizimetreler: Kontrollü koşullarda oluşturulan toprak-bitki sistemlerinde su

kaybını doğrudan ölçerek gerçek bitki su tüketimi belirleyen en güvenilir araçlardır. Lizimetreler yüksek doğruluk sağlamalarına karşın, kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve sınırlı uzamsal kapsama alanı gibi dezavantajlara sahiptir (Hillel, 2013).

Buharlaştırma Tavaları: Standart su yüzeylerinden buharlaşma miktarını ölçerek referans refrans bitki su tüketimi (ET_0) tahmininde kullanılan pratik bir yöntemdir. Buharlaştırma miktarı, tavanın konumuna ve çevresel koşullara bağlı katsayılarla düzeltilerek gerçek bitki su tüketimini yaklaşılmına sağlamaktadır (Allen vd., 1998).

Ampirik ve Yarı-Ampirik Yöntemler

Blaney-Criddle yöntemi: Ortalama sıcaklık ve gün uzunluğuna dayalı basit bir yaklaşım olup, ayrıntılı meteorolojik verilerin sınırlı olduğu bölgelerde ön sulama planlaması için yaygın şekilde kullanılmaktadır (Doorenbos ve Kassam, 1979).

Hargreaves yöntemi: Girdi gereksinimi az olan bu yöntem, sıcaklık farkı ve güneş radyasyonu verilerini kullanarak referans bitki (ET_0) tahmin ederek, özellikle veri eksikliği bulunan alanlarda tercih edilmektedir (Allen vd., 1998).

Penman–Monteith yöntemi: Günümüzde FAO tarafından standart olarak kabul edilen FAO Penman–Monteith denklemi, güneş radyasyonu, hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgâr hızını entegre ederek yüksek doğrulukta ET tahminleri üretir. Denklem şu şekilde ifade edilmektedir (Allen vd., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Burada, Δ doymuş buhar basıncı eğrisinin eğimi, R_n net radyasyon, G toprak ısı akışı, γ psikrometrik sabit, u_2 2 m yüksekliğindeki rüzgâr hızı ve $(e_s - e_a)$ buhar basıncı açığını ifade etmektedir. Bu denklem, hem araştırma hem de uygulamalı sulama yönetimi çalışmalarında referans bitki su tüketimde hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uzaktan algılama ve modelleme: Son yıllarda uydu tabanlı uzaktan algılama ve bitki modelleme alanındaki gelişmeler, farklı toprak, bitki ve iklim koşullarındaki uzamsal değişkenliği dikkate alarak geniş alanlarda ET tahminini mümkün kılmaktadır. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) ve AquaCrop gibi modeller, yüzey enerji dengesi prensiplerine dayalı olarak alan düzeyinde doğru ET tahminleri sağlamaktadır. Bu yöntemler,

özellikle bölgesel ölçekli su kaynakları planlamasında ve sulama yönetiminin optimize edilmesinde giderek daha yaygın kullanılmaktadır (Pereira vd., 2015; Liu vd., 2022).

Sulama Suyu Kaynakları ve Kalitesi

Yüzey Suyu ve Yeraltı Suyu Kaynakları

Tarla bitkilerinde sulama, temel olarak yüzey suları (nehirler, göller, barajlar, rezervuarlar) ve yeraltı suları olmak üzere iki ana kaynağa dayanmaktadır. Yüzey suları, kolay erişilebilirlikleri ve büyük hacimlerde depolanabilir olmaları nedeniyle, sulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, mevsimsel akış dalgalanmaları, kuraklık dönemleri, sediment birikimi ve tuzluluk artışı gibi faktörler yüzey sularının miktar ve kalitesinde önemli değişikliklere neden olmaktadır (FAO, 2023; Döll vd., 2012).

Yeraltı suyu kaynakları ise özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde, yıl boyunca daha kararlı bir sulama kaynağı sağlayarak tarımsal üretimde sürekliliği desteklemektedir. Ayrıca açık kanal sistemlerine kıyasla buharlaşma kayıplarının daha düşük olması, yeraltı suyunu su tasarrufu açısından avantajlı kılmaktadır. Bununla birlikte, yeraltı sularının aşırı çekilmesi taban suyu seviyesinin düşmesine, pompalama maliyetlerinin artmasına ve hatta ikincil tuzluluk sorunlarına yol açabilmektedir (Shiklomanov, 2000; FAO, 2023).

Yüzey ve yeraltı sularının entegre yönetimi, su güvenliğini artırmak, mevsimsel kıtlıkları dengelemek ve toplam sulama verimliliğini yükseltmek açısından kritik öneme sahiptir (Döll vd., 2012). Bu nedenle, her iki kaynağın da sürdürülebilir biçimde yönetilmesi, hem tarımsal üretkenliğin hem de çevresel dengenin korunması açısından büyük önem taşımaktadır (Liu vd., 2022).

Sulama Suyu Kalitesinin Bitki ve Toprak Üzerindeki Etkileri

Sulama suyunun kalitesi, doğrudan hem bitki verimini hem de toprak sağlığını etkileyen belirleyici bir faktördür. Yüksek tuzluluk, sodiklik, aşırı pH veya toksik iyonların varlığı, bitki büyümesini kısıtlayarak uzun vadede verim kayıplarına ve toprak yapısının bozulmasına neden olabilmektedir (Ayers ve Westcot, 1985; FAO, 2023).

