

TARIMSAL ÜRETİMDE, İKLİM-DİJİTAL TARIM ETKİLEŞİMİ

Editörler: Prof. Dr. Servet TEKİN-Dr. Öğr. Üyesi Alper BAYDAR



TARIMSAL ÜRETİMDE, İKLİM-DİJİTAL TARIM ETKİLEŞİMİ

Editörler

Prof. Dr. Servet TEKİN

Dr. Öğr. Üyesi Alper BAYDAR



Tarımsal Üretimde, İklim-Dijital Tarım Etkileşimi

Editör: Prof. Dr. Servet TEKİN, Dr. Öğr. Üyesi Alper BAYDAR

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design

Baskı: Aralık 2025

Yayıncı Sertifika No: 49837

ISBN:978-625-8698-78-7

© Duvar Yayınları

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

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir. Yayınevi ve editörler sorumlu tutulamaz.

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm1

Üreticilerin Kimyasal Mücadele Konusundaki Yaklaşımlarının İncelenmesi

Mehmet KEÇECİ, Hüseyin AKINCI, Yücel KARAMAN, Mehmet KARACAOĞLU

2. Bölüm 12

Akıllı Sera Sistemlerinde Dijital Dönüşümün Öncesi ve Sonrası

Burak DALKILIÇ, Yeşim BOZKURT ÇOLAK

3. Bölüm38

Hassas Sulama ve Sulama Otomasyonu: Tarım 4.0 Uygulamalarının Geleneksel Yöntemlerle Karşılaştırılması

Burak DALKILIÇ, Alper BAYDAR

4. Bölüm58

Küresel İklim Değişikliğinin Yabancı Ot Biyolojisi, Fizyolojisi ve Mücadele Olanakları Üzerine Etkileri

Yücel KARAMAN, Olcay BOZDOĞAN

5. Bölüm 73

Van İli Koşullarında A Sınıfı Buharlaştırma Kabından (Class-A Pan) Ölçülen

Buharlaştırmaya Dayalı ET_0 Tahminlerinde Kullanılabilecek

Pan Katsayılarının Belirlenmesi

Selçuk USTA

6. Bölüm94

Bazı Ampirik Evapotranspirasyon Tahmin Modellerinin Van Gölü Havzası

Koşullarındaki Performanslarının Karşılaştırılması

Selçuk USTA

7. Bölüm 112

Kuru Kayısı Üretim Yapısı, Değer Zinciri ve Sürdürülebilirlik Politikaları

Ahmet ASLAN

8.Bölüm 128

Türkiye’de ve Dünyada Su Kıtlığı ile Mücadele

Ali Beyhan UÇAK

9.Bölüm 136

Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler MYO Çatı Alanında Toplanabilir Yağmur

Suyu Potansiyelinin Peyzaj Sulamasında Kullanım Olanaklarının Belirlenmesi

Yoldaş EKTİREN, Sedat BOYACI

1. Bölüm

Üreticilerin Kimyasal Mücadele Konusundaki Yaklaşımlarının İncelenmesi

Mehmet KEÇECİ¹
Hüseyin AKINCI²
Yücel KARAMAN¹
Mehmet KARACAOĞLU¹

1. Giriş

Tarımsal üretimi sınırlandıran faktörlerin başında hastalık ve zararlılar gelmektedir. Bu etmenlerle mücadele edilmesi verim ve ürünlerin kalitesinin arttırılmasına yardımcı olmaktadır. Son yıllarda bu sorunlarının çözümünde entegre mücadele yaklaşımı giderek önem kazanmıştır. Entegre Mücadele; kültürel önlemler, biyoteknik mücadele, biyolojik mücadele ve kimyasal mücadele yöntemlerini kullanan bütüncül bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Entegre mücadele, “Zararlı organizmaların popülasyon dinamikleri ve çevre ile ilişkilerini dikkate alarak, uygun olan mücadele yöntem ve tekniklerini tek tek veya birbirleri ile uyumlu bir şekilde kullanarak, zararlı organizmaların popülasyon yoğunluklarını ekonomik zarar seviyesinin altında tutmak” olarak tanımlanmaktadır (Uygun ve ark., 2016).

Bununla birlikte, 1940’lı yıllarda bazı maddelerin insektisit özelliklerinin keşfedilmesinden sonra, uygulama kolaylıkları, hızlı ve gözle görülür sonuç alınması vb. nedenleri göz önünde bulundurularak popülerlik kazanan kimyasal mücadele halen en fazla kullanılan yöntemdir. Tarımsal üretimde pestisit kullanımına sıklıkla başvurulması, başta insan ve çevre sağlığı olmak üzere, zararlı etmenlerde direnç sorunu, ürünlerdeki kalıntı problemi, kullanıcılara toksik etkileri vb. çok sayıda olumsuzluğu da beraberinde getirmektedir. Yoğun ve bilinçsiz pestisit kullanımı, pestisitlerin veya parçalanma ürünlerinin toprak, hava ve suya bulaşmasına yol açmaktadır (Tiryaki ve ark., 2010).

Bitkisel üretimde verimlilik ve sürdürülebilirlik, üreticilerin bitki koruma konusundaki bilgi düzeyleri ve uyguladıkları mücadele stratejilerine doğrudan bağlıdır. Zararlı, hastalık ve yabancı otlar uygun önlemler alınmadığında büyük verim kayıplarına yol açabilmekte olup, bu durum ekonomik ve çevresel riskleri

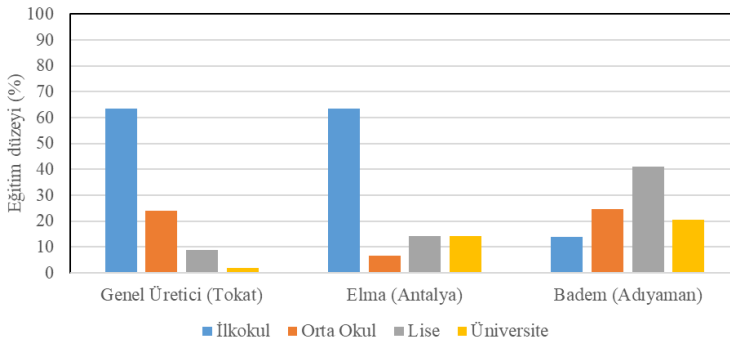
¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Malatya, Türkiye

²Gapagro Chemicals Ltd. Şti, Malatya, Türkiye

beraberinde getirmektedir (Erdoğan ve Gökdoğan, 2017). Bu nedenle üreticilerin bilgi düzeylerinin, karar alma süreçlerinin ve uygulama alışkanlıklarının incelenmesi, sürdürülebilir bitki koruma stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır (Ay ve ark., 2006). Bu nedenle ele alınan çalışma ile üreticilerin Bitki Koruma konusundaki yaklaşımlarının özetlenmesi amaçlanmıştır.

2. Üreticilerin Eğitim Durumları

Eğitim düzeyi birçok konuda olduğu gibi, tarımda da önemli bir kriterdir. Farklı bölgelerde farklı ürünler üreten üreticilerin eğitim durumlarını karşılaştırdığımızda; genel üreticiler ile Tokat Merkez, Turhal, Pazar, Zile ilçelerinde üreticiler ile yapılan çalışmada %63.4'ünün ilkokul mezunu, %24'ünün ortaokul mezunu, %9'unun lise mezunu, %2'sinin üniversite mezunu olduğunu (Kadioğlu; 2003), elma üreticileri ile Antalya'da yapılan çalışmada %63.3'ünün ilkokul, %6.7'si ortaokul, %14.4'ü lise ve %14.4'ün üniversite mezunu olduğu (Kızılay ve Akçaöz; 2009), badem üreticileri ile Adıyaman'da yapılan çalışmada ise %14'ünün ilkokul, %24.7'sinin ortaokul, %40.9'unun lise ve %20.4'ünün yüksekokul/üniversite mezunu olduğu belirlenmiştir (Erdoğan ve ark.; 2017). İl bazında genel olarak üreticiler ile yapılan çalışmalarda üreticilerin eğitim düzeylerinin düşük olduğu, daha yakın zamanlarda yürütülen çalışmalarda eğitim düzeylerinde artış olduğu gözlenmiştir (Şekil 1).



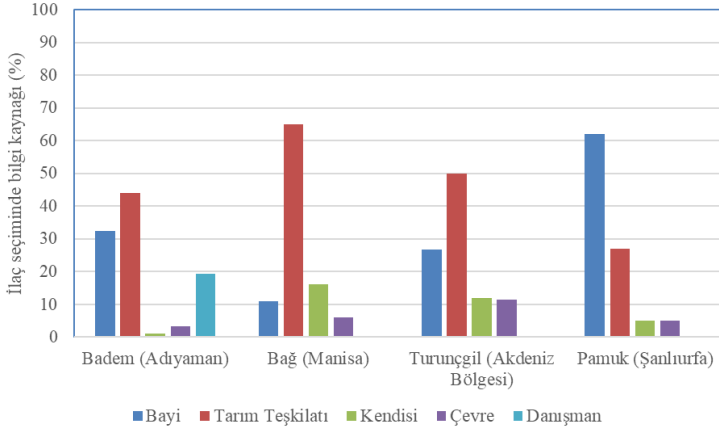
Şekil 1. Üreticilerin eğitim düzeyleri

3. Üreticilerin Kimyasal Mücadeleye Yaklaşımları

3.1. Pestisit Seçiminde Bilgi Kaynağı

Pestisit kullanımında üreticilerin kimlerden bilgi aldıkları, doğru yönlendirilmeleri açısından önemlidir. Bağ üreticileri ile Manisa'da yapılan bir

çalışmada kimyasal ilaç seçiminde %65'inin Tarım İl/İlçe Müdürlüğüne, %16'sının kendi tecrübelerine, %11'inin ilaç bayisine ve %8'inin ise çevredekilerden gördüklerine göre pestisit seçimi yaptıkları belirlenmiştir (Tücer ve ark., 2004). Tüm üreticiler ile Adana'da yapılan çalışmada, üreticilerin ilaç seçiminde çoğu zaman ilaç bayisinden %67.9; Tarım il ve ilçe müdürlüklerinden, %14.9; çevreden ise %4.5'inin fikir aldıkları bildirilmiştir (Emeli; 2006). Meyve üreticileri ile Gümüşhane'de yapılan çalışmada ise 30 üreticiden 28'i, teknik elemanların önerilerine göre seçim yaptıklarını ifade etmiştir (Kalkışım ve ark.; 2011). Antepfıstığı üreticileri ile yürütülen bir çalışmada, üreticilerin ilaç bayisinden Gaziantep'te % 70, Adıyaman'da % 70 ve Şanlıurfa'da % 67 oranında faydalandığı, komşu üreticilerden ise sırasıyla aynı illerde % 20, 11 ve 10 oranında tavsiye aldıkları belirlenmiştir (Çevik, 2019) (Şekil 2). Diyarbakır, Mardin ve Şanlıurfa'daki pamuk üreticileri ile yürütülen bir çalışmada da benzer sonuçlar bildirilmiştir. Üreticilerin Diyarbakır'da %63.2'si, Mardin'de %40'ı, Şanlıurfa'da ise %62.1'nin ilaç bayilerinden tavsiye aldığı, Tarım teşkilatlarından tavsiye alanların ise aynı illerde sırasıyla, %24, 50 ve 27 olduğu ifade edilmiştir (Bayhan ve ark., 2015). Üreticilerin kullanacakları pestisit seçiminde bilgi kaynağı olarak kültür bitkisi ve bölgeye göre tercihlerini şekillendirdikleri görülmektedir.

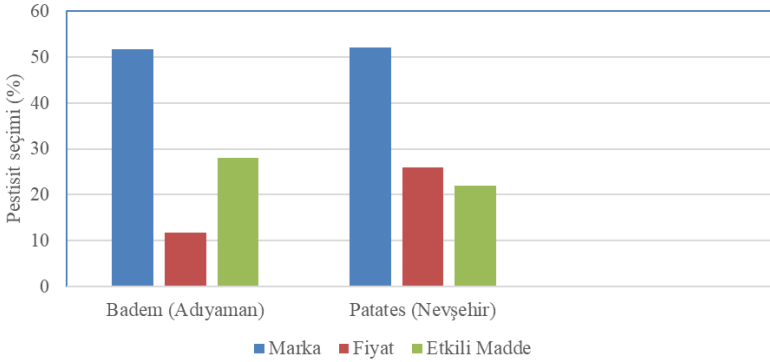


Şekil 2. Üreticilerin pestisit seçiminde tavsiye aldıkları bilgi kaynakları

3.2. Pestisit Seçimi

Kimyasal mücadelede, üreticilerin pestisit tercihleri mücadelenin başarılı olması açısından önemlidir. Badem üreticileri ile Adıyaman'da yapılan çalışmada, kimyasal ilaç seçimini yaparken üreticilerin %51.6'u markasına, %11.8'i fiyatına %28'i ise etkili maddesine baktığı bildirilmiştir (Erdoğan ve

ark.; 2017). Patates üreticileri ile Nevşehir’de yapılan çalışmada da benzer şekilde, üreticilerin kimyasal ilaç seçimini %43.9’unun markasına, %36.5’inin fiyatına ve %19’unun ise etkili maddesine göre yaptıkları ifade edilmiştir (Erdoğan ve Gökdoğan; 2017). Yapılan her iki çalışmada da üreticiler benzer yaklaşımlar göstermektedir (Şekil 3). Üreticilerin pestisit tercihinde, öncelikle pestisit markasına dikkat ettiği ifade edilmiştir.



Şekil 3. Üreticilerin pestisit seçimini etkileyen faktörler

3.3. Kimyasal Mücadeleye Karar Verme

Kimyasal mücadeleye karar verme alışkanlıkları, yapılan mücadelenin başarısı açısından son derece önemlidir. Pamuk üretiminin yoğun olarak yapıldığı Güneydoğu Anadolu Bölgesi illerinden; Şanlıurfa, Diyarbakır ve Mardin’de yürütülen bir çalışmada, üreticilerin %68’inin zararın ortaya çıktığında, %10’unun ise ilaçlama takvimine göre ilaç almaya karar verdiği ifade edilmiştir (Bayhan ve ark.; 2015). Genel üreticiler ile Aydın’da yapılan çalışmada ise, %57.8’inin zarar meydana gelmeden ilaçlama yapmadığı, %42.2’sinin ise zarar meydana geldiğinde ilaçlama yaptıkları belirtilmiştir (Boz ve ark.; 1998), Bölgeler arasında ve üretilen ürün açısından üreticilerin kimyasal mücadeleye karar verme alışkanlıkları farklılık göstermektedir.

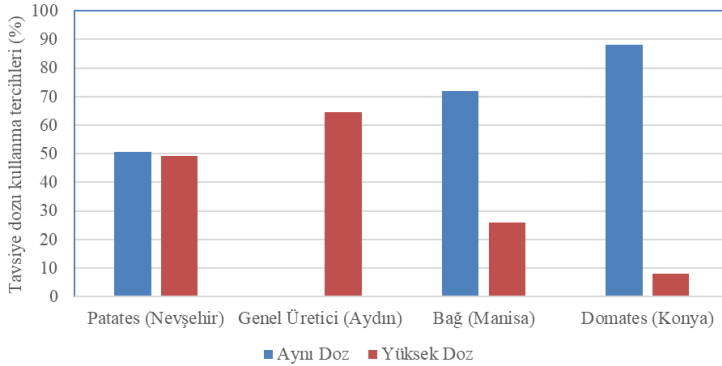
3.4. Kimyasal İlaç Kullanım Alışkanlıkları

Patates üreticileri ile Nevşehir’de yapılan bir çalışmada üreticilerin %93.1’i aynı hastalık ve zararlı için aynı ilacı kullanmadığını, %6.9’u ise aynı ilacı kullandığını belirtmiştir (Erdoğan ve Gökdoğan; 2017). Adıyaman ili badem üreticileri ile yürütülen çalışmada, patates üreticileri ile Nevşehir’de yapılan çalışmadan farklı olarak üreticilerin %53.8’inin aynı hastalık ve zararlı için sürekli aynı ilacı kullanmadığını, %46.2’sinin ise sürekli aynı ilacı kullandığını

belirtmişlerdir (Erdoğan ve ark.; 2017). Farklı bölgeler ve kültür bitkilerine göre, ilaç kullanım alışkanlıkları farklılık göstermektedir.

3.5. Pestisit Uygulamalarında Tavsiye Dozu

Kimyasal mücadelede doz ayarlaması birçok bilimsel çalışma sonucunda belirlenmektedir. Ürünlerde dayanıklılık problemi oluşmaması için uygun dozun kullanımı önemlidir. Genel üreticiler ile Aydın'da yapılan çalışmada üreticilerin %64.4'ünün dozu artırdığını (Boz ve ark.; 1998), patates üreticileri ile Nevşehir'de yapılan çalışmada ise üreticilerin yaklaşık yarısının önerilen dozu kullandığı, yarısının ise dozu artırdığı ifade edilmiştir (Erdoğan ve Gökdoğan, 2017). Bağ üreticileri ile Manisa'da yapılan çalışmada üreticilerin %71.9'unun önerilen dozu kullandığını, %26'sının önerilen dozu artırdığı saptanmıştır (Tücer ve ark.; 2004). Domates üreticileri ile Konya'da yapılan çalışmada ise üreticilerin büyük bir çoğunluğunun tavsiye dozu kullandığı (%88), %8'inin ise önerilen dozu artırdığı ve %4'ünün ise dozu azalttığı belirtilmiştir (Peker; 2012) (Şekil 4). Yapılan çalışmalarda üreticilerin doz ayarlamasında ürün ve bölgeye göre farklılık gösterdiği değerlendirilmektedir.

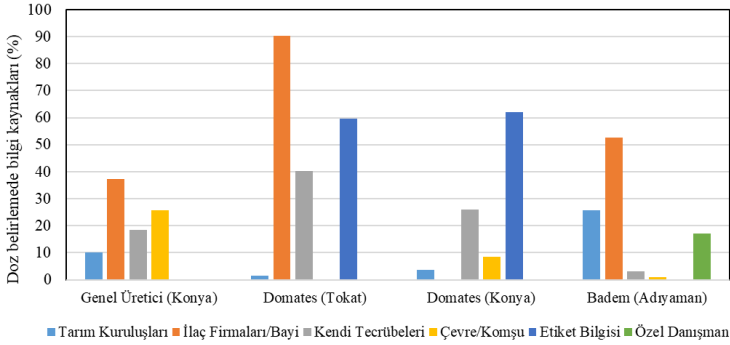


Şekil 4. Üreticilerin pestisit kullanımında tavsiye ve yüksek doz kullanım oranları

3.6. Pestisit Uygulamalarında Doz Seçiminde Bilgi Kaynağı

Pestisit kullanımında üreticilerin hangi bilgi kaynaklarını referans aldığı konusu da yürütülen anket çalışmaları ile belirlenen konular arasındadır. Konya'da genel üreticiler ile yürütülen bir çalışmada, ilaç dozunun seçimini %37.2 oranında ilaç firmaları ve bayilerin önerilerine, %25.7 oranında çevresindeki üreticilere, %18.5 oranında kendi tecrübelerine, %10 oranında tarım kuruluşlarının önerilerine, %8.6 oranında ise ilaç ambalajlarının üzerindeki etiket bilgilerine göre yaptıkları bildirilmiştir (İnan ve Boyraz,

2002). Tokat ilinde domates üreticileri ile gerçekleştirilen anket çalışmasında ise üreticilerin kullanılacak olan ilacın dozunu; %90.3 ilaç-gübre bayilerinin önerileri, %59.7 ilaçların üzerindeki etiket bilgisi, %40.3 kendi tecrübeleri, %1.4 ise Tarım teşkilatları teknik elemanlarının önerileri doğrultusunda belirledikleri görülmüştür (Gözener ve ark., 2017). Konya ilinde domates yetiştiriciliği yapan üreticilerin %61.9'u doz ayarlarını ilaç üzerinde bulunan yazılı etiket tavsiyesi, %25.9'u kendi deneyimleri, %8.6'sı komşu ve akraba önerileri ve %3.6'sı da Tarım teşkilatları teknik elemanlarının önerileri doğrultusunda belirledikleri ifade edilmiştir (Peker, 2012). Adıyaman ili badem üreticileri ile yürütülen çalışmada ise pestisit dozu seçiminin üreticilerin %52.7'sinin ilaç bayisi, %25.8'inin Tarım İl Müdürlüğü, %17.2'sinin özel danışman, %3.2'sinin kendi deneyimleri ve %1.1'inin ise komşularının yönlendirmeleri doğrultusunda yaptıkları belirlenmiştir (Şekil 5) (Erdoğan ve ark., 2017).



Şekil 5. Üreticilerin pestisit uygulama dozu seçiminde bilgi kaynakları

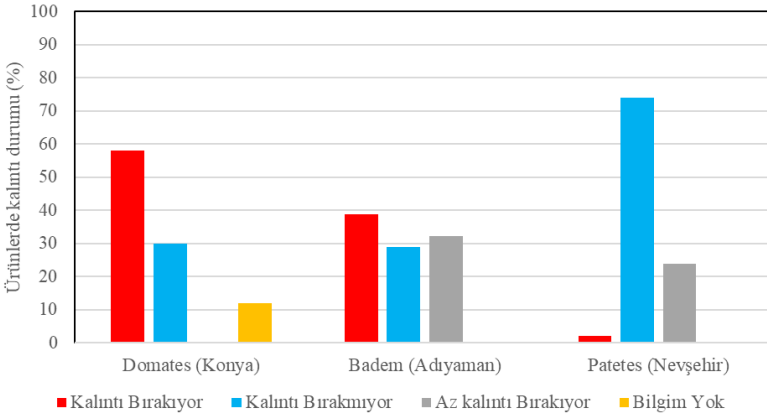
3.7. Pestisit Uygulama Sayıları

Antepfıstığı üreticilerinin Gaziantep'te %89, Adıyaman'da %70 ve Şanlıurfa'da ise %59'unun üç kez ilaçlama yaptığı belirlenirken, aynı illerde sırasıyla üreticilerin %11, 30 ve 41'inin ise iki kez ilaçlama yaptığı saptanmıştır (Çevik, 2019). Harran Ovası'nda sebze üreticileri ile gerçekleştirilen anket çalışmasında, üreticilerin %13'ünün bir kez, %26'sının iki kez, %52'sinin üç kez ve %9'unun ise dört kez ilaçlama yaptığı bildirilmiştir (Çıkman ve Yarba, 2008). Diyarbakır'da Mercimek üreticilerinin ise yabancı otlarla mücadele amacıyla %29'unun bir kez, %71'inin ise iki kez herbisit uygulaması yaptıkları ortaya konulmuştur (Uruç ve Bozdoğan, 2024). Farklı kültür bitkilerinde bitki koruma sorunlarına bağlı olarak farklı sayılarda ilaçlama yapıldığı görülmektedir.

Diyarbakır, Mardin ve Şanlıurfa'daki pamuk üreticilerinin %35'inin iki kez ilaçlama, %29'unun üç kez ilaçlama ve %15'inin ise dört kez ilaçlama yaptığı bildirilmiştir. Bir kez ilaçlama yapanların oranı ise %10'un altında olduğu ifade edilmiştir (Bayhan ve ark. 2015). Aynı bölgede Yücel ve ark. (1995), kimyasal mücadele yapmayanların oranının %15, bir kez ilaçlama yapanların oranının %52.9, iki kez ilaçlama yapanların oranının %23.5, üç kez ilaçlama yapanların oranının %21.6, dört ve daha fazla yapanların oranının ise yaklaşık %2.0 olduğunu bildirmiştir. Yaklaşık 20 yıllık süreçteki ilaçlama sayılarındaki artışın, GAP'ın sulamaya açılmasının yanı sıra, üretimde sorun olan etmenlerdeki muhtemel direnç sorunu nedeniyle olabileceği değerlendirilmektedir.

3.8. Kalıntı Konusuna Yaklaşımları

Kimyasal ilaç kullanımının çevrede ve tüketilen ürünlerde kalıntı oluşturup oluşturmadığı, insan ve çevre sağlığı açısından önemlidir. Genel üreticiler ile Konya'da yapılan anket çalışmasında, tarım ürünündeki ilaç kalıntısı sorununu önemseyen çiftçi oranı % 14.3 olarak belirlenirken, aynı soruda, “önemli olan zararlıyı öldürmektir” diyenlerin oranı ise %48.6 olarak belirlenmiştir (İnan ve Boyraz; 2002). Domates üreticileri ile Konya'da yapılan bir başka bir çalışmada önceki çalışma ile benzer sonuçlar elde edilmiştir, Üreticilerin %58'inin pestisitlerin üründe kalıntı oluşturduğunu, %30'unun ise pestisitlerin kalıntı bırakmadığı ve %12'sinin ise kalıntısı konusunda bilgi sahibi olmadığı ifade edilmiştir (Peker; 2012). Badem üreticileri ile Adıyaman'da yapılan çalışmada ise, üreticilerin %38.7'sinin pestisitlerin üründe kalıntı bıraktığını, %32.3'ünün az kalıntı bıraktığını ve %29'unun ise üründe kalıntı bırakmadığını düşündükleri ortaya konulmuştur (Erdoğan ve ark.; 2017). Patates üreticileri ile Nevşehir'de yürütülen çalışmada, üreticilerin %74.1'inin ilaçların üründe kalıntı bırakmadığı, %23.8'inin sınırlı kalıntı bıraktığı ve %2.1'inin ise üründe çok kalıntı bıraktığının farkında oldukları saptanmıştır (Erdoğan ve Gökdoğan, 2017) (Şekil 6). Son yıllarda yapılan çalışmalarda kalıntı konusunda üreticilerin daha fazla bilinçlendiği değerlendirilmektedir.



Şekil 6. Üreticilerin pestisit kullanımının üründe kalıntı oluşturma durumu hakkındaki düşünceleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, üreticilerin bitki koruma konusundaki bilgi düzeyleri ve uygulama yaklaşımlarının çeşitli bölgelerde benzer sorunlar etrafında şekillendiğini ortaya koymaktadır. Üreticilerin kimyasal mücadeleye aşırı bağımlılığı, alternatif mücadele yöntemlerinin bilinmemesi, yanlış doz uygulamaları, mücadele zamanının hatalı belirlenmesi ve çevresel duyarlılığın düşük olması en belirgin problemlerdir. Entegre mücadelenin temel prensiplerinden olan ekonomik zarar eşiğine ulaşan popülasyonlarda mücadele yapılması noktasında da, bazı üreticilerin zararlı semptomlarını görmeden ilaçlama yaptıkları belirlenmiştir.

Üreticilerin bilgi kaynakları incelendiğinde, zirai ilaç bayilerinin yönlendirmelerinin halen etkin olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bazı ürün grupları ile uğraşan üreticilerde, tarım teşkilatlarına (teknik uzman vb.) danışma oranlarının da yüksek olduğu görülmektedir.

Kutlar ve Ceylan (2008) tarafından 2006 yılında Antalya İli Merkez ilçesinde yürütülen ve entegre mücadele yöntemlerinin yayılması ve benimsenmesini inceleyen bir araştırmada; üreticilerin İl Müdürlüğü tarafından yürütülen “Entegre Mücadele Araştırma, Uygulama ve Eğitim” projesinin hedefe ulaşma durumu değerlendirilmiştir. Sonuç olarak söz konusu proje ile, Entegre Mücadelenin yaygınlaştırılması ve benimsenmesi anlamında sınırlı bir yol katedildiği, entegre mücadele yönteminin üreticiler arasında yeterince tanınmayan ve ne olduğu tam olarak kavranamayan bir yenilik olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca projeye katılan ve katılmayan üreticilerin tarımsal

m¼cadelede uyguladıkları yöntemler bakımından önemli bir fark olmadığı belirlenmiştir.

Kimyasal mücadelenin, insan ve hayvan sağlığını tehdit etmesi, gıda maddelerinde oluşturduğu ilaç kalıntıları, çevreyi kirletmesi ve yüksek pestisit fiyatları vb. nedenler dikkate alındığında, kimyasal mücadeleye alternatif çevre dostu ve daha sürdürülebilir mücadele yöntemlerinin üreticilere benimsetilmesi gerekliliğı ortaya çıkmaktadır. Özellikle bu yöntemler arasında potansiyel olarak sürdürülebilir tarım sistemlerine uyumuyla ön plana çıkan, “Biyolojik ve Biyoteknik Mücadele”nin üreticilere benimsetilmesi konusunda eğitim ve yayım çalışmalarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda, teknik danışmanlık mekanizmalarının güçlendirilmesi ve reçete sisteminin uygulanması ile üreticilerin kimyasal mücadelenin olumsuzlukları ve alternatif çevre dostu mücadele metotları konusunda bilinçlenmelerine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- Ay, R., Yalçın, Ş., Sökeli, E., & Karaca, İ. (2006). Antalya ili Korkuteli ilçesi sert çekirdekli meyve üretici profilinin bitki koruma uygulamaları yönünden incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 52-55.
- Bayhan, E., Sağır, A., Uygur, F.N., Bayhan, S.Ö., Eren, S., & Bayram, Y. (2015). GAP Bölgesi pamuk alanlarındaki bitki koruma sorunlarının belirlenmesi. *Türkiye Entomoloji Bülteni*, 5(3):135-146.
- Boz, Ö., Erol, T., Benlioğlu, S., & Öncüer, C. (1998). Aydın ilindeki zirai mücadele uygulamalarının sosyo-ekonomik yönden değerlendirilmesi. *Türkiye Entomoloji Dergisi*, 22(2), 123-136.
- Çevik, H. (2019). Antepfıstığı yetiştiriciliğinde bitki koruma uygulamalarına ait sorunların belirlenmesi. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Çıkman, E., & Yarba, M. M. (2008). Harran ovası'nda sebze yetiştiriciliğinde karşılaşılan bitki koruma sorunları. *Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(1), 7-12.
- Emeli, M. (2006). Seyhan ve Yüreğir havzasında bitki koruma yöntemlerinin uygulamadaki sorunları üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Erdoğan, O., & Gökdoğan, O. (2017). Nevşehir ilinde patates üreticilerinin bitki koruma uygulamaları. *Derim*, 34(1), 51-60.
- Erdoğan, O., Tohumcu, E., Baran, M. F., & Gökdoğan, O. (2017). Adıyaman ili badem üreticilerinin zirai mücadele uygulamalarının değerlendirilmesi. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 5(11), 1414-1421.
- Gözener B, Sayılı M, Çağlar A. (2017). Tokat ili Kazova Bölgesinde domates yetiştiriciliğinde ilaç kullanımı. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(5): 451-458.
- İnan, H., & Boyraz, N. (2002). Konya çiftçisinin tarım ilacı kullanımının genel olarak değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16(30):88-101
- Kadıoğlu, İ. (2003). Tokat ilinde üreticilerin zirai mücadele etkinlikleri üzerinde bir araştırma. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1):7-15.
- Kalkışım Ö., Onaran A, Azeri FN, & Turan A. (2011). Gümüşhane ili ve ilçelerinde meyveciliğin genel durumu ve çiftçi uygulamaları üzerine bir araştırma. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(2): 123-134.

- Kızılay H, & Akçaöz H. (2009). Elma yetiştiriciliğinde ilaç ve gübre kullanımında ekonomik kaybın incelenmesi: Antalya İli Örneği. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(1): 113-119.
- Kutlar, İ., & Ceylan, C. (2008). Antalya İli Merkez İlçesinde entegre mücadele yönteminin yayılması ve benimsenmesi, *Bahçe*, 37 (1): 25 – 33.
- Peker, A.E. (2012). Konya ili domates üretiminde tarımsal ilaç kullanımına yönelik çevresel duyarlılık analizi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1):47-54
- Tiryaki, O., Canhilal, R., & Horuz, S. (2010). Tarım ilaçları kullanımı ve riskleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(2), 154-169.
- Tücer A, Polat İ, Küçüker M, & Özercan A. (2004). Manisa - Saruhanlı bağ alanlarında tarımsal ilaç uygulamalarındaki sorunların saptanması. *ANADOLU Journal of Aegean Agricultural Research Institute*, 14(1): 128-141.
- Uruç, B., & Bozdoğan, O. (2024). Mercimek üretimi yapan çiftçilerin yabancı ot farkındalığı: Diyarbakır ili örneği. *5th International 5 Ocak Congress On Applied Sciences Proceeding Book*, January 5-6, 2024 Adana, Türkiye, p: 87-88
- Uygun, N , Ulusoy, M, & Satar, S . (2016). Biyolojik mücadele. *Türkiye Biyolojik Mücadele Dergisi*, 1 (1) : 1-14.