Bitki Verimi Üzerindeki Etkiler

Tuzluluk: Sulama suyundaki yüksek çözünmüş tuz konsantrasyonu, toprak çözeltisinin ozmotik potansiyelini düşürerek bitkilerin su alımını sınırlamakta ve “fizyolojik kuraklık” olarak adlandırılan duruma yol açmaktadır. Bu durum, özellikle fasulye ve pirinç gibi tuza hassas türlerde büyüme geriliği, yaprak

yanıklığı ve önemli verim düşüşlerine neden olurken; arpa ve şeker pancarı gibi tuza toleranslı bitkiler bu stres faktörlerinden daha az etkilenmektedir (Grattan ve Grieve, 1999).

Sodiklik: Sulama suyunda yüksek sodyum (Na^+) konsantrasyonu, toprakta iyon dengesini bozarak besin elementlerinin (özellikle K^+ , Ca^{2+} ve Mg^{2+}) alımını engellemektedir. Bu durum, bitkilerde besin eksikliği, zayıf vejetatif büyüme ve düşük verimle sonuçlanabilmektedir (Rengasamy, 2006).

Toksik iyonlar: Klorür (Cl^-), bor (B), florür (F^-) veya ağır metallerin yüksek düzeyleri, bitki metabolizmasını doğrudan engelleyebilmektedir. Bu iyonlar, yaprak nekrozuna, fotosentez hızının azalmasına ve meyve ya da tahıl kalitesinin düşmesine yol açmaktadır (Ayers ve Westcot, 1985).

Toprak Sağlığı Üzerindeki Etkiler

Toprak yapısının bozulması: Sodyumca zengin sularla yapılan sulama, toprak kil minerallerinin dağılmasına yol açarak agregat stabilitesini zayıflatmaktadır. Bunun sonucunda, gözeneklilik ve geçirgenlik azalmakta, suyun sızması zorlaşmakta ve kök bölgesinde su birikimi meydana gelmektedir. Bu durum, kök bölgesinde oksijen eksikliği, bitki stresi ve düşük verimle sonuçlanmaktadır (Rengasamy, 2006).

Tuz birikimi: Tuzlu suyun uzun süreli kullanımı, özellikle drenaj yetersizliğinde toprak profilinde tuz birikimine neden olmaktadır. Bu birikim, kök bölgesinde ozmotik stres oluşturarak ürün verimliliğini ve toprak biyolojik aktivitesini azaltmaktadır. Aşırı durumlarda ise toprak üretkenliğini tamamen kaybedebilmektedir (FAO, 2023).

pH değişimleri: Yüksek asitli ($\text{pH} < 6.5$) veya alkali ($\text{pH} > 8.5$) suyla yapılan sulama, toprak mikrobiyal aktivitesini ve besin elementlerinin bitki tarafından alınabilirliğini olumsuz etkilemektedir. Bu durum, toprakta besin dengesizliklerine, mikrobiyal çeşitliliğin azalmasına ve dolayısıyla ürün performansının düşmesine neden olmaktadır (FAO, 2023).

Sulama Sistemleri ve Teknolojileri

Sulama yöntemleri, uygulama şekline ve kullanılan teknoloji düzeyine göre temel olarak yüzey sulama, basınçlı sulama ve hassas (akıllı) sulama sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Her sistemin etkinliği; bitki türü, toprak özellikleri, iklim koşulları ve mevcut ekonomik kaynaklara bağlı olarak değişmektedir.

Yüzey Sulama Sistemleri

Yüzey sulama, suyun yerçekimi etkisiyle tarlaya dağıtıldığı en eski ve en yaygın sulama yöntemlerinden biridir. Basit yapısı ve düşük yatırım maliyeti

nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde geniş kullanım alanı bulunmaktadır (FAO, 2023). Ancak, uygun olmayan arazi eğimi ve yetersiz tesviye, suyun eşit dağılmamasına, yüzey akışı ve derin sızma nedeniyle önemli su kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, tarlanın iyi tesviye edilmesi, suyun uygulama süresinin dikkatle planlanması ve akış kontrolünün sağlanması verimliliği artırmada kritik öneme sahiptir.

Yüzey sulama, uygulama şekline göre karık, tava ve uzun tava (border) sulama olmak üzere üç alt tipe ayrılır. Oluk sulama, mısır ve pamuk gibi sıra arası bitkilerde yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemde su, ekim sıraları arasındaki arıklardan akarak kök bölgesine ulaşmaktadır. Basitliği ve düşük maliyeti avantaj sağlarken, suyun akış hızı ve topografyaya bağlı olarak dağılım dengesizliği görülebilmektedir (Pereira vd., 2015). Tavza sulama yöntemi, tarlanın küçük bölümlere ayrılması ve her bir tavanın belirli miktarda suyla doldurulması esasına dayanmaktadır. Özellikle, çeltik, meyve ağaçları ve sebzelerde eşit su uygulaması sağlaması nedeniyle tercih edilmekte; ancak dikkatli bir arazi tesviyesi ve işçilik gerekmektedir. Uzun tava sulama yöntemi ise tarlanın uzun şeritlere ayrılmasıyla uygulanır ve buğday ve arpa gibi tahıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kolay uygulanabilirliği avantaj olmakla birlikte, fazla su kullanımı ve üst şeritlerde su birikimi dezavantaj oluşturmaktadır (FAO, 2023).

Basınçlı Sulama Sistemleri

Yağmurlama sulama, suyun basınçlı borular ve nozullar aracılığıyla bitkilerin üzerine küçük damlacıklar şeklinde püskürtülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem, doğal yağışı taklit ederek tahıllar, sebzeler ve meyve bahçeleri dahil olmak üzere çok çeşitli tarla bitkileri için uygun olup, özellikle düzensiz topografyaya sahip alanlarda etkin sonuç vermektedir (FAO, 2023). Yağmurlama sistemleri, merkez pivot, yanal hareketli, sabit ve taşınabilir sistemler gibi farklı tasarımlarla uygulanabilmekte, böylece çeşitli arazi büyüklüklerine ve şekillerine uyum sağlamaktadır.

Yağmurlama sulamanın başlıca avantajları arasında, suyun eşit dağılımı, iş gücü ihtiyacının azalması, gübre uygulamasının (fertilizasyon) kolay entegrasyonu ve sistemin otomatikleştirilebilir olması yer almaktadır. Ancak, bu sistemlerin yüksek ilk yatırım ve enerji maliyetleri, rüzgarla eş su dağılımını bozulması ve buharlaşma kaynaklı su kayıplarına karşı hassasiyetleri ile düzenli bakım gereksinimleri önemli sınırlayıcı faktörlerdir (Pereira vd., 2015). Su kullanım verimliliğinin maksimize edilmesi için sistem tasarımı, çalışma basıncı ve sulama zamanlamasının dikkatle planlanması gerekmektedir.

Damla veya mikro sulama sistemleri, suyu düşük debili yayıcılar aracılığıyla doğrudan bitki kök bölgesine ileterek, yüzey akışı ve buharlaşmadan kaynaklanan

kayıpları minimuma indirmektedir. Bu yöntem, özellikle sebzeler, meyve bahçeleri ve yüksek değerli tarla bitkilerinde su kullanım verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (FAO, 2023).

Damla sulama sistemlerinin avantajları arasında %90'a kadar ulaşabilen yüksek su uygulama randımanı, yabancı ot gelişiminin ve toprak erozyonunun azaltılması, gübrelerin doğrudan kök bölgesine verilmesine olanak tanıyan fertigasyon uygulamaları yer almaktadır. Ancak, yüksek kurulum ve bakım maliyeti, düşük kaliteli sulama sularında damlatıcı tıkanması riski ve sürekli izleme gereksinimi sistemin başlıca dezavantajlarından (Pereira vd., 2015). Kurak ve yarı kurak bölgelerde, suyun verimli kullanımını ve sürdürülebilir üretimi desteklemesi nedeniyle damla sulama sistemleri giderek daha fazla benimsenmektedir.

Toprak altı damla sulama sistemleri, suyun toprak yüzeyinin altına gömülü damlatıcıların yer aldığı lateral boru hatları aracılığıyla doğrudan kök bölgesine verilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu sistem, yüzeydeki buharlaşma ve derin sızma kayıplarını büyük ölçüde azaltarak yüksek su kullanım verimliliği sağlamaktadır (Xiao vd., 2023). Özellikle, su tasarrufunun kritik öneme sahip olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde etkin bir alternatif olarak etkin bir yöntemdir. Bununla birlikte, toprakaltı hatlarının tıkanmasını önlemek için yüksek kaliteli su kullanımı ve düzenli bakım gerektirmektedir.

Hassas (Akıllı) Sulama Sistemleri

Hassas sulama, modern bilgi ve iletişim teknolojilerinin sulama yönetimine entegre edilmesiyle geliştirilen ileri bir yöntemdir. Bu sistemlerde, toprak nemi sensörleri, uzaktan algılama, GPS tabanlı konumlama ve otomatik kontrol üniteleri kullanılarak, uzamsal ve zamansal farklılıklara göre suyun yalnızca ihtiyaç duyulan bölgelerde ve doğru zamanda uygulanması sağlanmaktadır (Zhang vd., 2021).

Gerçek zamanlı veriler, bitki büyümesi, toprak nemi ve iklim koşulları hakkında sürekli bilgi sağlayarak suyun optimum miktarda ve en uygun zamanda verilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, hem su kaynaklarının korunmasını hem de ürün verimliliği ve enerji kullanım etkinliğinin artırılmasını sağlamaktadır. Hassas sulama sistemleri, gelecekte iklim değişikliğine uyumlu, kaynak verimliliği yüksek tarımsal üretim sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak görülmektedir.

Sulama Planlaması ve Karar Destek Araçları

Toprak Nemine Dayalı Planlama

Toprak nemine dayalı sulama planlaması, toprağın gerçek nem durumuna göre bitkilere ne zaman ve ne kadar su uygulanacağını belirleyen hassas bir

yaklaşımıdır. Bu yöntem, suyun yalnızca toprak nemi kritik bir eşiğin altına düştüğünde verilmesini sağlayarak su kullanımını optimize etmekte ve aşırı sulamayı ile su stresini önleyebilmektedir (Song vd., 1999).