2. Bölüm

Akıllı Sera Sistemlerinde Dijital Dönüşümün Öncesi ve Sonrası

Burak DALKILIÇ¹
Yeşim BOZKURT ÇOLAK¹

1.Giriş

Küresel ölçekte artan sıcaklık anomalileri, düzensiz yağış rejimleri, atmosferik CO₂ yoğunluğundaki artış ve ekstrem hava olaylarının sıklığındaki yükseliş, tarımsal üretim sistemlerinin sürdürülebilirliğini tehdit eden temel unsurlar arasında yer almaktadır. İklim değişikliğinin olumsuz etkileri, insanların gıdaya erişimini etkileyecek olup, bu durumun ürün desenlerinde değişikliklere yol açması kaçınılmazdır (Baydar ve ark., 2025a). Arora (2019), sıcaklık artışları ve yağış düzensizliklerinin buğday, pirinç ve mısır gibi temel ürünlerde %20–50 arasında verim kaybına yol açabileceğini belirtmektedir. Benzer şekilde Malhi ve ark. (2021), küresel ısınmanın evapotranspirasyon oranlarını artırarak bitki fizyolojisini baskıladığını ve mevcut üretim modellerinin giderek daha kırılgan hâle geldiğini vurgulamaktadır. İklim değişikliğinin olumsuz etkileri ve sınırlı su kaynakları nedeniyle, tarımsal alanlarda teknolojilerin ve araştırmaların geliştirilmesi gerekmektedir (Çelik ve ark., 2024). Bu eğilimler, geleneksel tarım sistemlerinin çevresel değişkenlere bağımlılığının artık ciddi bir yapısal risk unsuru hâline geldiğini göstermektedir. İklim değişikliğinin etkileri alansal ve zamansal ölçekte farklılık gösterecektir. Hangi bölgelerde hangi sektörlerin hangi düzeyde etkileneceğinin belirlenmesi, ülkelerin iklim değişikliğinin sonuçlarına hazırlıklı olması ve iklim değişikliğine uyum bakımından çok önemlidir (Baydar ve Bozkurt Çolak, 2024).

Tarımsal üretim üzerindeki baskılar yalnızca iklimsel unsurlarla sınırlı değildir. Creutzig ve ark. (2019), 2000–2010 döneminde küresel arazi kullanımındaki dönüşümlerin hem biyofiziksel hem de sosyoekonomik baskıları artırdığını; özellikle tarım arazilerinin, meraların ve yüksek karbon stoklu alanların eş zamanlı stres altında kaldığını ortaya koymaktadır. Artan nüfus, kentleşme ve doğal kaynakların giderek daralması göz önünde

¹Ar. Gör.; Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

¹Doç. Dr.; Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

bulundurulduğunda, sürdürülebilir tarımsal üretimin ancak çevresel değişkenlerden daha az etkilenen, kontrollü ve kaynak verimliliği yüksek üretim modelleriyle desteklenebileceği anlaşılmaktadır (Uçak, 2018; Gençoğlu ve ark., 2019).

Ülkemizde tarımsal üretim alanlarının genellikle dağınık, parçalı ve yaşam alanlarına uzak olması nedeniyle farklı yerlerdeki üretimin aynı anda kontrol edilebilmesi zordur. Bu durum bilişim/haberleşme teknolojisinin kullanılması için önemli bir fırsat vermiştir (Baydar ve ark., 2025b). Bu bağlamda dijital dönüşüm tarımsal üretim için kritik bir uyum mekanizması olarak ortaya çıkmıştır. Dijital tarımın gelişimi 1990'lı yıllarda GPS tabanlı konumlandırma ve sensör teknolojilerinin kullanımıyla başlayan hassas tarım yaklaşımıyla şekillenmiş; 2000'li yıllarda bilgi iletişim teknolojilerindeki gelişmelerle ivme kazanmış; 2015 sonrası dönemde ise IoT tabanlı izleme ağları, makine öğrenmesi algoritmaları, büyük veri analitiği ve dijital ikiz modellerinin üretime entegre edilmesiyle Tarım 4.0 paradigmasına dönüşmüştür (Gebbers ve Adamchuk, 2010; Zhang ve ark., 2002; Wolfert ve ark., 2017; Lioutas ve Charatsari, 2020). Böylece dijitalleşme, çevresel kırılganlıkların arttığı bir dönemde belirsizliği azaltan, karar destek mekanizmalarını güçlendiren ve üretim süreçlerini optimize eden yeni bir tarımsal yönetim anlayışı ortaya koymuştur.

Akıllı sera teknolojileri, dijital dönüşümün kontrollü ortam tarımında somutlaştığı en gelişmiş uygulama alanıdır. RaboResearch Food ve Agribusiness'in (2025) küresel raporuna göre dünya genelinde yaklaşık 3.7 milyon hektarlık sera alanı bulunmakta ve bu alanın teknoloji düzeyi bölgelere göre belirgin farklılıklar göstermektedir. Raporda yüksek teknoloji seralarının büyük ölçüde Avrupa'da yoğunlaştığı, Asya ve Afrika'da ise düşük ve orta teknoloji seviyelerinin baskın olduğu belirtilmektedir. Aynı rapor, 2024 yılında İspanya ve İtalya'da aşırı yağış ve dolu olaylarının yüzlerce hektarlık sera alanında ciddi kayıplara yol açtığını ortaya koyarak seracılığın dahi iklim değişikliği karşısında kırılgan olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, akıllı seraların yalnızca verimi artırmak için değil, aynı zamanda iklim risklerine uyum sağlamak için de stratejik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye, yaklaşık 764 bin dekar örtü altı üretim alanıyla Akdeniz havzasının önde gelen üreticilerinden biri olup özellikle domates, hıyar ve biber üretiminde güçlü bir konuma sahiptir. Tarım ve Orman Bakanlığı'nın 2025 yılı raporunda Türkiye'de yayla seracılığı, topraksız tarım ve jeotermal enerji destekli üretim modellerinin yaygınlaştığı; ancak modern otomasyon altyapısının yatırım maliyetleri, enerji giderleri ve dijital okuryazarlık gibi nedenlerle sınırlı şekilde ilerlediği belirtilmektedir. Bu durum, Türkiye'nin iklim değişikliğinin etkilerini

hafifletmek ve rekabet gücünü artırmak için akıllı sera teknolojilerine daha sistematik biçimde yönelmesi gerektiğini göstermektedir.

Tüm bu eğilimler ışığında akıllı seralarda dijital dönüşüm, yalnızca bir teknolojik yenilik olarak değil; sürdürülebilir gıda üretiminin, iklim değişikliğine uyumun ve tarımsal rekabet gücünün temel belirleyicilerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Literatürde dijital seraların teknik bileşenleri, enerji verimliliği ve kaynak yönetimi üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte, küresel eğilimleri, teknolojik yapı taşlarını ve Türkiye'nin sektörel dönüşüm kapasitesini bütüncül bir çerçevede ele alan kapsamlı bir değerlendirme eksikliği bulunmaktadır. Bu kitap bölümü, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla akıllı sera teknolojilerinin bilimsel temellerini, dijital dönüşüm dinamiklerini, küresel ve ulusal uygulama örneklerini ve geleceğe yönelik stratejik yönelimleri disiplinler arası bir bakış açısıyla ele almaktadır.

2.Dijitalleşme Öncesi Sera Yapılarının Evrimi, Yapısal Sınırlılıkları ve Teknolojik Dönüşümün Zorunluluğu

Dijitalleşme öncesi sera sistemleri, günümüz akıllı sera teknolojilerinin ulaştığı bütüncül kontrol kapasitesi ile karşılaştırıldığında oldukça sınırlı bir mühendislik anlayışı üzerine inşa edilmişti. Bu sistemler, temel olarak bitkileri dış çevresel streslerden korumayı amaçlayan pasif bir mikroiklim oluşturma yaklaşımına dayanmakta; sıcaklık, nem, radyasyon ve hava akımı gibi kritik çevresel değişkenler büyük ölçüde manuel müdahalelerle yönetilmekteydi. Badji ve ark. (2022), geleneksel sera tasarımlarının yapı geometrisi, örtü malzemesi ve doğal havalandırma özellikleri üzerinden şekillendiğini, ancak bu yapıların çevresel dalgalanmalara hassasiyetinin yüksek olduğunu ve mikroiklim kararlılığının düşük seviyede kaldığını vurgulamaktadır. Bu durum, özellikle sıcaklık değişimlerinin hızlı olduğu bölgelerde bitkisel üretimi büyük ölçüde sınırlandırmıştır.

Geleneksel seralarda kullanılan kontrol sistemleri, çoğu zaman tek sensörlü veya sensörsüz mekanik düzeneklere dayanmakta; çevresel koşullar üretici tecrübesiyle tahmin edilerek ayarlanmaktadır. Bu yaklaşım, Soussi ve ark. (2022) tarafından açıklandığı gibi, özellikle sıcak ve kurak iklimlerde ciddi performans sorunlarına yol açmaktadır. Sıcaklık ve bağıl nem kontrolünün pasif yöntemlerle sağlandığı bu sistemlerde, dış ortam sıcaklığı arttığında iç ortamda 10–15 °C'ye varan aşırı ısınmalar görülmekte, doğal havalandırmanın yetersiz kaldığı dönemlerde ise nem birikimi fungal hastalıkların yayılmasını hızlandırmaktadır. Aynı çalışmada, evapotranspirasyon, solar radyasyon ve dış ortam neminin birbirini tetikleyen karmaşık ilişkileri nedeniyle manuel

kontrolün çoğu zaman gecikmeli, yetersiz ve enerji açısından verimsiz olduğu belirtilmektedir.

Bu dönemin en kritik sınırlılığı, karar alma süreçlerinin reaktif olmasıdır. Manuel açılır pencereler, gölgeleme elemanları veya basit soğutma yöntemleri ancak stres oluşuktan sonra devreye girmekte; böylece sera içi mikroiklim çoğu zaman optimum büyüme aralığının dışına çıkmaktadır. Pawlowski ve ark. (2009) tarafından yapılan simülasyon çalışmalarında, geleneksel kontrol sistemlerinin ani sıcaklık yükselmelerine yanıt veremediği, nem kontrolünde ise zaman gecikmeleri nedeniyle ideal VPD (Vapor Pressure Deficit) aralığının korunamadığı gösterilmiştir. Bu bulgu, akıllı seralara geçişin temel motivasyonlarından biri olan mikroiklim kararlılığı problemini açıkça ortaya koymaktadır.

Enerji yönetimi açısından da dijitalleşme öncesi sera yapıları oldukça dezavantajlıdır. Yetersiz yalıtım, ısı kayıplarının yoğunluğu ve mekanik sistemlerin sürekli çalışması hem enerji tüketimini artırmış hem de işletme maliyetlerini yükseltmiştir. Bersani ve ark. (2020), geleneksel sıcaklık kontrol yöntemlerinin enerji tüketiminin %80'ine kadarını oluşturduğunu; özellikle gece-gündüz sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerde ısı kayıplarının dramatik seviyelere ulaştığını ifade etmektedir. Isıtma ve soğutma sistemlerinin çoğunlukla sabit zamanlı kontrol mantığına dayanması, enerji optimizasyonunun tamamen imkânsız hâle gelmesine neden olmuştur.

Dijitalleşme öncesi yapısal sınırlılıklar yalnızca iklim kontrolü ile sınırlı değildir. Soussi ve ark. (2022) tarafından detaylandırıldığı üzere, doğal havalandırmaya bağımlı bu sistemlerde hava değişim oranı rüzgâr yönü ve hızına bağlı olarak büyük dalgalanmalar göstermekte, bu da CO₂ dağılımının homojenliğini engellemektedir. CO₂ seviyesinin düşmesi fotosentetik verimi sınırlamakta, sıcaklık stresleri ise bitki metabolizmasını baskılamaktadır. Ayrıca aşırı nem koşullarında damlama, ısıma kayıplarını artırarak fotosentetik aktif radyasyon alımını azaltmakta ve üretim verimliliğini düşürmektedir.

Bu bağlamda, dijitalleşme öncesi sera yapıları;

- (i) yetersiz sensör altyapısı,
- (ii) otomasyon eksikliği,
- (iii) enerji verimsizliği,
- (iv) çevresel değişkenlere düşük adaptasyon,
- (v) manuel müdahale gerektiren reaktif kontrol,

vb. yapısal sorunlar nedeniyle sürdürülebilir üretim için yetersiz kalmıştır.

Bu sınırlılıkların sistematik biçimde tanımlanması, akıllı sera teknolojilerinin neden kaçınılmaz bir dönüşüm olduğunun da temel bilimsel gerekçesini oluşturmaktadır. Nitekim Ghiasi ve ark. (2023) tarafından yürütülen sistematik

inceleme, modern akıllı sera tasarımının yalnızca yeni bir mühendislik yaklaşımı değil, aynı zamanda geleneksel sistemlerin teknik açıklarını kapatmak için zorunlu bir paradigma değişimi olduğunu ortaya koymaktadır. Enerji tüketiminin optimize edilmesi, çok değişkenli kontrol algoritmalarının uygulanabilmesi, sensör ağlarının entegrasyonu ve veri odaklı karar verme süreçleri, dijitalleşme öncesi yapıların hiçbirinde bulunmayan ancak modern seraların sürdürülebilirlik hedefleri için kritik öneme sahip fonksiyonlardır.

Sonuç olarak, dijitalleşme öncesi sera teknolojileri, çevresel kontrolün sınırlı olduğu, enerji tüketiminin yüksek seyrettiği ve üretim risklerinin büyük ölçüde manuel yönetime bağlı olduğu bir dönemi temsil etmektedir. Bu dönem, akıllı sera teknolojilerinin yalnızca bir inovasyon değil, aynı zamanda tarımsal üretimin geleceği için teknik ve ekonomik açıdan zorunlu bir dönüşüm olduğunu göstermiştir.

3. Dijitalleşme Sonrası Akıllı Sera Sistemlerinin Bütünleşik Mimarisi

Dijital dönüşüm ile birlikte akıllı seralar, çevresel değişkenlerin yalnızca anlık olarak izlendiği geleneksel kontrollü üretim alanlarından çıkarak, fiziksel süreçlerin dijital modellerle bütünleştirildiği gelişmiş siber-fiziksel sistemlere (CPS) dönüşmüştür. CPS mimarisi, sensörlerden elde edilen verilerin IoT tabanlı ağlar üzerinden iletilmesini, bu verilerin sis ve bulut bilişim katmanlarında işlenmesini, dijital ikiz platformlarında modellenmesini ve nihayetinde yapay zekâ ile öngörücü kontrol algoritmaları tarafından optimize edilmesini içeren bütünleşik bir yapı sunar (Ghiasi ve ark., 2023; Verdouw ve ark., 2021). Böylece akıllı seralar, yalnızca reaktif tepkiler veren sistemlerden öngörüşel kararlar üretebilen, öğrenebilen ve kendi kendini optimize eden otonom üretim altyapılarına dönüşmektedir.

Bu bölümde, güncel literatürün ortaya koyduğu kavramsal modeller çerçevesinde, akıllı sera sistemlerinin bütünleşik mimarisi beş temel katmanda ele alınmaktadır: duyumsama katmanı, haberleşme katmanı, bilgi işleme ve yapay zekâ katmanı, eyleyici katmanı ve bulut-sis (cloud-fog) tabanlı dijital ikiz entegrasyonu.

3.1. Duyumsama Katmanı: Çok Noktalı, Yüksek Çözünürlüklü Veri Ekosisteminin Oluşturulması

Akıllı sera mimarisinin temelini oluşturan duyumsama katmanı, fiziksel ortamda gerçekleşen tüm çevresel değişkenlerin yüksek doğrulukla, süreklilik içinde ve çok noktalı bir yapı üzerinden ölçülmesini sağlar. Modern seralarda sıcaklık, bağıl nem, CO₂ yoğunluğu, PAR (fotosentetik aktif radyasyon), toprak su içeriği, hava akımı ve kök bölgesi sıcaklığı gibi değişkenler tek bir sensörle

değil, geniş alanlara dağıtılmış çoklu sensör ağlarıyla üç boyutlu olarak izlenmektedir. Bu yaklaşım, mikroiklim içinde ortaya çıkan lokal farklılıkların belirlenmesine imkân tanıyarak hem iklim kontrol sistemlerinin hassasiyetini artırmakta hem de enerji tüketiminin optimize edilmesine katkı sunmaktadır. Örneğin sera tavanında biriken sıcak havanın alt bölümlere ulaşmaması veya yoğun bitki dokusunun bulunduğu bölgelerde nem birikiminin artması gelişim süreçlerini doğrudan etkilediğinden bu farklılıkların doğru biçimde tespit edilmesi kritik öneme sahiptir.

Kablosuz sensör ağları (WSN), bu mikroiklim farklılıklarını yüksek çözünürlükle ortaya koyabilen en etkin duyumsama teknolojilerinden biridir. Pawlowski ve ark. (2009), WSN tabanlı sistemlerin mekânsal veri yoğunluğunu artırarak sıcaklık ve nem dağılımlarını daha ayrıntılı biçimde haritalandırdığını ve bu sayede havalandırma-ısıtma sistemleriyle ilişkilendirilen iklim kontrol hatalarının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Badji ve ark. (2022), ise düşük güçlü IoT protokollerinin geniş ölçekli sensör dizilimlerinde veri sürekliliğini güvence altına aldığını, geleneksel kablolu sistemlere göre daha esnek ve ölçeklenebilir çözümler sunduğunu ifade etmektedir. Bu sayede duyumsama katmanı, yalnızca veri toplayan pasif bir yapı olmaktan çıkıp seranın her bölgesine eş zamanlı erişim sağlayan aktif bir gözlem ağına dönüşmüştür.

Duyumsama katmanının bir diğer önemli niteliği, toplanan verilerin dijital ikiz platformlarına aktarılmadan önce gömülü cihazlarda işlenen bir dizi ön süreçten geçmesidir. Bu aşamada sensör verileri filtrelenir, gürültü azaltma algoritmaları uygulanır, hatalı veya eksik ölçümler tespit edilip ayıklanır ve gerekli durumlarda sensör füzyonu ile farklı kaynaklardan gelen bilgiler birleştirilir. Rahman ve ark. (2024), bu ön işlemenin dijital ikiz modellerinin doğruluğunu korumada belirleyici bir rol oynadığını, çünkü ham verideki küçük tutarsızlıkların bile zaman içinde simülasyon sonuçlarını bozabileceğini belirtmektedir. Temelkova ve Bakalov (2023) ise CPS altyapılarında sensör füzyonu tekniklerinin model kararlılığını artırdığını ve fiziksel sistem ile dijital model arasındaki uyumu güçlendirdiğini ifade etmektedir. Bu yönüyle duyumsama katmanı, akıllı seraların veri güvenilirliğini ve bütün sistem mimarisinin istikrarını belirleyen ilk kalite kontrol basamağını oluşturmaktadır.

3.2. Haberleşme Katmanı: IoT Tabanlı Veri Akışının Sis ve Bulut Mimarilerinde Yönetimi

Akıllı sera mimarisinin ikinci temel bileşeni olan haberleşme katmanı, duyumsama katmanında toplanan çevresel verilerin güvenilir, kesintisiz ve düşük gecikme süresiyle bilgi işleme sistemlerine aktarılmasını sağlayan kritik

bir altyapıyı temsil eder. ZigBee, Wi-Fi, LoRaWAN ve MQTT gibi IoT tabanlı iletişim protokollerinin kullanımı, yüzlerce sensörün aynı ağ üzerinde çalışmasını mümkün kılarak sera içerisinde sürekli bir veri akışı oluşturur (Badji et al., 2022; Bersani et al., 2022). Bu protokoller özellikle düşük enerji tüketimi, geniş kapsama alanı ve kararlı veri iletim performansı gibi avantajlarıyla modern akıllı seraların gereksinimlerine uyum sağlar. Bu kapsamda haberleşme katmanı, seranın fiziksel ortamı ile dijital modelleme altyapısı arasında güvenli bir köprü görevi görerek, veri akışının sürekliliğini ve doğruluğunu garanti eder.

Bununla birlikte, toplanan verilerin doğrudan bulut ortamına iletilmesi her zaman ideal bir çözüm sunmamaktadır. Yüksek veri hacmi nedeniyle bulut altyapısı zaman zaman gecikmelere, trafik yoğunluğuna veya paket kayıplarına neden olabilir. Bu nedenle modern akıllı sera uygulamalarında fiziksel sensör katmanı ile bulut sistemi arasında bir sis bilişim (fog computing) katmanı konumlandırılmaktadır. Rahman ve çalışma arkadaşları (2024), sis bilişimin veriyi yerel olarak işleyerek yalnızca gerekli bilgileri buluta gönderdiğini, böylece hem ağ yükünü hafiflettiğini hem de zaman kritik işlemlerde gecikme süresini önemli ölçüde azalttığını vurgulamaktadır. Verdouw et al. (2021) ise dijital ikizlerin gerçek zamanlı senkronizasyonu için düşük gecikmeli iletişim altyapısının zorunlu olduğunu belirtirken, Subahi (2024) CPS tabanlı akıllı seralarda haberleşme performansının tüm sistemin kararlılığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ifade etmektedir.

Sis bilişim katmanının sağladığı bu avantajlar sayesinde havalandırma, soğutma, ısıtma ve sulama gibi zaman duyarlı eyleyici sistemleri daha hızlı ve doğru biçimde kontrol edilebilmektedir. Özellikle ani sıcaklık artışları veya yüksek nem birikimi gibi kritik durumlarda kontrol sisteminin anlık tepki verebilmesi için ağ gecikmesinin minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. IoT tabanlı çok katmanlı iletişim yapısı, bu gereksinimi karşılayarak akıllı sera mimarisinin ölçeklenebilir, sürdürülebilir ve otonom bir üretim altyapısına dönüşmesini mümkün kılmaktadır (Ghiasi et al., 2023). Böylece haberleşme katmanı, hem veri güvenliğini hem de karar verme süreçlerinin doğruluğunu doğrudan etkileyen stratejik bir bileşen olarak sistem mimarisinde merkezi rol üstlenmektedir.

3.3. Bilgi İşleme Katmanı: Dijital İkiz, Yapay Zekâ ve Öngörücü Kontrol

Bilgi işleme katmanı, akıllı seraların karar üretme mekanizmasının merkezinde yer alan ve fiziksel ortamdan toplanan verilerin analiz edilerek anlamlı sonuçlara dönüştürüldüğü kritik bir yapı taşını temsil eder. Bu katmanın

temelinde, fiziksel seranın sürekli güncellenen sanal bir yansıması olan dijital ikiz bulunmaktadır. Dijital ikiz, sensörlerden gelen gerçek zamanlı verileri süreç modelleri, simülasyon araçları ve geçmiş verilerle karşılaştırarak seranın gelecekteki davranışını öngörmeye imkân tanır. Verdouw ve ark. (2021), dijital ikizlerin yalnızca mevcut durum takibi için değil, aynı zamanda riskli senaryoların test edilmesi ve kontrol algoritmalarının performans doğrulaması için de güçlü bir araç olduğunu vurgulamaktadır. Rahman ve ark. (2024), ise 5G tabanlı iletişim altyapısının dijital ikizlerin güncellenme hızını artırarak çok daha hassas kontrol mekanizmaları kurulmasına olanak sağladığını belirtmektedir.

Dijital ikiz modelleri, yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla desteklendiğinde çok daha öngörüşel ve otonom bir yapıya kavuşmaktadır. Ghiasi ve ark. (2023), yapay zekâ modellerinin sıcaklık, nem, CO₂ yoğunluğu ve enerji tüketiminin tahmininde yüksek doğruluk sağladığını, böylece seranın iklim yönetimi ve enerji optimizasyonunda önemli iyileşmeler elde edildiğini göstermiştir. Makine öğrenmesi tabanlı zaman serisi analizleri, çevresel değişkenlerin kısa ve orta vadeli eğilimlerini öngörerek kontrol algoritmalarına derinlik kazandırmakta; derin öğrenme tabanlı görüntü işleme yöntemleri ise hastalık tespiti, yaprak rengi analizi ve stres belirleme gibi süreçlerde erken uyarı kapasitesini artırmaktadır. Bu çok katmanlı bilgi işleme süreci, akıllı seraların yalnızca mevcut duruma tepki vermesini değil, gelecekte oluşabilecek koşullara karşı proaktif kararlar üretmesini mümkün kılar.

Bilgi işleme katmanında kullanılan en gelişmiş kontrol yöntemlerinden biri olan Model Öngörülü Kontrol (MPC), seranın dinamik yapısını matematiksel olarak modelleyerek gelecekteki durumları hesaplar ve bu hesaplamalara dayanarak en uygun kontrol sinyallerini üretir. MPC'nin klasik PID kontrol yöntemlerine göre en önemli avantajı, sistemin doğrusal olmayan davranışlarını, gecikmeleri ve çoklu değişken etkileşimlerini aynı anda hesaba katabilmesidir. Bersani ve ark. (2020), MPC'nin enerji tüketimini %15–30 oranında azaltarak işletme maliyetlerini düşürdüğünü ve sıcaklık-nem dalgalanmalarını belirgin ölçüde azalttığını raporlamaktadır. Temelkova ve Bakalov (2023) ise MPC'nin CPS mimarisiyle bütünleştğinde kontrol kararlılığını artırdığını ve dijital ikizle birlikte çalıştığında hata toleransını minimize ettiğini ifade etmektedir. Bu nedenle bilgi işleme katmanı, akıllı seraların öngörücü, esnek ve sürdürülebilir bir yapıya dönüşmesinde kilit rol oynamaktadır.

3.4. Uygulayıcı Sistemler Katmanı: Dijital Kararların Fiziksel Ortama Aktarılması

Uygulayıcı sistemler katmanı, bilgi işleme ve kontrol katmanlarında üretilen dijital kararların sera ortamına fiziksel müdahaleye dönüştürüldüğü kritik bileşenlerden oluşur. Bu katman; HVAC sistemleri, pad–fan soğutma üniteleri, sisleme mekanizmaları, damla sulama pompaları, CO₂ zenginleştirme sistemleri, gölgeleme perdeleri ve LED tabanlı bitki aydınlatmaları gibi çok sayıda eyleyiciyi kapsamaktadır. Her bir eyleyici, dijital ikiz ve kontrol algoritmaları tarafından üretilen komutlara yanıt vererek sera içerisindeki sıcaklık, bağıl nem, ışık yoğunluğu ve gaz konsantrasyonu gibi temel çevresel değişkenlerin dinamik olarak düzenlenmesini sağlar. Bu yönüyle uygulayıcı sistemler katmanı, akıllı seralarda soyut kararların somut iklim düzenlemesine dönüştüğü uç nokta bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

Bu katmanın performansı büyük ölçüde tepki süresi ve iletişim gecikmesi gibi zamana duyarlı göstergelere bağlıdır. Rahman ve ark. (2024), uygulayıcı sistemlerin özellikle ani sıcaklık artışları, lokal nem birikimi veya yüksek radyasyon etkisi altında hızlı ve kararlı tepki vermesinin, mikroiklim stabilitesini korumada belirleyici olduğunu vurgulamaktadır. Sis bilişim katmanının devreye girmesiyle birlikte kontrol kararlarının yerel olarak işlenmesi, eyleyicilere gönderilen komutların gecikmesini azaltmakta ve zaman kritik senaryolarda tepki hızını artırmaktadır. Soussi ve ark. (2022), sıcak ve kurak iklim koşullarında kullanılan pad–fan ve evaporatif soğutma sistemlerinin enerji tüketimi açısından yüksek yük oluşturabildiğini, ancak doğru kontrol stratejileri ve hızlı uygulayıcı tepkisiyle bu yükün önemli ölçüde optimize edilebileceğini göstermektedir. Bu bulgular, uygulayıcı sistemler katmanının yalnızca komut uygulayan pasif bir alt bileşen değil, enerji verimliliği ve iklim dengesinin sağlanmasında doğrudan rol oynayan stratejik bir yapı olduğunu ortaya koymaktadır.

Uygulayıcı sistemler katmanı aynı zamanda akıllı sera mimarisinin kapalı döngü geri bildirim mekanizmasının ayrılmaz bir parçasıdır. Eyleyiciler tarafından gerçekleştirilen her müdahale, duyumsama katmanı aracılığıyla tekrar ölçülmekte ve elde edilen veriler dijital ikize beslenmektedir. Böylece sistem, uygulanan kontrol stratejisinin fiziksel sonuçlarını anlık olarak değerlendirebilmekte ve gerekirse parametrelerini yeniden ayarlayarak kendini optimize edebilmektedir. Bersani ve ark. (2022), IoT tabanlı geri bildirim yapılarının havalandırma ve soğutma sistemlerinde dalgalanmaları azalttığını ve çevresel değişkenlerin dar sınırlar içinde tutulmasını sağladığını belirtmektedir. Bu dinamik kapalı döngü yapı, CPS temelli akıllı seraların kendi kendini

düzenleyebilen ve öğrenebilen otonom sistemlere dönüşmesinde uygulayıcı sistemler katmanını kilit bir konuma taşımaktadır.

3.5. Siber-Fiziksel Entegrasyon: Kapalı Döngü ve Otonom Sistem İşleyişi

Siber-fiziksel entegrasyon, akıllı sera mimarisinde yer alan tüm katmanların duyumsama, haberleşme, bilgi işleme, dijital ikiz, uygulayıcı sistemler tek ve bütünleşik bir yapı içerisinde, kapalı döngü hâlinde çalışmasını sağlayan üst düzey mimari çerçeveyi ifade etmektedir. Bu yapı sayesinde fiziksel ortamdan elde edilen veriler sensörler aracılığıyla toplanır, haberleşme altyapısı üzerinden gecikme ve veri kaybı en aza indirilerek bilgi işleme katmanına iletilir, dijital ikiz üzerinde modellenir ve bu modelin çıktıları kontrol algoritmaları ile işlenerek uygulayıcı sistemlere aktarılır. Ghiasi ve ark. (2023), bu çok katmanlı mimariyi akıllı seraları klasik otomasyon düzeyinden çıkarıp öğrenebilen, uyarlanabilir ve kendi kendini optimize edebilen üretim altyapılarına dönüştüren temel unsur olarak tanımlamaktadır. Böylece sistem yalnızca çevresel değişikliklere tepki veren bir yapı olmaktan çıkmakta, aynı zamanda uzun vadeli eğilimleri analiz ederek geleceğe yönelik stratejik kararlar alabilen bir yapıya kavuşmaktadır.

Siber-fiziksel entegrasyonun en önemli özelliklerinden biri, kapalı döngü geri bildirim mekanizmasının sürekliliğidir. Uygulayıcı sistemler tarafından gerçekleştirilen her müdahale, duyumsama katmanı tarafından yeniden ölçülmekte ve bu ölçümler dijital ikiz ile karşılaştırılarak kontrol algoritmalarının doğruluğu sürekli sınanmaktadır. Verdouw ve ark. (2021), bu yapının özellikle izlenebilirlik, şeffaflık ve karar destek sistemlerinin güvenilirliği açısından büyük avantaj sağladığını belirtmektedir. Subahi (2024) ise dijital ikiz, dil mühendisliği ve CPS entegrasyonunun birlikte kullanılmasıyla sistemin hata toleransının azaldığını, karar üretme süreçlerinin daha tutarlı ve açıklanabilir hâle geldiğini vurgulamaktadır. Bu sayede akıllı seralarda yalnızca iklim kontrolü değil; aynı zamanda operasyonel planlama, bakım yönetimi ve sürdürülebilirlik göstergeleri de siber-fiziksel mimari içinde bütünleşik bir biçimde ele alınabilmektedir.