Toprak nemi; tensiyometreler, alçı blokları, nötron problemleri ve modern sensörler (TDR, Profil Prob vb.) gibi cihazlarla izlenmektedir. Bu sensörlerden elde edilen veriler, gerçek zamanlı sulama kararları için kullanılabilir. Toprak nemi önceden belirlenmiş bir sınır değeri - genellikle kullanılabılır su tutma kapasitesinin %50'sini altına düştüğünde sulamaya başlanmakta ve kök bölgesi optimum nem düzeyine getirilmektedir (Hedley vd., 2009).

İklim ve ET Tabanlı Planlama

İklimsel ve bitki su tükemi (ET) tabanlı planlama, sulama zamanı ve miktarını belirlemede meteorolojik veriler ve bitki su gereksinimlerini birlikte değerlendirmektedir. Bu yaklaşımda, kıyas bitki su tüketimi (ET_0) genellikle FAO Penman-Monteith denklemi kullanılarak sıcaklık, güneş radyasyonu, nem ve rüzgâr hızı verilerinden hesaplanmaktadır (Allen vd., 1998). Daha sonra, bitkiye özgü bitki katsayısı (K_c) kullanılarak gerçek bitki su tüketimi tahmin edilmektedir:

Bu yöntem, bitki su tüketimi yoluyla kaybedilen suyun zamanında yerine konulmasını sağlayarak toprak nemini optimum düzeyde tutmakta ve su kaynaklarının verimli kullanımını desteklemektedir.

Bitki Büyüme Aşamasına Dayalı Planlama

Bitkilerin su gereksinimi büyüme döngüsü boyunca önemli ölçüde değiştiğinden, büyüme aşamasına dayalı sulama planlaması, suyun en kritik dönemlerde optimum düzeyde sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu yöntem, bitkinin yaşam döngüsünü başlangıç, vejetatif, çiçeklenme ve olgunluk olarak dört ana döneme ayırmaktadır (Doorenbos & Kassam, 1979).

Başlangıç döneminde hafif sulama çimlenmeyi desteklerken, vejetatif evre yaprak ve kök gelişimi için yeterli nem ihtiyacı doymaktadır. Çiçeklenme ve tane dolum evreleri su stresine en duyarlı dönemlerdir ve bu aşamalarda yaşanan su yetersizliği ciddi verim kayıplarına yol açabilmektedir. Buna karşın, olgunluk aşamasında sulama sıklığı verim kalitesini etkilemeden azaltılabilmektedir (Kang vd., 2002). Bu planlama yaklaşımı, özellikle su kıtlığı yaşayan bölgelerde suyun etkin kullanımını ve verim optimizasyonunu sağlamaktadır (Ferreira ve Soriano, 2007).

Uzaktan Algılama ve IoT Tabanlı Sulama Planlaması

Uzaktan algılama ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin entegrasyonu, modern sulama yönetiminde veri temelli karar verme süreçlerini dönüştürmüştür. Bu sistemler, geniş tarım alanlarında toprak nemi, bitki durumu ve iklim

parametrelerinin yüksek uzamsal ve zamansal çözünürlükte izlenmesine olanak tanımaktadır (Jones vd., 2017).

Uydu görüntüleri, İHA'lar veya yer tabanlı sensörlerle elde edilen veriler, bitki örtüsü sıcaklığı, NDVI (Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi) ve SAVI (Toprağa Göre Düzeltilmiş Bitki Örtüsü İndeksi) gibi bitki indeksleri kullanılarak analiz edilmektedir. Bu göstergeler, bitki su stresini değerlendirmeye ve evapotranspirasyonu tahmin etmeye olanak tanımaktadır (Bastiaanssen vd., 2000). Böylece çiftçiler, sulamanın ne zaman ve nerede gerekli olduğunu bilimsel olarak belirleyebilmektedirler. Uzaktan algılama, özellikle geniş ölçekli tarım alanlarında, su kaynaklarının yönetimi için düşük maliyetli ve etkin bir araç özelliği taşımaktadır.

Su Kullanım Etkinliği (WUE) ve Koruma Teknikleri

Kavram ve Önemi

Su kullanım etkinliği (WUE), bitkilerde biyokütle veya verim üretimi için harcanan suyun etkinliğini gösteren temel bir göstergedir. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$WUE = \frac{\text{Verim veya biomass (kg)}}{\text{Bitki su tüketim (mm)}}$$

WUE'nin artırılması, özellikle iklim değişikliği ve su kıtlığının arttığı bölgelerde sürdürülebilir üretim için kritik öneme sahiptir. Yüksek WUE, sınırlı su kaynaklarıyla maksimum verim elde etmeyi sağlayarak tarımsal sistemleri daha dayanıklı hale getirmektedir (Viets, 1962).

WUE'yi Artırmaya Yönelik Uygulamalar

WUE'yi iyileştirmek için çok sayıda tarımsal strateji kullanılmaktadır. Bunlar arasında:

- Kuraklığa dayanıklı ve verimli türlerin seçimi,
- Uygun ekim zamanı ve yoğunluğunun belirlenmesi,
- Randımanı sulama sistemlerinin kullanımı,
- Toprak yapısı ve besin yönetiminin iyileştirilmesi,
- Yabancı ot ve zararlı kontrolü,
- Ürün rotasyonu ve çeşitlendirme,
- Sensör, otomasyon ve veri tabanlı izleme teknolojilerinin entegrasyonu yer almaktadır.

Kısıtlı Sulama Stratejileri

Kısıtlı sulama, bitkilerin tam su ihtiyacının bilinçli olarak azaltıldığı bir su tasarrufu stratejisidir. Amaç, maksimum verim yerine birim su başına elde edilen ürün miktarını artırmaktır (Feres ve Soriano, 2007). Bu strateji, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde suyun sınırlı olduğu koşullarda büyük önem taşımaktadır.

Düzenlenmiş Eksik Sulama (RDI)

Bu yöntemde çiçeklenme ve tane dolumu gibi kritik dönemlerde tam sulama uygulanırken, vejetatif veya geç olgunluk aşamalarında su temini azaltılmaktadır. RDI, tahıllar, bağ bitkileri ve meyve ağaçlarında yaygın olarak kullanılmakta olup, WUE'yi artırmakla kalmaz, bazı ürünlerde kalite parametrelerini de iyileştirebilmektedir (Kang ve Zhang, 2004).

Sürekli Eksik Sulama

Bu yaklaşımda, bitkilere büyüme mevsimi boyunca tam sulama gereksinimlerinin belirli bir yüzdesi uygulanmaktadır. Bitkiler hafif su stresine uyum sağlayarak toplam su tüketimini azaltmakta, ancak verim kayıpları genellikle minimal düzeyde kalmaktadır (English ve Raja, 1996).

Kısmi Kök Kuruluğu (PRD)

PRD stratejisinde kök bölgesinin iki yarısı dönüşümlü olarak sulanmakta; bir taraf sulanırken diğeri taraf kuru kalmaktadır. Bu düzen, kök kaynaklı sinyaller (özellikle absisik asit birikimi) aracılığıyla stomaların kısmen kapanmasına neden olmaktadır. böylece, fotosentez önemli ölçüde etkilenmeden transpirasyon azaltılmaktadır. PRD, bağ, domates ve mısırdaki WUE'yi yükseltirken verim kalitesini de koruyabilmektedir (Davies vd., 2002; Şenyigit vd., 2025).

Toprak ve İklim İzlemeye Dayalı Kısıtlı Sulama

Modern sistemlerde, toprak nem sensörleri ve meteorolojik verilerle desteklenen ET modelleri, sulama zamanlamasını optimize etmektedir. Bu yaklaşım, bitkilerde hedeflenen düzeyde su stresi oluştururken, aşırı su açığını önlemekte ve kaynak kullanımını dengelemektedir (Pereira vd., 2002).

İklim Değişikliği Bağlamında Sürdürülebilir Sulama Yönetimi

Su Mevcudiyeti Üzerindeki Etkiler

İklim değişikliği, yağış düzenleri ve sıcaklık artışı yoluyla hem yüzey hem de yeraltı su kaynaklarının yenilenme hızını olumsuz etkilemektedir. Düzensiz

yağışlar, uzun kurak dönemler ve şiddetli yağışlar, hem su kıtlığı hem de taşkın risklerini artırmaktadır (Rodell vd., 2018). Ayrıca, buzulların geri çekilmesi ve kar erimesinin azalması, aşağı havzalardaki sulama sistemleri için uzun vadeli su arzını tehdit etmektedir (Immerzeel vd., 2010).

Bitki Su Gereksimine Etkileri

Artan sıcaklıklar, evapotranspirasyon oranlarını yükselterek bitkilerin su gereksinimini artırmaktadır. Birçok bitkide sıcaklıktaki her 1°C'lik artış, su ihtiyacını %5-15 oranında artırabilmektedir (Elliott vd., 2014). Ayrıca, daha yüksek buhar basıncı açığı (VPD) ve uzamış büyüme mevsimleri de terleme oranlarını artırmaktadır. Atmosferik CO₂ konsantrasyonunun artışı, stoma iletkenliğini düşürerek kısa vadede su kullanım etkinliğini (WUE) artırabilmekte; ancak bu etki genellikle sıcaklığa bağlı ET artışları ve artan biyokütle üretimiyle dengelenebilmektedir (Hanjra ve Qureshi, 2010).

Tarım Üzerindeki Etkiler ve Uyum Stratejileri

Azalan su mevcudiyeti ile artan bitki su gereksiminin birleşik etkileri, tarımsal üretim istikrarı ve gıda güvenliği üzerinde ciddi riskler oluşturmaktadır. Yağış veya kar erimesine bağımlı sulama sistemleri bu değişimlere karşı özellikle savunmasızdır. Bu bağlamda, eksik sulama, kuraklığa dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, hassas sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması ve entegre su kaynakları yönetimi, iklim değişikliğine uyum için temel stratejiler olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmalar ve Bölgesel Deneyimler

Yarı kurak bölgelerde başarılı sulama yönetimi: Su kıtlığı ve düzensiz yağışların bitki üretimini sınırladığı yarı kurak bölgelerde verimli sulama yönetimi çok önemlidir. Başarı, verimli teknolojiler, iklime dayalı planlama ve sürdürülebilir uygulamalar yoluyla su kullanımının optimize edilmesine bağlıdır.

Verimli sulama sistemleri: Yağmurlama, Damla, toprakaltı sulama, buharlaşma ve derin sızma kayıplarını en aza indirerek su kullanım verimliliğini artırmaktadır (Howell, 2001).

Akıllı Planlama: Toprak nem sensörleri, evapotranspirasyon verileri ve iklime dayalı modellerin kullanılması, zamanında sulama yapılmasını sağlayarak aşırı veya yetersiz sulamayı önlemektedir (Song vd., 1999).