Bu bütünleşik yapı, akıllı seraların iklim değişikliği, su kıtlığı, enerji maliyetlerindeki artış ve iş gücü kısıtları gibi güncel baskılar karşısında daha dayanıklı ve uyarlanabilir üretim sistemlerine dönüşmesini sağlamaktadır. Rahman ve ark. (2024), dijital ikiz ve yapay zekâ temelli CPS entegrasyonunun 5G gibi yeni nesil iletişim teknolojileri ile desteklendiğinde, hem kontrol döngüsünün hızında hem de karar kalitesinde belirgin artışlar meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Ghiasi ve ark. (2023), ise bu mimarinin sürdürülebilir

tarımsal üretim, kaynak verimliliği ve karbon ayak izinin azaltılması açısından stratejik bir rol üstlendiğini ifade etmektedir. Sonuç olarak siber-fiziksel entegrasyon, akıllı seraları yalnızca teknik olarak gelişmiş üretim alanları olmaktan çıkarıp, dijital tarım ekosisteminin merkezinde yer alan otonom, esnek ve sürdürülebilir karar destek sistemlerine dönüştüren çatı bileşen olarak konumlanmaktadır.

4. Dijitalleşme Sonrası Akıllı Seralarda Operasyonel Performans, Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik Kazanımları

Dijitalleşme ile birlikte akıllı seralar yalnızca iklim verilerini izleyen otomasyon sistemlerinden ibaret olmaktan çıkmış; enerji, su, iklim kontrolü, ürün kalitesi ve iş gücü yönetimi gibi temel üretim bileşenlerinin bütüncül olarak optimize edildiği gelişmiş siber-fiziksel üretim ortamlarına dönüşmüştür. Sensör verilerinin IoT ağları üzerinden gerçek zamanlı olarak toplanması, bu verilerin sis ve bulut bilişim altyapılarında işlenmesi, dijital ikiz modelleri ile karşılaştırılması ve nihayetinde yapay zekâ tabanlı öngörücü kontrol algoritmaları tarafından yönetilmesi, akıllı seralarda operasyonel performansı doğrudan etkileyen yeni bir yönetim paradigması ortaya koymaktadır (Ghiasi ve ark., 2023; Verdouw ve ark., 2021). Bu dönüşüm, üretim sürecinin enerji tüketimi, su kullanım etkinliği, çevresel sürdürülebilirlik ve mikroiklim kararlılığı gibi çok sayıda çıktısını iyileştiren, veri odaklı ve öğrenen sistemlerin gelişmesini mümkün kılmıştır. Böylece akıllı seralar, yalnızca üretim koşullarına tepki veren yapılardan çıkıp, üretim sürecini öngörerek yönetebilen, kendi kendini optimize eden ve sürdürülebilirlik performansını sürekli iyileştiren otonom üretim altyapılarına dönüşmektedir.

Bu bölümde dijitalleşme sonrasında akıllı seraların performansını belirleyen dört temel bileşen ele alınmaktadır: enerji yönetimi ve ısı performans optimizasyonu, su yönetimi ve sulama verimliliği, bitki gelişimi ve ürün kalitesi üzerindeki etkiler ile sürdürülebilirlik ve karbon ayak izi kazanımları. Literatürdeki güncel araştırmalar ışığında, her bir üretim bileşeninin dijital dönüşümün ardından nasıl yeniden yapılandığı, hangi kontrol teknolojileri ile optimize edildiği ve verimlilik göstergelerine nasıl yansıdığı ayrıntılı biçimde değerlendirilecektir.

4.1. Dijitalleşme Sonrası Enerji Yönetimi ve Isıl Performans Optimizasyonu

Dijitalleşme sonrası akıllı seralarda enerji yönetimi, ısıtma, havalandırma ve soğutma süreçlerinin bütünleşik biçimde kontrol edildiği HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) sistemlerinin dijital altyapılarla

desteklenmesiyle yeni bir boyuta taşınmıştır. HVAC sistemi; ısıtıcılar, fanlar, evaporatif soğutma panelleri, ısı pompaları, hava kanalları ve nem alma ünitelerinden oluşan çok bileşenli bir yapıdır ve modern seralarda toplam enerji tüketiminin en büyük kısmını oluşturur. Mahmood ve ark. (2021) ile Maraveas ve Bartzanas (2021), HVAC'nin seranın ısıl dengesini belirleyen temel mekanizma olduğunu ve özellikle sıcaklık, bağıl nem ve hava değişim hızındaki küçük dalgalanmaların bile enerji tüketimi üzerinde belirgin etkiler yaratabildiğini vurgulamaktadır. Dijitalleşme ile birlikte HVAC artık yalnızca fiziksel koşullara tepki veren bir mekanik yapı olmaktan çıkmış; sensör ağları, yapay zekâ algoritmaları ve dijital ikiz modelleriyle etkileşen öngörücü bir iklim kontrol bileşenine dönüşmüştür.

Enerji performansındaki asıl iyileşme, ileri düzey kontrol algoritmaları ve dijital ikiz tabanlı simülasyonların HVAC karar döngüsüne entegre edilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Model Öngörülü Kontrol (MPC) yöntemleri, gelecek zamanlı sıcaklık ve nem değişimlerini tahmin ederek HVAC ve pad–fan soğutma sistemleri için optimum kontrol sinyalleri üretmekte, böylece enerji kullanımını en aza indirirken iklim stabilitesini maksimize etmektedir. Bersani ve ark. (2020), MPC tabanlı kontrol yaklaşımlarının geleneksel kontrol tekniklerine kıyasla seralarda önemli düzeyde enerji tasarrufu sağladığını ve sıcaklık–nem dalgalanmalarını azalttığını göstermektedir. Mahmood ve ark. (2021) de yarı kapalı sera koşullarında MPC temelli enerji yönetiminin ısıtma ve soğutma yüklerini dengeleyerek enerji performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Dijital ikiz modelleri ise seranın ısı transfer dinamiklerini; güneş radyasyonu, ısı kayıpları, bitki terlemesi ve dış iklimle etkileşim gibi çoklu değişkenler üzerinden temsil ederek enerji talebini önceden hesaplayabilmektedir. Hoseinzadeh ve Garcia (2024), enerji sistemlerine yönelik hibrit dijital ikiz modellerinin HVAC yükünü optimize ettiğini ve enerji sisteminin gereksiz çalışmasını engelleyerek sistem verimliliğini artırdığını bildirmektedir. Böylece enerji yönetimi, pasif tüketim izleme süreci olmaktan çıkarak veri temelli, karar odaklı ve öngörücü bir yapıya dönüşmektedir.

Enerji verimliliğinin artırılmasında HVAC'in yanı sıra yenilenebilir enerji teknolojilerinin ve aydınlatma stratejilerinin entegrasyonu da önemli rol oynamaktadır. Jeotermal kaynaklı ısı değiştiricileri ve toprak-hava ısı değişim sistemleri, sera ısıtma ve soğutma yüklerini düşürerek HVAC üzerindeki enerji baskısını azaltmakta ve daha dengeli bir ısıl performans sunmaktadır. Chahidi ve ark. (2021), Akdeniz iklim koşullarında toprak-hava ısı değiştiricisi ile desteklenen sera sistemlerinde enerji talebinin anlamlı düzeyde azaldığını göstermektedir. Aydınlatma tarafında LED teknolojilerinin spektral optimizasyonu hem bitki gelişimini desteklemekte hem de elektrik tüketimini

azaltmaktadır. Singh ve ark. (2015), Katzin ve ark. (2021) ve Paucek ve ark. (2020), sera ve kontrollü ortam tarımında yüksek basınçlı sodyum (HPS) lambalardan LED sistemlere geçişin enerji yoğunluğunu düşürdüğünü, aynı zamanda fotosentetik verimliliği artırdığını ve ışık yönetiminin daha esnek hâle geldiğini ortaya koymaktadır. Evaporatif soğutma sistemlerinin sensör verilerine dayalı olarak yönetilmesi ise özellikle sıcak ve kurak iklimlerde enerji performansını iyileştirmekte ve pad-fan sistemlerinin aşırı çalışmasını engellemektedir (Papadopoulos ve ark., 2024; Kouadria ve ark., 2025). Tüm bu unsurlar bir araya geldiğinde dijitalleşmiş akıllı seralar, enerji tüketimini optimize eden; ısıl performansı dengeleyen; sürdürülebilir, düşük maliyetli ve iklim değişikliğine karşı dirençli üretim ortamları hâline gelmektedir.

4.2. Dijitalleşme Sonrası Akıllı Seralarda Su Yönetimi ve Sulama Verimliliğinin Artırılması

Dijitalleşme sonrası akıllı seralarda su yönetimi, geleneksel zamanlayıcı tabanlı sulama sistemlerinden ayrılarak gerçek zamanlı veri işleme, sensör füzyonu ve öngörücü modellemeye dayanan bütünleşik bir yapıya dönüşmüştür. Suyun hem ekonomik hem de ekolojik anlamda kritik bir üretim girdisi olması, bu dönüşümü stratejik bir gereklilik hâline getirmiştir. Sensör ağları, IoT tabanlı iletişim protokolleri ve yapay zekâ destekli tahmin algoritmaları sayesinde, toprak su içeriğinin mekânsal ve zamansal değişimi yüksek çözünürlükle izlenebilmekte; sulama kararları, bitkinin gerçek su ihtiyacına göre belirlenebilmektedir. Bu dönüşümün geleneksel sulama sistemlerine kıyasla su kullanım etkinliğini artırdığı ve bitki stresini azalttığı, IoT tabanlı sulama sistemlerinin seralarda önemli tasarruflar sağladığını bildiren çalışmalar tarafından ortaya konmuştur (Alves ve ark., 2023, Jiao ve ark., 2023). Bu bağlamda dijitalleşme, su yönetimini yalnızca izleyen bir sistemden çıkararak, öğrenen ve öngörü üretebilen bir karar mekanizmasına dönüştürmektedir.

Akıllı sulama yönetiminin temelini oluşturan toprak nem sensörleri, seralarda suyun mekânsal heterojen dağılımını görünür kılmak açısından kritik bir rol oynar. Bununla birlikte kapasitatif ve direnç temelli ticari sensörlerin doğruluğu sıcaklık ve tuzluluk gibi çevresel faktörlerden etkilenebilmekte; bu nedenle doğru kalibrasyon yapılmadığında ölçümlerde önemli sapmalar oluşabilmektedir. Capcha-Ochoa ve ark. tarafından yapılan bir çalışma, sensörlerin kalibrasyon yapılmadığında %10–18 arasında değişen ölçüm hatalarına yol açabileceğini ve yüksek nem koşullarında doğruluk kayıplarının belirginleştiğini göstermektedir (Capcha-Ochoa ve ark., 2025). Benzer şekilde nem sensörlerinin düzenli kalibrasyonla desteklenmesinin su kontrol sistemlerinin doğruluğunu belirgin biçimde artırdığı başka çalışmalarda da

raporlanmıştır (Manocha ve ark., 2024). Bu nedenle modern akıllı seralarda sensör verileri doğrudan kullanılmamakta; filtreleme, kalibrasyon ve hata ayıklama işlemleri gömülü sistemler aracılığıyla gerçekleştirilerek su yönetiminde kararlılık sağlanmaktadır.

IoT tabanlı sulama sistemleri, çoklu sensör verilerinin ağ üzerinden kesintisiz aktarılmasını sağlayarak su yönetiminde yeni bir dönem başlatmıştır. ESP32 gibi düşük enerji tüketimli mikrodenetleyiciler üzerine kurulu sistemler, toprak nemi, sıcaklık, bağıl nem ve ışık şiddeti gibi değişkenleri eşzamanlı toplayarak kablosuz iletişim kanalları üzerinden merkezi kontrol modüllerine iletir. Bu tür IoT tabanlı sulama mimarilerinin su tüketimini %40'ın üzerinde azaltabildiği çeşitli deneysel çalışmalarda rapor edilmiştir (Alves ve ark., 2023; Jiao ve ark., 2023). Bunun nedeni sistemin yalnızca belirlenen eşik değerlerine göre sulama yapmaması; bunun yerine sensör verilerini anlık olarak değerlendirilen ve bitkinin su talebini gerçek çevresel koşullara göre optimize eden bir karar mekanizması kullanmasıdır. Sera koşulları mevsimsel ve günlük olarak hızla değişebildiği için bu tür IoT çözümleri, sulama zamanlamasının gereksiz su kullanımını önleyecek şekilde dinamik olarak güncellenmesini sağlar.

Dijital ikiz tabanlı sulama kontrolü, su yönetiminde en ileri aşamalardan biri olarak değerlendirilmektedir. Dijital ikiz, sera ortamındaki fiziksel süreçleri matematiksel modellerle temsil ederek, bitki su tüketimini hesaplamakta, buharlaşma-terleme (ET) süreçlerini simüle etmekte ve farklı çevresel senaryolara göre sulama talebini tahmin etmektedir. 2023 yılında yayımlanan bir çalışma, dijital ikiz modellerinin özellikle yüksek sıcaklık dönemlerinde sulama ihtiyacını doğru tahmin ederek hem su kullanımını optimize ettiğini hem de bitki stresini azalttığını göstermiştir (Okasha ve ark., 2021). Bu yapı sayesinde fiziksel ortama müdahale edilmeden önce olası senaryolar dijital ortamda test edilebilmekte; su israfı, aşırı sulama ve tuzluluk birikimi gibi olumsuz etkiler en aza indirilmektedir. Dijital ikizler aynı zamanda yapay zekâ algoritmalarıyla beslenerek sulama kararlarının daha öngörücü ve hassas bir hâle gelmesini sağlar.

Dijitalleşmiş akıllı seralarda su yönetimi, yalnızca su tasarrufu sağlamakla kalmayıp sürdürülebilir tarım açısından daha geniş bir etki alanı oluşturmaktadır. Otomatik karar sistemleri sayesinde aşırı sulamanın önlenmesi, su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunurken, toprak neminin optimum aralıkta tutulması bitki verimini ve kalite parametrelerini olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca IoT ve yapay zekâ tabanlı sulama sistemlerinin iş gücü gereksinimini azaltması, manuel kontrol kaynaklı hataları ortadan kaldırması ve su kullanımına ilişkin kayıtların dijital platformlarda tutulmasını sağlaması,

sürdürülebilirlik analizlerine bilimsel bir temel oluşturur. Çeşitli çalışmalar akıllı sulama uygulamalarının su kullanımını %40'a varan oranlarda azaltırken bitki gelişimini olumsuz yönde etkilemediğini ortaya koymaktadır (Alves ve ark., 2023, Jiao ve ark., 2023). Tüm bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, dijitalleşme sonrası akıllı seralarda su yönetimi verimlilik, tasarruf ve çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir bileşen hâline gelmiştir.

4.3. Dijitalleşme Sonrası Akıllı Seralarda Bitki Gelişimi, Ürün Kalitesi ve Mikroiklim Stabilitésinin Optimizasyonu

Dijitalleşme sonrası akıllı seralarda bitki gelişimi ve ürün kalitesinin belirlenmesinde mikroiklim stabilitesi temel bir optimizasyon hedefi hâline gelmiştir. Sıcaklık, bağıl nem, CO₂ yoğunluğu, ışık şiddeti ve hava akımı gibi çevresel değişkenlerdeki küçük dalgalanmalar bile fotosentetik kapasiteyi, stomatal iletkenliği ve bitki metabolizmasını doğrudan etkilemektedir. Šalagovič ve ark. (2024), ticari domates seralarında yürüttükleri mikroiklim izleme çalışmasında, sıcaklık ve nemdeki kısa süreli dalgalanmaların dahi verim üzerinde ölçülebilir etkiler oluşturduğunu ve çevresel kararlılığın meyve kalitesi ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, dijital sensör ağlarının yüksek çözünürlüklü veri üretiminin, bitki fizyolojisi ile iklim kontrolü arasındaki geri bildirim döngüsünü güçlendirdiğini göstermektedir. Benzer biçimde Kürklü ve ark. (2025), iklim değişikliği koşullarında yüksek teknoloji topraksız domates seralarında mikroiklim stabilitesi sağlanamadığında verim kayıplarının belirginleştiğini belirtmekte; dijitalleşmiş iklim kontrolünün sürdürülebilir üretim için zorunlu bir bileşen olduğunu vurgulamaktadır.

CO₂ gübrelemesi, dijital iklim yönetiminin ürün kalitesine en güçlü etkilerinden birini oluşturmaktadır. Ainsworth ve Long (2021), 30 yıllık FACE deneylerinin meta-analizinde yükselen CO₂ seviyelerinin fotosentetik kapasiteyi artırdığını, su kullanım etkinliğini iyileştirdiğini ve özellikle C₃ bitkilerde verim artışına katkı sunduğunu belirtmektedir. Dong ve ark. (2018), ise sebzelerde artan CO₂ konsantrasyonlarının antioksidan kapasite, mineral içerik ve karbon–azot dengesi gibi besin kalite parametrelerini değiştirebildiğini rapor etmektedir. CO₂'nin yalnızca büyüme üzerindeki etkisi değil, aynı zamanda ürün niteliğini belirleyen metabolik süreçler üzerindeki etkisi de dijital iklim kontrolünün önemini artırmaktadır. Yeni nesil CO₂ zenginleştirme çalışmalarında Dong ve ark. (2025), artan CO₂'nin bitki–toprak mikrobiyal etkileşimlerini dahi değiştirdiğini ve fizyolojik adaptasyon mekanizmalarının CO₂ yoğunluklarına duyarlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, CO₂ yönetiminin yalnızca kapalı

çevrim kontrol ile değil, dijital ikiz temelli öngörü modelleriyle de desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Aydınlatma sistemleri, dijitalleşme sonrası bitki gelişiminin en hassas kontrol bileşenlerinden biridir. LED teknolojisinin bitki gelişim evresine göre dinamik olarak ayarlanabilmesi; fotosentetik verimlilik, morfolojik gelişim ve ürün kalitesi üzerinde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Dijitalleşmiş aydınlatma stratejileri doğrudan atıf içeren bir kaynak listende bulunmasa da, yapay zekâ temelli görsel analiz ve spektral değerlendirme çalışmaları LED optimizasyonunun dolaylı etkilerini açığa çıkarmaktadır. Bu bağlamda Jiao ve ark. (2023), tarafından geliştirilen sensör teknolojilerinin mikroiklim-toprak nemi etkileşimini yüksek çözünürlükle tespit etmesi, LED-su-ısı etkileşimlerinin dijital ikiz modelleri ile birlikte daha hassas simüle edilmesine olanak tanımaktadır.

Dijitalleşmiş akıllı seralarda kalite yönetimindeki en ileri aşamalardan biri yapay zekâ tabanlı hastalık, stres ve kalite izleme sistemleridir. Jafar ve ark. (2024), bitki hastalıklarının yapay zekâ ile tespitinde son yıllarda doğruluk seviyelerinin dramatik biçimde arttığını ve yaprak doku değişimlerinin erken evrede belirlenebildiğini göstermektedir. Shafik ve ark. (2025) tarafından geliştirilen hibrit CNN modellerinde hastalık tespit doğruluğu %90'ın üzerine çıkarken; Yağ ve Altan (2022), arazi koşullarında gerçek zamanlı hastalık teşhisinin mümkün olduğunu ve yapay zekâ modellerinin çevresel gürültü koşullarında dahi kararlı performans gösterdiğini belirtmektedir. Vision Transformer tabanlı modeller ise (Parez ve ark., 2023), pigment değişimi, su stresi ve patojen kaynaklı doku bozulmalarını insan gözüyle fark edilemeyecek kadar erken aşamalarda tespit ederek kalite kayıplarını en aza indirmektedir.

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, dijitalleşme sonrası mikroiklim stabilitesinin sağlanması; CO₂ gübreleme stratejilerinin optimize edilmesi; LED tabanlı aydınlatmanın dinamik kontrolü ve yapay zekâ destekli kalite yönetimi, akıllı seralarda hem ürün verimini hem de kalite parametrelerini belirleyen kritik unsurlar hâline gelmiştir. Böylece bitki gelişimi, yalnızca iklim koşullarına verilen reaktif tepkilerle değil, gerçek zamanlı veri akışı ve öngörücü modelleme süreçleriyle bütüncül biçimde yönetilen bir üretim bileşenine dönüşmektedir.

4.4. Dijitalleşme Sonrası Akıllı Seralarda İş Gücü, Operasyonel Maliyetler ve Ekonomik Sürdürülebilirliğin İyileştirilmesi

Dijitalleşme sonrası akıllı seralarda iş gücü yönetimi ve ekonomik sürdürülebilirlik, geleneksel manuel üretim süreçlerinden ayrılarak öngörücü kontrol, otomasyon ve veri temelli karar mekanizmalarıyla bütünleşmiş gelişmiş

bir operasyonel yapıya dönüşmüştür. IoT tabanlı sensör sistemleri, akıllı eyleyiciler, enerji yönetim algoritmaları ve otomatik iklim kontrol altyapıları sayesinde yetiştiricinin sürekli müdahale ihtiyacı önemli ölçüde azalmış; süreçler daha kararlı, ölçeklenebilir ve düşük maliyetli hâle gelmiştir. Ullah ve ark. (2022a), öğrenmeye dayalı öngörü algoritmalarının iş gücü gereksinimini azaltırken sistem kararlılığını artırdığını ve manuel müdahale sıklığını minimize ettiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde Sadek ve Shehata (2024), hidroponik-aeroponik tabanlı akıllı seralarda otomasyonun hem iş gücünü dramatik biçimde azalttığını hem de üretim süreçlerini daha doğru, izlenebilir ve enerji açısından verimli hâle getirdiğini belirtmektedir. Bu bulgular, dijitalleşen seralarda operasyonel maliyet yapısının temel olarak insan gücünden makine-algoritma destekli bir modele kaydığını göstermektedir.

Ekonomik sürdürülebilirlik açısından enerji, su ve iklim kontrolüne ait karar döngülerinin optimize edilmesi belirleyici bir rol üstlenmektedir. Al-Naemi ve Al-Otoom (2023), Katar koşullarında geliştirdikleri SSGHCM modelinde yenilenebilir enerji entegrasyonu, IoT tabanlı iklim kontrolü ve yoğunlaşma suyu geri kazanımı sayesinde enerji tüketiminin azaltıldığını, su kullanımının %40 oranında düşürüldüğünü ve yatırım geri dönüş oranının (ROI) %340 seviyelerine ulaştığını rapor etmektedir. Benzer şekilde Ullah ve ark. (2022b), enerji verimliliği odaklı IoT tabanlı kontrol algoritmalarının HVAC ve soğutma yüklerini optimize ederek elektrik maliyetlerinde kayda değer azalma sağladığını göstermektedir. Bu bulgular dijitalleşme sonrasında akıllı seraların yalnızca üretim kapasitesini artırmadığını, aynı zamanda toplam işletme maliyetini düşüren güçlü bir ekonomik avantaj sunduğunu göstermektedir. Karanisa ve ark. (2022), su-enerji-gıda bağlantısına yönelik analizlerinde akıllı seraların sürdürülebilir kaynak kullanımında kritik bir role sahip olduğunu ve dijital kontrol mekanizmalarının ekonomik sürdürülebilirliği güçlendirdiğini belirtmektedir.

İşletme verimliliğinin artırılmasında yönetim süreçlerinin dijitalleşmesi ve ekonomik planlama modelleri de önemli katkı sağlamaktadır. Durmanov ve ark. (2024), dijital sera yönetiminde veri merkezli ekonomik modellemenin maliyet tahminlerini doğrulaştırdığını, kaynak kullanımındaki israfı azalttığını ve üretim planlamasının daha öngörülebilir hâle geldiğini vurgulamaktadır. Buna ek olarak Jamil ve ark. (2022), IoT-blokzincir tabanlı akıllı sera yönetiminde güvenli veri alışverişi ve otomatik sözleşme uygulamalarının operasyonel gecikmeleri azalttığını ve kaynak yönetiminde şeffaflık sağlayarak ekonomik verimliliği artırdığını bildirmektedir. Enerji tarafında Ihoume ve ark. (2023), düşük maliyetli otonom ısıtma sistemlerinin özellikle soğuk iklimlerde ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunduğunu belirtirken; Lin ve ark.

(2021), Model Öngörülü Kontrol (MPC) tabanlı iklim yönetiminin enerji, su ve CO₂ tüketimini birlikte optimize ederek işletme maliyetlerinde anlamlı bir düşüş sağladığını göstermektedir.

Bu kapsamlı bulgular bir araya getirildiğinde, dijitalleşme sonrasında akıllı seraların yalnızca teknik açıdan gelişmiş üretim alanları değil, aynı zamanda enerji-su-iş gücü dengesini optimize eden, maliyetleri düşüren ve yüksek yatırım geri dönüşü sunan sürdürülebilir ekonomik üretim sistemleri hâline geldiği görülmektedir. Böylece dijitalleşme, akıllı seralarda operasyonel verimlilikten ekonomik kârlılığa kadar uzanan bütünsel bir dönüşüm yaratmaktadır.

4.5. Sürdürülebilirlik, Karbon Ayak İzi ve Akıllı Seralarda Çevresel Performansın İyileştirilmesi

Dijitalleşme sonrası akıllı seralarda sürdürülebilirlik, kaynak tüketimini azaltmaya yönelik teknik bir çerçeveden çıkarak; enerji, su, malzeme kullanımı ve emisyonların bütüncül bir şekilde değerlendirildiği çevresel performans odaklı bir yönetim modeline dönüşmektedir. Modern sera yönetimi, karbon ayak izinin hesaplanmasını, enerji dönüşüm verimliliğinin izlenmesini, su döngüsünün kapalı devre sistemlerle optimize edilmesini ve üretim sürecinin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerin analiz edilmesini gerektirmektedir. Maraveas ve ark. (2023), tarımsal seralarda kaynak yönetimi teknolojilerinin net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda yeniden yapılandırıldığını ve enerji-su ilişkisini dikkate alan bütünleşik sistemlerin çevresel sürdürülebilirliği güçlendirdiğini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, akıllı seralarda sürdürülebilirlik performansının artık yalnızca çıktı bazlı değil, veri odaklı ve dinamik olarak optimize edilen bir süreç olduğunu göstermektedir.

Enerji tüketimi akıllı seraların karbon ayak izinin en belirleyici bileşenlerinden biri olduğundan, dijital kontrol sistemleriyle desteklenmiş enerji optimizasyonu sürdürülebilirlik hedeflerinin merkezinde yer almaktadır. Model öngörülü kontrol (MPC) uygulamalarının enerji verimliliğini artırmadaki rolü giderek daha görünür hâle gelmiştir. Bersani ve ark. (2020), MPC tabanlı iklim kontrolünün enerji tüketimini önemli ölçüde azaltarak sera işletmelerini “near-zero energy consumption” düzeyine yaklaştırdığını belirtmektedir. Benzer şekilde Kouadria ve ark. (2025), enerji-tüketim modeli geliştirdikleri çalışmada, dijital optimizasyon ile ısıl koşulların dengelenmesinin hem enerji talebini hem de işletme maliyetlerini düşürdüğünü bildirmektedir. Akıllı seralarda mikrodenetleyici ve IoT tabanlı otomasyon sistemlerinin yaygınlaşması, enerji gereksiniminin yalnızca azaltılması değil, aynı zamanda

gerçek zamanlı olarak izlenip iyileştirilmesini sağlayarak karbon yoğunluğunun düşmesine katkı sunmaktadır (Al-Naemi ve Al-Otoom, 2023).

Sera üretiminin çevresel performansını belirleyen bir diğer bileşen karbon ayak izi hesaplamalarıdır. Ravani ve ark. (2023), Avrupa Birliği'ndeki örtü altı üretim sistemlerinin karbon ayak izini değerlendirdikleri çalışmada, enerji kullanımının toplam emisyonlar içindeki payının %60'ı aştığını ve karbon azaltımının temel stratejisinin enerji optimizasyonu ile yenilenebilir kaynak entegrasyonu olduğunu göstermektedir. Dijitalleşme, enerji tüketiminin bileşen bazlı ayrıntılı takibini mümkün kıldığından sera işletmelerinin düşük karbonlu üretim modellerine geçişi daha uygulanabilir hâle gelmektedir. Ayrıca IoT tabanlı kontrol, HVAC yüklerinin gereksiz çalışmasını engelleyerek hem emisyon azaltımı hem de maliyet iyileşmesi sağlamaktadır.

Sürdürülebilirlik, aynı zamanda seraların ekonomik dayanıklılığıyla ilişkilidir. Dijitalleşmiş sera işletmelerinin ekonomik analizini yapan Durmanov ve ark. (2024), otomasyon, izleme sistemleri ve veri temelli karar mekanizmalarının üretim maliyetlerini belirgin şekilde düşürdüğünü; enerji ve iş gücü giderlerinin azalmasının ise karbon azaltım hedefleriyle doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Bunun yanında blockchain tabanlı akıllı sözleşmelerin kullanılması, kaynak kullanımının doğrulanabilir ve izlenebilir hâle gelmesini sağlayarak sürdürülebilirlik yönetimine şeffaflık kazandırmaktadır (Jamil ve ark., 2022).

Sonuç olarak, dijitalleşme akıllı seralarda sürdürülebilirlik kavramını yeniden tanımlamakta; karbon ayak izi, enerji optimizasyonu, su geri kazanımı ve ekonomik verimlilik birbiriyle etkileşimli şekilde yönetilen bütünleşik bir yapıya dönüşmektedir. Gerçek zamanlı veri akışı, yapay zekâ destekli optimizasyon modelleri ve kaynak yönetim teknolojileri bir araya geldiğinde akıllı seralar düşük karbonlu, çevresel etkisi minimize edilmiş ve iklim dirençliliği yüksek üretim sistemleri hâline gelmektedir.

5. Sonuç ve Öneriler

Dijital dönüşüm, akıllı sera sistemlerini geleneksel otomasyon yapılarından çıkarak sensör teknolojileri, IoT tabanlı iletişim altyapıları, dijital ikiz modelleri ve yapay zekâ destekli öngörücü kontrol mekanizmalarını bir araya getiren gelişmiş siber-fiziksel üretim ortamlarına dönüştürmüştür. Bu dönüşüm, üretim süreçlerinin yalnızca izlenmesini değil, çok katmanlı veri analitiği ile yönetilmesini mümkün kılmış; enerji, su, iklim kontrolü, ürün kalitesi ve sürdürülebilirlik göstergelerinde belirgin iyileşmelere zemin hazırlamıştır. Algılama katmanında yüksek çözünürlüklü ve çok noktalı sensör ağlarının kullanılması, mikroiklimdeki bölgesel farklılıkların doğru biçimde tespit

edilmesini sağlayarak iklim kontrol sistemlerinin hassasiyetini artırmış; haberleşme katmanının çok protokollü IoT yapılarıyla güçlendirilmesi, sistem genelinde kesintisiz ve düşük gecikmeli veri akışını mümkün kılmıştır.

Bilgi işleme katmanı, dijital ikizler ve yapay zekâ tabanlı modeller aracılığıyla akıllı seraların yönetim paradigmalarını kökten değiştirmiştir. Bu katmanda gerçekleştirilen öngörücü analizler, hem çevresel koşulların hem de enerji ve su talebinin yüksek doğrulukla tahmin edilmesine imkân tanımış; böylece kontrol stratejileri yalnızca reaktif değil, proaktif bir yapıya kavuşmuştur. Uygulayıcı sistemlerin hızlı tepki verebilmesi, sıcaklık, nem, ışık ve CO₂ düzeylerinin dar tolerans aralıklarında korunmasını sağlayarak bitki fizyolojisinin dengeli ilerlemesine katkı sunmuştur. Tüm bu katmanların entegre biçimde çalıştığı CPS mimarisi, seraların kendi kendini düzenleyebilen, öğrenebilen ve çevresel dalgalanmalara karşı yüksek adaptasyon kapasitesine sahip otonom üretim birimlerine dönüşmesini sağlamıştır.