Eksik ve sık sulama: Kritik olmayan aşamalarda sınırlı su uygulamak veya önemli dönemlerde düşük su düzeyleri uygulamak verim istikrarını ve WUE'yi artırmaktadır (Oweis ve Hachum, 2006).

Su toplama: Göletler ve kontrol barajları aracılığıyla yağmur suyu hasadı ve yeraltı suyu yenilemesi, kurak mevsimlerde su mevcudiyetini artırmaktadır (Boers ve Ben-Asher, 1982).

İklim dostu teknolojiler: IoT tabanlı sulama ve uzaktan algılama, hassas ve gerçek zamanlı su yönetimini mümkün kılmaktadır (Ojha et al., 2015).

Toprak ve bitki yönetimi: Malçlama, koruyucu toprak işleme ve kuraklığa dayanıklı bitkiler, toprak nem tutma kapasitesini ve verimliliği artırmaktadır (Hatfield vd., 2001). Kısacası, randımanı sistemler, akıllı teknolojiler ve koruma uygulamalarının entegrasyonu, yarı kurak ortamlarda sürdürülebilir ve verimli sulama sağlamaktadır.

Gelecek Perspektifleri ve Zorluklar

Gelişen teknolojiler, su kullanımında hassasiyeti, verimliliği ve sürdürülebilirliği artırarak sulama yönetiminde devrim yaratmaktadır. Bu yenilikler, sulama kararlarını gerçek zamanlı olarak optimize etmek için dijital araçları, sensörleri ve otomasyonu entegre etmektedir.

Nesnelerin interneti (IoT) ve akıllı sensörler: IoT tabanlı sulama sistemleri, toprak nemi, sıcaklık ve nem sensörlerini kullanarak tarla koşullarını izlemekte ve su dağıtımını otomatikleştirmektedir. Böylece su israfını azaltmakta ve mahsul verimini artırmaktadır (Ojha vd., 2015).

Uzaktan algılama ve insansız hava araçları: Uydu görüntüleri ve drone tabanlı izleme, toprak nemi, evapotranspirasyon ve bitki örtüsü endeksleri hakkında ayrıntılı veriler sağlayarak su stresi bölgelerinin belirlenmesine ve bölgeye özgü sulamanın yönlendirilmesine yardımcı olmaktadır (Pereira vd., 2002).

Yapay zeka ve makine öğrenimi: Yapay zeka modelleri, hava tahminlerini, toprak verilerini ve bitki büyüme modellerini analiz ederek sulama ihtiyaçlarını tahmin etmekte ve en uygun programları önermektedir (Miller vd., 2025).

Bulut tabanlı platformlar ve karar destek sistemleri: Entegre dijital platformlar, çiftçilerin mobil uygulamalar aracılığıyla gerçek zamanlı sulama bilgilerine erişmelerini sağlayarak planlama ve kayıt tutma süreçlerini iyileştirmektedir (Hammouch vd., 2024).

Akıllı sulama kontrolörleri: Bu kontrolörler, hava durumu verileri ve ET hesaplamalarına dayalı olarak sulama zamanlamasını ve hacmini otomatikleştirir ve geleneksel sistemlere kıyasla %30-40'a varan su tasarrufu sağlamaktadır (Song vd., 1999).

Politika Boşlukları ve Kurumsal Zorluklar

Etkili sulama yönetimi, genellikle sürdürülebilir su kullanımı ve teknolojik ilerlemeyi engelleyen politika ve kurumsal sınırlamalarla kısıtlanmaktadır.

Parçalanmış su yönetimi: Birçok bölgede, sulama sorumlulukları birden fazla bakanlık ve yerel yönetim arasında bölünmüş durumdadır. Bu da koordinasyonun zayıf olmasına ve yetki alanlarının çakışmasına neden olmaktadır (FAO, 2021). Bu parçalanma, karar alma sürecini geciktirmekte ve su tahsisinde hesap verebilirliği azaltmaktadır.

Güncel olmayan politikalar ve yasal çerçeveler: Birçok sulama yasası, iklim değişikliği, yeraltı sularının tükenmesi veya dijital su yönetimi araçları gibi modern zorlukları yansıtmamaktadır. Tarımda IoT, uzaktan algılama ve yapay zeka tabanlı sistemlerin kullanımı için net düzenlemeler bulunmamaktadır.

Yetersiz finansman ve yatırım: Sulama altyapısı, bakımı ve çiftçi eğitimine yönelik kamu yatırımları genellikle sınırlıdır. Bu da verimsiz sistemlere ve eski teknolojilere bağımlılığa yol açmaktadır (Dünya Bankası, 2020).

Zayıf kurumsal kapasite: Yerel su kullanıcı dernekleri genellikle sulama ağlarını etkin bir şekilde yönetmek için gerekli teknik uzmanlık, veri sistemleri ve mali özerkliğe sahip değildir (Fişekçioğlu, 2024).

Sınırlı paydaş katılımı: Çiftçilerin su politikalarının oluşturulmasına katılımı düşük seviyede kalmaktadır. Bu nedenle yerel sahiplenmeyi ve sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini zayıflatmaktadır.