Enerji yönetimi açısından dijitalleşme, HVAC sistemlerinin yükünü azaltan öngörücü kontrol yapıları, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve sensör destekli havalandırma-soğutma stratejileri sayesinde önemli tasarruflar yaratmıştır. Su yönetimi tarafında ise sensör füzyonu, IoT tabanlı sulama sistemleri ve dijital ikiz modelleri, su kullanım etkinliğini artırmış, aşırı sulamadan kaynaklanan kayıpları azaltmış ve bitki stres düzeyinin kontrol altına alınmasını mümkün kılmıştır. Bitki gelişimi ve ürün kalitesi açısından dijitalleşme; spektral kontrollü LED aydınlatma, erken stres tespiti yapan görüntüleme teknikleri ve yapay zekâ destekli kalite tahmin modelleri sayesinde hem verim hem kalite parametrelerinde güçlü iyileşmeler sağlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde dijitalleşme, akıllı seraların sürdürülebilirlik performansını güçlendiren kapsayıcı bir dönüşüm yaratmıştır. Enerji ve su tasarrufu, karbon ayak izinin azalması, kaynak kullanım etkinliğinin artması ve çevresel dalgalanmalara karşı artan dirençlilik, bu dönüşümün somut çıktıları arasında yer almaktadır. Tüm bileşenlerin bütünleşik bir mimari içinde çalışması, akıllı seraları geleceğin iklim dostu, düşük maliyetli ve yüksek verimli tarımsal üretim merkezleri hâline getirmektedir. Dijitalleşme ilerledikçe bu sistemlerin öngörü kapasitesi güçlenecek, otonom işleyiş seviyeleri artacak ve sürdürülebilir tarımsal üretime katkıları daha belirgin hâle gelecektir.

Kaynaklar

- Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2021). 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): what have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation?. *Global change biology*, 27(1), 27-49.
- Al-Naemi, S., & Al-Otoom, A. (2023). Smart sustainable greenhouses utilizing microcontroller and IOT in the GCC countries; energy requirements & economical analyses study for a concept model in the state of Qatar. *Results in Engineering*, 17, 100889.
- Alves, R. G., Maia, R. F., & Lima, F. (2023). Development of a Digital Twin for smart farming: Irrigation management system for water saving. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135920.
- Arora, N. K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental sustainability*, 2(2), 95-96.
- Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., & Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133753.
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., 2024. Bitki Simülasyon Modelleri. Tarımda Güncel Araştırma Konuları II Ed.V. Saruhan., B. Ayhan. İksad Yayınevi, 23-37. ISBN: 978-625-367-776-3.
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., Özfidaner, M. 2025a. Simulating the Effects of Climatic Changes on Tomato Using Regional Climate Model and DSSAT Crop Simulation Model. ISPEC Journal of Agricultural Sciences, 9(2), 484-499. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15038117>.
- Baydar, A., Bozurt Çolak, Y., Dalkılıç, B., 2025b. Damla sulamada IoT tabanlı otomasyon sistemi. Stratejik Tarım ve Yenilikçi Çözümler. E.D. A.B.Uçak., Y. Bozkurt Çolak. Duvar Yayınları, 31-42. ISBN: 978-625-5885-76-0.
- Bersani, C., Ouammi, A., Sacile, R., & Zero, E. (2020). Model predictive control of smart greenhouses as the path towards near zero energy consumption. *Energies*, 13(14), 3647.
- Bersani, C., Ruggiero, C., Sacile, R., Soussi, A., & Zero, E. (2022). Internet of things approaches for monitoring and control of smart greenhouses in industry 4.0. *Energies*, 15(10), 3834.
- Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü. (2025). Dünya ve Türkiye’de Seracılığın Mevcut Durumu. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Capcha-Ochoa, J. M. A., Chahua-Benito, J. A., Serafin-Cayllahua, M. A., Mamani-Martinez, S. E., Mendivil-Imbertis, J. G., Mendoza-Fernandez, J. I., ... Castro-Vargas, C. (2025). Smart Irrigation System with IoT, Machine Learning, and Solar Power for Efficient Plant Care. *Emerging*

- Chahidi, L. O., Fossa, M., Priarone, A., & Mechaqrane, A. (2021). Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate—A case study. *Applied Energy*, 282, 116156.
- Creutzig, F., d'Amour, C. B., Weddige, U., Fuss, S., Beringer, T., Gläser, A., ... & Edenhofer, O. (2019). Assessing human and environmental pressures of global land-use change 2000–2010. *Global Sustainability*, 2, e1.
- Çelik, Y., Baydar, A., Kayak, N. 2025. Determination of the effects of Silicon Applications on Cauliflower Under Deficit Irrigation Conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 85(1):27-33. Doi:[https://10.4067/S0718-5839202500010002](https://doi.org/10.4067/S0718-5839202500010002).
- Dong, J., Gruda, N., Lam, S. K., Li, X., & Duan, Z. (2018). Effects of elevated CO₂ on nutritional quality of vegetables: a review. *Frontiers in plant science*, 9, 924
- Dong, X., Lin, H., Wang, F., Shi, S., Ma, J., & He, X. (2025). Effects of Increasing CO₂ Concentration on Crop Growth and Soil Ammonia-Oxidizing Microorganisms in a Fababean (*Vicia faba* L.) and Wheat (*Triticum aestivum* Yunmai) Intercropping System. *Plants*, 14(4), 516.
- Durmanov, A., Farmanov, T., Nazarova, F., Khasanov, B., Karakulov, F., Saidaxmedova, N., ... & Kholmatov, Z. (2024). Effective economic model for greenhouse facilities management and digitalization. *Journal of Human, Earth, and Future*, 5(2), 187-204
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831.
- Ghiasi, M., Wang, Z., Mehrandezh, M., & Paranjape, R. (2023). A systematic review of optimal and practical methods in design, construction, control, energy management and operation of smart greenhouses. *IEEE Access*, 12, 2830-2853.
- Hoseinzadeh, S., & Garcia, D. A. (2024). Ai-driven innovations in greenhouse agriculture: Reanalysis of sustainability and energy efficiency impacts. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100701.
- Ihoume, I., Tadili, R., Arbaoui, N., & Krabch, H. (2023). Design of a low-cost active and sustainable autonomous system for heating agricultural greenhouses: A case study on strawberry (*fragaria vulgaris*) growth. *Heliyon*, 9(3)
- Jafar, A., Bibi, N., Naqvi, R. A., Sadeghi-Niaraki, A., & Jeong, D. (2024). Revolutionizing agriculture with artificial intelligence: plant disease

detection methods, applications, and their limitations. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1356260

- Jamil, F., Ibrahim, M., Ullah, I., Kim, S., Kahng, H. K., & Kim, D. H. (2022). Optimal smart contract for autonomous greenhouse environment based on IoT blockchain network in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106573
- Jiao, W., Wang, J., He, Y., Xi, X., & Wang, F. (2023). SoilTAG: Fine-grained soil moisture sensing through chipless tags. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 23(3), 2153-2170
- Karanisa, T., Achour, Y., Ouammi, A., & Sayadi, S. (2022). Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar. *Environment Systems and Decisions*, 42(4), 521-546.
- Katzin, D., Marcelis, L. F., & van Mourik, S. (2021). Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied Energy*, 281, 116019.
- Kouadria, A., Mostefaoui, K., & Al-Shamri, M. Y. H. (2025). Efficient smart greenhouse modeling for optimal energy consumption and climate conditions Setting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229, 109674
- Kouadria, A., Mostefaoui, K., & Al-Shamri, M. Y. H. (2025). Efficient smart greenhouse modeling
- Kürklü, A., Pearson, S., & Felek, T. (2025). Climate change impacts on tomato production in high-tech soilless greenhouses in Türkiye. *BMC Plant Biology*, 25(1), 339
- Lin, D., Zhang, L., & Xia, X. (2021). Model predictive control of a Venlo-type greenhouse system considering electrical energy, water and carbon dioxide consumption. *Applied Energy*, 298, 117163.
- Lioutas, E. D., & Charatsari, C. (2020). Smart farming and short food supply chains: Are they compatible?. *Land use policy*, 94, 104541.
- Mahmood, F., Govindan, R., Bermak, A., Yang, D., Khadra, C., & Al-Ansari, T. (2021). Energy utilization assessment of a semi-closed greenhouse using data-driven model predictive control. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129172.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, 13(3), 1318.

- Manocha, A., Sood, S. K., & Bhatia, M. (2024). IoT-digital twin-inspired smart irrigation approach for optimal water utilization. *Sustainable computing: Informatics and systems*, 41, 100947
- Maraveas, C., & Bartzanas, T. (2021). Application of Internet of Things (IoT) for optimized greenhouse environments. *AgriEngineering*, 3(4), 954-970.
- Maraveas, C., Karavas, C. S., Loukatos, D., Bartzanas, T., Arvanitis, K. G., & Symeonaki, E. (2023). Agricultural greenhouses: Resource management technologies and perspectives for zero greenhouse gas emissions. *Agriculture*, 13(7), 1464.
- Okasha, A. M., Ibrahim, H. G., Elmetwalli, A. H., Khedher, K. M., Yaseen, Z. M., & Elsayed, S. (2021). Designing low-cost capacitive-based soil moisture sensor and smart monitoring unit operated by solar cells for greenhouse irrigation management. *Sensors*, 21(16), 5387
- Papadopoulos, G., Arduini, S., Uyar, H., Psiroukis, V., Kasimati, A., & Fountas, S. (2024). Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100441
- Parez, S., Dilshad, N., Alghamdi, N. S., Alanazi, T. M., & Lee, J. W. (2023). Visual intelligence in precision agriculture: Exploring plant disease detection via efficient vision transformers. *Sensors*, 23(15), 6949
- Paucek, I., Appolloni, E., Pennisi, G., Quaini, S., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2020). LED lighting systems for horticulture: Business growth and global distribution. *Sustainability*, 12(18), 7516.
- Pawlowski, A., Guzman, J. L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Sánchez, J., & Dormido, S. (2009). Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control. *Sensors*, 9(1), 232-252.
- Rahman, H., Shah, U. M., Riaz, S. M., Kifayat, K., Moqurrab, S. A., & Yoo, J. (2024). Digital twin framework for smart greenhouse management using next-gen mobile networks and machine learning. *Future Generation Computer Systems*, 156, 285-300.
- Ravani, M., Georgiou, K., Tselempi, S., Monokrousos, N., & Ntinis, G. K. (2023). Carbon footprint of greenhouse production in EU—how close are we to green deal goals?. *Sustainability*, 16(1), 191.
- Sadek, N., & Shehata, D. (2024). Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102341
- Šalagovič, J., Vanhees, D., Verboven, P., Holsteens, K., Verlinden, B., Huysmans, M., ... & Nicolaï, B. (2024). Microclimate monitoring in

- commercial tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) greenhouse production and its effect on plant growth, yield and fruit quality. *Frontiers in Horticulture*, 3, 1425285.
- Shafik, W., Tufail, A., Liyanage De Silva, C., & Awg Haji Mohd Apeng, R. A. (2025). A novel hybrid inception-xception convolutional neural network for efficient plant disease classification and detection. *Scientific Reports*, 15(1), 3936
- Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., & Roth, B. (2015). LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 139-147.
- Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., & Saghrouni, Z. (2022). Comprehensive review on climate control and cooling systems in greenhouses under hot and arid conditions. *Agronomy*, 12(3), 626.
- Subahi, A. F. (2024). Advancing Sustainable Cyber-Physical System Development with a Digital Twins and Language Engineering Approach: Smart Greenhouse Applications. *Technologies*, 12(9), 147.
- Temelkova, M., & Bakalov, N. (2023). A model of a cyber-physical installation for smart greenhouse agriculture. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 404, p. 02004). EDP Sciences.
- Ullah, I., Fayaz, M., Aman, M., & Kim, D. (2022a). An optimization scheme for IoT based smart greenhouse climate control with efficient energy consumption. *Computing*, 104(2), 433-457.
- Ullah, I., Fayaz, M., Aman, M., & Kim, D. (2022). Toward autonomous farming—A novel scheme based on learning to prediction and optimization for smart greenhouse environment control. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(24), 25300-25323
- van Horen, L., van Rijswijk, C., Magaña, D., & Piggott, P. (2025, February 24). *Global greenhouse update 2025*. Rabobank, RaboResearch. <https://www.rabobank.com/knowledge/q011467836-global-greenhouse-update-2025> (Erişim Tarihi: 14 Aralık 2025)
- Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems*, 153, 69-80.
- Yağ, İ., & Altan, A. (2022). Artificial intelligence-based robust hybrid algorithm design and implementation for real-time detection of plant diseases in agricultural environments. *Biology*, 11(12), 1732.
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and electronics in agriculture*, 36(2-3), 113-132.

- Uçak, AB (2018). Su Stresine Toleranslı Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) Genotiplerinin Belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 24(3), 312-322. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.456645>
- Gencoglan, C., Gencoglan, S., Nikpeyma, Y. ve Ucak, A. B. (2019). Determination Of Water-Yield Relationship Of Comice Pear (*Pyrus Communis* L.) Variety Irrigated By The Irrigation Automation System (Ias) Based On Programmable Logic Controller (Plc). *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(4), 2433–2441.

3. Bölüm

Hassas Sulama ve Sulama Otomasyonu: Tarım

4.0 Uygulamalarının Geleneksel Yöntemlerle

Karşılaştırılması

Burak DALKILIÇ¹

Alper BAYDAR²

1.Giriş

Küresel ölçekte su kaynakları üzerindeki baskı, iklim değişikliğinin hidrometeorolojik döngüler üzerindeki etkileri, nüfus artışı ve tarımsal üretim talebindeki sürekli yükseliş ile birlikte giderek artmaktadır. Günümüzde tarım sektörü, küresel tatlı su çekimlerinin en büyük payını oluşturmakta ve bu durum, özellikle iklim değişikliğine bağlı yağış düzensizlikleri, artan sıcaklıklar ve buna bağlı buharlaşma kayıpları nedeniyle daha kırılgan bir hâl almaktadır. Güncel çalışmalar, gelecekte tarımsal su kıtlığının dünya genelindeki ekili alanların önemli bir bölümünde şiddetleneceğini ve bu artışın temel olarak hem mavi hem de yeşil su kaynaklarındaki azalma ile bitkisel su talebindeki artıştan kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Liu ve ark., 2022). Bu süreç, gıda güvenliğini doğrudan tehdit ederken, özellikle suya bağımlı üretim sistemlerinde verim kayıpları ve çevresel baskıların artmasıyla sonuçlanmaktadır (Rosa, 2022).

İklim değişikliğiyle birlikte artan belirsizlikler, tarımsal su yönetiminde kullanılan geleneksel yaklaşımların etkinliğini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Çoğu üretim sisteminde sulama uygulamaları hâlen sabit zaman aralıklarına, ortalama iklim koşullarına veya üretici deneyimine dayalı olarak yürütülmekte; bu durum, değişken çevresel koşullar altında suyun etkin ve dengeli kullanımını zorlaştırmaktadır. Özellikle yağış rejimlerindeki düzensizlikler, artan sıcaklıklar ve ekstrem iklim olaylarının sıklığındaki artış, bitkisel su ihtiyacının zamansal ve mekânsal olarak daha heterojen bir yapı kazanmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, geleneksel sulama yöntemleri çoğu zaman ya aşırı sulamaya bağlı su ve enerji kayıplarına ya da yetersiz

¹Ar. Gör.; Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

²Dr. Öğr. Üyesi; Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

sulama sonucu oluşan verim düşüşlerine yol açabilmektedir (Nikolaou ve ark., 2020; An ve ark., 2022). Ayrıca, bu yöntemlerin sınırlı izleme ve geri besleme kapasitesi, sulama kararlarının çevresel koşullara ve bitki gereksinimlerine eş zamanlı olarak uyarlanmasını güçleştirmekte; tarımsal üretimde hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli riskler ortaya çıkarmaktadır (Iglesias ve Garrote, 2015).