İklim politikası ile entegrasyon eksikliği: Su yönetimi politikaları, iklim adaptasyonu ve tarımsal sürdürülebilirlik hedefleriyle nadiren uyumludur. Ulusal stratejiler ile çiftlik uygulamaları arasında uçurumlar yaratmaktadır (FAO, 2021).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Su kıtlığı, iklim değişkenliği ve artan gıda talebi koşullarında tarımsal verimliliğin sürdürülebilmesi, verimli ve sürdürülebilir sulama yönetiminin benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Modern teknolojilerin sulama sistemlerine entegrasyonu, çiftçilerin aktif katılımı ve etkili su politikalarının uygulanması, dayanıklı ve kaynak verimli bir tarımsal üretim sistemine geçişin temelini oluşturmaktadır. Araştırmalar, yağmulama, damla, toprakaltı damla ve hassas sulama sistemleri gibi gelişmiş yöntemlerin su kullanım etkinliğini (WUE) artırarak kayıpları önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Toprak nem sensörleri, bitki su tüketiminin (ET) verileri ve iklim modellerine dayalı akıllı sulama planlaması, sulamanın optimum zaman ve miktarda yapılmasına olanak tanımaktadır. Türkiye gibi ülkelerde çiftçi liderliğinde yürütülen yönetim

modelleri ve kurumsal ademi merkeziyetçilik uygulamaları, hesap verebilirliği, sistem performansını ve su yönetiminde yerel etkinliği artırmıştır. Dolayısıyla sürdürülebilir sulama yönetiminin başarısı, yalnızca teknolojik ilerlemelere değil; çiftçi eğitimi, politika koordinasyonu, kurumsal güçlendirme ve araştırma inovasyon iş birliklerine de bağlıdır.

Bu bağlamda, karar verme süreçlerini desteklemek ve gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılmak amacıyla uzaktan algılama, sensör tabanlı sistemler ve veri analitiği araçlarının yaygınlaştırılması önem taşımaktadır. Çiftçilerin bilinçlendirilmesi ve teknik kapasitelerinin geliştirilmesi, su tasarrufu tekniklerinin, sistem bakımının ve veri temelli sulama uygulamalarının etkin şekilde uygulanmasını sağlayacaktır. Aynı zamanda, sulama, iklim ve tarım politikalarının uyumlaştırıldığı entegre su yönetimi çerçevelerinin oluşturulması, suyun sürdürülebilir kullanımını destekleyen politika koordinasyonunu güçlendirecektir. Sulama birliklerinin teknik, mali ve idari olarak güçlendirilmesi, yerel düzeyde etkin yönetim kapasitesini artıracaktır. Üniversiteler, araştırma kurumları ve çiftçiler arasındaki iş birliklerinin geliştirilmesi, bölgeye özgü sulama çözümlerinin ortaya konmasına ve teknolojik yeniliklerin uygulamaya aktarılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, değişen yağış ve sıcaklık desenlerine uyum sağlamak amacıyla iklim dostu sulama teknolojileri ve kısıtlı sulama stratejilerinin benimsenmesi, tarımsal sistemlerin iklim direncini güçlendirecektir. Sonuç olarak, sürdürülebilir sulama yönetiminin sağlanması; teknolojik yeniliklerin etkin biçimde uygulanması, güçlü politika reformları ve paydaş katılımını içeren bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu unsurların bir araya getirilmesi, su güvenliğinin korunması, iklim değişikliğine dayanıklı üretim sistemlerinin geliştirilmesi ve uzun vadeli gıda güvenliğinin sağlanması açısından stratejik öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- Abou-Shady, A., Siddique, M. S., & Yu, W. (2023). *A critical review of innovations and perspectives for providing adequate water for sustainable irrigation*. *Water*, 15(17), 3023. <https://doi.org/10.3390/w15173023>
- Ali, M. H., & Mubarak, S. (2017). *Effective Rainfall Calculation Methods for Field Crops: An Overview, Analysis and New Formulation*. *Asian Research Journal of Agriculture*, 7(1), 1–12. <https://www.researchgate.net/publication/321363262>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29. FAO, Rome.
- Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., & Makin, I. W. (2000). *Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications*. *Agricultural Water Management*, 46(2), 137–155.
- Boers, T. M., & Ben-Asher, J. (1982). *A review of rainwater harvesting*. *Agricultural Water Management*, 5(2), 145–158.
- Chauhdary, J. N., Li, H., Jiang, Y., Pan, X., Hussain, Z., Javaid, M., & Rizwan, M. (2024). *Advances in Sprinkler Irrigation: A Review in the Context of Precision Irrigation for Crop Production*. *Agronomy*, 14(1), 47. <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/1/47>
- Davies, W. J., Wilkinson, S., & Loveys, B. (2002). *Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture*. *New Phytologist*, 153(3), 449–460.
- Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2012). *Global-scale modeling of groundwater recharge*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 2839–2856.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO, Rome.
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., & Rosenzweig, C. (2014). *Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239–3244.
- English, M., & Raja, S. N. (1996). *Perspectives on deficit irrigation*. *Agricultural Water Management*, 32(1), 1–14.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2011). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW): Managing Systems at Risk*. FAO, Rome.

- FAO. (2013). *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO. (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2022). *FAO achieves water and energy savings through programmed irrigation in Türkiye*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2023). *Border/Furrow Irrigation – On-Field Irrigation Overview*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/3/cb3844en.pdf>
- FAO. (2023). *Climate-Smart Irrigation for Sustainable Agriculture*. FAO, Rome.
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). *Deficit irrigation for reducing agricultural water use*. Journal of Experimental Botany, 58(2), 147–159.
- Fişekçioğlu Ü.F. (2024). Water Distribution Performance Assessment for Seydişehir Irrigation Association. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University/Gazi Osman Pasa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 41(3).
- Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1999). *Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops*. Scientia Horticulturae, 78(1–4), 127–157.
- Hammouch, H., El-Yacoubi, M. A., Qin, H., & Berbia, H. (2024). A systematic review and meta-analysis of intelligent irrigation systems. *IEEE Access*, 12, 128285–128304.
- Hanjra, M. A., & Qureshi, M. E. (2010). *Global water crisis and future food security in an era of climate change*. Food Policy, 35(5), 365–377.
- Hatfield, J. L., Sauer, T. J., & Prueger, J. H. (2001). *Managing soils to achieve greater water use efficiency: A review*. Agronomy Journal, 93(2), 271–280.
- Hedley, C. B., & Yule, I. J. (2009). Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios. *Precision Agriculture*, 10(4), 342–355.
- Hillel, D. (2013). *Introduction to Environmental Soil Physics*. 2nd Edition. Academic Press, London.
- Howell, T. A. (2001). *Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture*. Agronomy Journal, 93(2), 281–289.
- Immerzeel, W. W., van Beek, L. P. H., & Bierkens, M. F. P. (2010). *Climate change will affect the Asian water towers*. Science, 328(5984), 1382–1385.

- Jenkins, M., & Block, D. E. (2024). *A Review of Methods for Data-Driven Irrigation in Modern Agricultural Systems*. *Agronomy*, 14(7), 1355.
- Jones, H. G., Serraj, R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2017). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36(11), 978–989.
- Kang, S., & Zhang, J. (2004). Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2437–2446.
- Kang, S., Zhang, L., Liang, Y., Hu, X., Cai, H., & Gu, B. (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural water management*, 55(3), 203–216.
- Liang, Z. W., Liu, X. C., Xiao, J. R., & Liu, C. H. (2021). *Review of Conceptual and Systematic Progress of Precision Irrigation*. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 14(4), 20–31.
- Liu, X., Liu, W., Tang, Q., Liu, B., Wada, Y., & Yang, H. (2022). Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future*, 10(4), e2021EF002567.
- Miller, T., Mikiciuk, G., Durlik, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review of smart sensing technologies. *Sensors*, 25(12), 3583.
- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). *Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66–84.
- Oweis, T., & Hachum, A. (2006). *Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa*. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 57–73.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). *Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future*. *Agricultural Water Management*, 147, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). *Irrigation management under water scarcity*. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175–206.
- Rengasamy, P. (2006). *World salinization with emphasis on Australia*. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017–1023.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoing, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M.-H. (2018). *Emerging trends in global freshwater availability*. *Nature*, 557(7707), 651–659.

- Schyns, J. F., Hoekstra, A. Y., Booij, M. J., Hogeboom, R. J., & Mekonnen, M. M. (2019). Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(11), 4893-4898.
- Şenyigit, U., Nawaz, H., Grybauskiene, V., Akgün, İ., Türkay, C., & Demirbilek, V. Sustainable (2025). Water Management In Maize Farming: Comparison of Deficit Irrigation Approaches. Jelgava, 21.-23 May, Jelgava, DOI: 10.22616/ERDev.2025.24.TF063
- Shiklomanov, I. A. (2000). *Appraisal and Assessment of World Water Resources*. Water International, 25(1), 11–32.
- Song, Y., Kirkham, M. B., Ham, J. M., & Kluitenberg, G. J. (1999). Dual probe heat pulse technique for measuring soil water content and sunflower water uptake. *Soil and Tillage Research*, 50(3-4), 345-348.
- Su, Q., & Singh, V. P. (2024). Advancing irrigation management: integrating technology and sustainability to address global food security. *Environmental monitoring and assessment*, 196(11), 1018.
- Viets, F. G. (1962). *Fertilizers and the efficient use of water*. Advances in Agronomy, 14, 223–264.
- World Bank. (2020). *Turkey Water Sector Assessment: Sustainable Irrigation and Drainage Development*. Washington, DC.
- World Bank. (2023). *Towards a New Generation of Irrigation Investments*. World Bank Blogs, Washington, D.C.
- Wriedt, G., Van der Velde, M., Aloe, A., & Bouraoui, F. (2009). *Estimating irrigation water requirements in Europe*. Journal of Hydrology, 373(3-4), 527–544.
- Xiao, Y., Sun, C., Wang, D., Li, H., & Guo, W. (2023). Analysis of hotspots in subsurface drip irrigation research using CiteSpace. *Agriculture*, 13(7), 1463.
- Yercan, M. (2003). Management turning-over and participatory management of irrigation schemes: a case study of the Gediz River Basin in Turkey. *Agricultural water management*, 62(3), 205-214.
- Zafari, J. K., & Mohammadi, N. K. (2019). A review on drip fertigation on field crops. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 8(11), 722-29.
- Zhang, J., Guan, K., Peng, B., Jiang, C., Zhou, W., Yang, Y., ... & Cai, Y. (2021). Challenges and opportunities in precision irrigation decision-support systems for center pivots. *Environmental Research Letters*, 16(5), 053003.