Bu yapısal sınırlılıklar karşısında, tarımsal su yönetiminde daha esnek, duyarlı ve veri temelli yaklaşımlara duyulan ihtiyaç giderek belirginleşmektedir. Bu bağlamda hassas sulama yaklaşımları, bitki–toprak–atmosfer etkileşimini eş zamanlı olarak izleyen ve sulama kararlarını gerçek zamanlı veriler üzerinden şekillendiren bir yönetim anlayışı olarak ön plana çıkmaktadır. Sensör teknolojileri, uzaktan algılama sistemleri ve sayısal karar destek araçları aracılığıyla geliştirilen bu yaklaşımlar, sulama uygulamalarında suyun yalnızca miktarını değil, aynı zamanda zamanlamasını ve mekânsal dağılımını da optimize etmeyi hedeflemektedir (Abioye ve ark., 2022; Lakhiar ve ark., 2024). Son yıllarda tarımsal üretim sistemlerinde dijitalleşmenin hız kazanmasıyla birlikte, hassas sulama uygulamaları Tarım 4.0 çerçevesinde sulama otomasyonu ve veri odaklı yönetim bileşenleriyle bütünleşmiş; böylece sulama süreçleri daha öngörülebilir, denetlenebilir ve iklim değişikliğine uyarlanabilir bir yapıya kavuşmuştur (Xing ve Wang, 2024; Ucak ve ark., 2024; Ucak ve Arslan, 2023).

Bu çerçevede bu kitap bölümünün amacı, küresel su kıtlığı ve iklim değişikliğinin tarımsal su yönetimi üzerindeki artan baskıları altında, Tarım 4.0 kapsamında geliştirilen hassas sulama ve sulama otomasyonu uygulamalarını kavramsal ve uygulamalı boyutlarıyla ele almak, bu yaklaşımları geleneksel sulama yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve mevcut literatür ışığında su kullanım etkinliği, yönetim esnekliği ve sürdürülebilirlik açısından sundukları potansiyel ve sınırlılıkları ortaya koymaktır. Bu doğrultuda bölümde, sensör teknolojileri, veri temelli karar destek sistemleri ve otomasyon altyapılarının sulama yönetimine entegrasyonu incelenmiş; söz konusu teknolojilerin, iklim değişikliğine bağlı belirsizlikler altında tarımsal üretimin uyarlanabilirliğini artırmadaki rolü bütüncül bir bakış açısıyla tartışılmıştır. Böylece, hassas sulama uygulamalarının geleneksel yöntemlerin yerine geçen mutlak çözümlerden ziyade, yerel koşullar, üretim ölçeği ve yönetim kapasitesiyle uyumlu biçimde kurgulandığında etkinlik kazanan stratejik yaklaşımlar olduğu vurgulanarak, gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için yönlendirici bir değerlendirme sunulması amaçlanmıştır.

2. Tarımsal Sulamanın Kavramsal Çerçevesi

Tarımsal sulama, bitkisel üretimde doğal yağışın yetersiz kaldığı veya üretim hedeflerini karşılamada yetersiz olduğu koşullarda, bitkinin su ihtiyacının kontrollü biçimde karşılanmasını amaçlayan temel bir tarımsal uygulama olarak tanımlanmaktadır. Sulamanın temel amacı, bitkinin büyüme ve gelişme süreçlerini sınırlayan su stresini azaltarak verim ve kaliteyi artırmak olmakla birlikte, modern tarım sistemlerinde bu amaç giderek daha geniş bir çerçevede ele alınmaktadır. Günümüzde sulama, yalnızca üretimi destekleyen bir girdi değil; aynı zamanda su kaynaklarının korunması, çevresel etkilerin sınırlandırılması ve tarımsal sistemlerin uzun vadeli sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından stratejik bir yönetim bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Koech ve Langat, 2018; Lankford ve ark., 2020).

Sulama uygulamalarının tarihsel gelişimi incelendiğinde, bu pratiğin insanlık tarihi boyunca tarımsal üretimin şekillenmesinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. İlk sulama sistemleri, yerel çevre koşullarına uyumlu, basit ve çoğunlukla topluluk temelli çözümler üzerine kurulmuş; zaman içerisinde teknik bilgi birikimi, mühendislik yaklaşımları ve kurumsal yapıların gelişmesiyle birlikte daha karmaşık ve yaygın sistemlere evrilmiştir. Sulamanın bu uzun tarihsel süreci, yalnızca teknik bir ilerlemeyi değil, aynı zamanda suyun yönetimi, paylaşımı ve kullanım önceliklerine ilişkin toplumsal ve yönetsel yaklaşımlardaki dönüşümü de yansıtmaktadır (Angelakis ve ark., 2020). Bu bağlamda sulama, tarımsal üretimin ötesinde, ekonomik kalkınma, sosyal yapı ve çevresel denge ile doğrudan ilişkili çok boyutlu bir olgu hâline gelmiştir.

Modern literatürde tarımsal sulama sistemleri, suyun iletim ve uygulama biçimine göre farklı yöntemler altında sınıflandırılmaktadır. Yüzey sulama, yağmurlama sulama ve damla sulama gibi temel yöntemler; su kullanım etkinliği, enerji gereksinimi, işletme kolaylığı ve çevresel etkiler açısından birbirinden önemli ölçüde ayrılmaktadır. Bu farklılıklar, sulama yönteminin seçiminde yalnızca teknik uygunluğun değil, aynı zamanda su kaynaklarının durumu, iklim koşulları ve üretim hedeflerinin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Koech ve Langat, 2018). Özellikle son yıllarda artan su kısıtı koşulları, sulama yöntemlerinin etkinliğinin ve su kaynaklarının kıt olduğu ve artan nüfus nedeniyle gıda talebinin arttığı bölgelerde, su kaynaklarının yönetimi sürdürülebilir tarım için kritik faktörler haline gelmiştir (Gönen ve ark.,2024).

Sulama yönetimi kavramı, bu noktada sulamanın yalnızca fiziksel bir uygulama değil, planlama, izleme ve değerlendirme süreçlerini kapsayan bütüncül bir sistem olarak ele alınmasını ifade etmektedir. Sulama etkinliği kavramı, literatürde sıklıkla su tasarrufu ile özdeşleştirilse de, ölçek, bağlam ve

amaçlara bağlı olarak farklı sonuçlar ve hatta çelişkiler ortaya çıkarabilmektedir. Bu durum, sulama yönetiminin yalnızca parsel düzeyinde değil, havza ve bölge ölçeğinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Lankford ve ark., 2020). Dolayısıyla çağdaş sulama yaklaşımlarında, teknik verimlilik kadar yönetsel ve çevresel boyutlar da ön plana çıkmaktadır.

Son dönemde yapılan çalışmalar, geleneksel sulama yönetimi anlayışının, artan su talebi ve iklim değişikliği baskıları karşısında yeterli esnekliği sağlayamadığını ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, hassas sulama ve akıllı sulama teknolojileri, sulama yönetiminin evriminde yeni bir aşamayı temsil etmekte; su kullanım etkinliğinin artırılması, çevresel ayak izlerinin azaltılması ve üretim risklerinin yönetilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır (Lakhiar ve ark., 2024; Ali ve ark., 2025). Bu gelişmeler, tarımsal sulamanın kavramsal çerçevesinin giderek daha fazla teknoloji, veri ve sistem yaklaşımıyla yeniden tanımlandığını göstermektedir.

Sulama etkinliği kavramı, literatürde çoğu zaman parsel düzeyinde elde edilen teknik kazanımlar üzerinden değerlendirilmekle birlikte, daha geniş ölçeklerde farklı ve hatta çelişkili sonuçlar doğurabilmektedir. Parsel veya işletme düzeyinde su kullanım etkinliğinin artırılması, her koşulda havza ölçeğinde toplam su tasarrufuna karşılık gelmeyebilmekte; geri dönüş akımları, yeniden kullanım süreçleri ve su tahsis yapıları gibi unsurlar bu ilişkinin yönünü belirleyebilmektedir. Bu durum, sulama etkinliğinin tek boyutlu bir teknik gösterge olarak ele alınmasının yanıltıcı olabileceğini ve ölçek, bağlam ve yönetim hedefleri dikkate alınmadan yapılan değerlendirmelerin su yönetimi açısından istenmeyen sonuçlar doğurabileceğini ortaya koymaktadır (Lankford ve ark., 2020). Dolayısıyla çağdaş sulama yönetimi yaklaşımlarında, teknik verimlilik artışlarının yanı sıra, suyun mekânsal ve zamansal dağılımı, yönetsel karar süreçleri ve çevresel etkiler birlikte ele alınmakta; sulama, çok ölçekli ve bütüncül bir sistem olarak yeniden tanımlanmaktadır (Koech ve Langat, 2018).

3. Geleneksel Sulama Yöntemleri

Geleneksel sulama yöntemleri, tarımsal üretimde suyun bitki kök bölgesine iletilme biçimine göre sınıflandırılan ve uzun yıllar boyunca yaygın olarak uygulanan temel sulama yaklaşımlarını kapsamaktadır. Yüzey sulama, yağmurlama sulama ve damla sulama gibi yöntemler; tarihsel gelişimleri, teknik özellikleri ve uygulama alanları bakımından birbirinden farklılık göstermektedir. Bu yöntemler, üretim koşullarına uygun olarak önemli verim artışları sağlamış olmakla birlikte, su kullanım etkinliği, enerji gereksinimi ve çevresel etkiler açısından çeşitli sınırlılıklar da içermektedir (Koech ve Langat, 2018; Angelakis ve ark., 2020). Özellikle artan su kıtlığı ve iklim değişikliği

baskıları altında, bu geleneksel yaklaşımların performansının yeniden değerlendirilmesi ve güçlü–zayıf yönlerinin sistematik biçimde ortaya konulması gerekmektedir.

3.1. Yüzey Sulama Yöntemleri

Yüzey sulama yöntemleri, sulama suyunun yerçekimi etkisiyle tarla yüzeyine dağıtılması esasına dayanan ve tarımsal üretimde tarihsel olarak en eski ve en yaygın uygulanan sulama yaklaşımları arasında yer almaktadır. Bu yöntemlerde su, açık kanallar veya tarla başı dağıtım sistemleri aracılığıyla yüzeye verilmekte; bitki kök bölgesine infiltrasyon yoluyla ulaşmaktadır. Karık, tava ve salma sulama gibi farklı uygulama biçimleri bulunan yüzey sulama sistemleri, özellikle geniş tarım alanlarında ve yatırım maliyetlerinin sınırlı olduğu koşullarda tercih edilmiştir (Angelakis ve ark., 2020).

Yüzey sulama yöntemlerinin en önemli avantajları arasında, basit sistem yapısı, düşük ilk yatırım maliyeti ve karmaşık ekipman gerektirmemesi yer almaktadır. Enerji gereksiniminin sınırlı olması, bu yöntemlerin uzun yıllar boyunca su kaynaklarına erişimin görece kolay olduğu bölgelerde yaygın biçimde uygulanmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, yüzey sulama uygulamaları büyük ölçüde arazi eğimi, toprak yapısı ve uygulama becerisine bağlı olduğundan, sulama suyu dağılımında homojenliğin sağlanması çoğu zaman güçleşmektedir (Koech ve Langat, 2018).

Güncel literatür, yüzey sulama yöntemlerinin su kullanım etkinliği açısından önemli sınırlılıklar içerdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüzey akışı, derine sızma ve buharlaşma kayıpları, uygulanan suyun önemli bir bölümünün bitki tarafından etkin biçimde kullanılamamasına neden olmaktadır. Bu durum, hem su kaynakları üzerinde ilave baskı oluşturmakta hem de besin maddelerinin yıkanması ve toprak yapısının bozulması gibi çevresel sorunları beraberinde getirebilmektedir (Koech ve Langat, 2018). Ayrıca sulama zamanlamasının çoğunlukla sabit programlara veya üretici deneyimine dayanması, değişken iklim koşulları altında bitkisel su gereksinimlerinin hassas biçimde karşılanmasını zorlaştırmaktadır.

Artan su kıtlığı ve iklim değişikliği baskıları altında, yüzey sulama yöntemlerinin bu yapısal sınırlılıkları daha belirgin hâle gelmiştir. Literatürde, parsel düzeyinde sağlanan bazı teknik iyileştirmelere rağmen, yüzey sulama uygulamalarının genel olarak yüksek su kayıpları ve sınırlı kontrol kapasitesi nedeniyle sürdürülebilir su yönetimi hedefleriyle uyumunun giderek zayıfladığı vurgulanmaktadır (Lankford ve ark., 2020). Bu bağlamda yüzey sulama yöntemleri, tarımsal sulamanın tarihsel gelişimini temsil eden temel yaklaşımlar olarak önemini korumakla birlikte, günümüz koşullarında daha gelişmiş ve

yönetilebilir sulama sistemleriyle karşılaştırılmaya ihtiyaç duyan bir referans noktası oluşturmaktadır.

3.2. Yağmurlama Sulama Yöntemleri

Yağmurlama sulama yöntemleri, sulama suyunun basınçlı sistemler aracılığıyla bitki üzerine yağmur benzeri bir formda uygulanmasına dayanan ve yüzey sulamaya kıyasla daha kontrollü bir su dağılımı sağlamayı amaçlayan sistemlerdir. Bu yöntemlerde su, boru hatları, sprinkler başlıkları ve pompa sistemleri yardımıyla bitki kök bölgesine ulaştırılmakta; böylece toprağın daha homojen biçimde ıslanması hedeflenmektedir. Yağmurlama sulama, özellikle yüzey sulamanın arazi eğimi veya toprak özellikleri nedeniyle etkin biçimde uygulanmadığı alanlarda önemli bir alternatif olarak geliştirilmiştir (Angelakis ve ark., 2020).

Bu sulama yöntemi, yüzey sulamaya göre daha yüksek uygulama kontrolü ve daha esnek bir zamanlama imkânı sunmakla birlikte, su kullanım etkinliği açısından çevresel koşullara duyarlı bir yapı sergilemektedir. Rüzgâr hızı, hava sıcaklığı ve bağıl nem gibi meteorolojik faktörler, yağmurlama sulama sırasında uygulanan suyun önemli bir kısmının buharlaşma veya sürüklenme yoluyla kaybedilmesine neden olabilmektedir. Bu durum, özellikle açık alan uygulamalarında sistem performansını sınırlandıran temel etkenlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Koech ve Langat, 2018).

Enerji gereksinimi, yağmurlama sulama sistemlerinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken bir diğer önemli unsurdur. Suyun basınç altında iletilmesi ve püskürtülmesi, yüzey sulamaya kıyasla daha yüksek enerji tüketimini beraberinde getirmekte; bu durum işletme maliyetlerini artırabilmektedir. Ayrıca sistem tasarımı, bakım gereksinimleri ve işletme koşullarındaki hatalar, su dağılımının homojenliğini olumsuz yönde etkileyerek beklenen verimlilik kazanımlarının tam olarak sağlanamamasına yol açabilmektedir (Koech ve Langat, 2018).

Artan su kıtlığı ve iklim değişikliği baskıları altında, yağmurlama sulama yöntemlerinin sağladığı teknik kazanımların, çevresel ve yönetsel sınırlılıklarla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatürde, bu yöntemlerin uygun koşullarda yüzey sulamaya kıyasla daha etkin sonuçlar verdiği kabul edilmekle birlikte, su ve enerji kullanım etkinliğinin büyük ölçüde sistem tasarımı, işletme becerisi ve çevresel faktörlere bağlı olduğu vurgulanmaktadır (Lankford ve ark., 2020). Bu çerçevede yağmurlama sulama, geleneksel sulama yöntemleri arasında daha kontrollü bir ara aşama olarak değerlendirilmekte; ancak değişken iklim koşullarına uyum ve kaynak verimliliği açısından daha gelişmiş yaklaşımlarla karşılaştırılmaya ihtiyaç duymaktadır.

3.3. Damla Sulama Yöntemleri

Damla sulama yöntemleri, arındırılmış suyun ve gübrenin damlatıcılar aracılığı ile düşük basınç ve sürekli bir akış veya damlalar halinde toprak yüzeyine ya da bitki kök bölgesine verildiği sulama sistemleridir (Bozkurt Çolak ve Baydar, 2024). Bu yöntemlerde su, boru hatları ve damlatıcılar aracılığıyla noktasal olarak toprağa verilmekte; böylece yüzey akışı, derine sızma ve buharlaşma kaynaklı kayıpların sınırlandırılması amaçlanmaktadır. Damla sulama, özellikle su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde, su kullanım etkinliğini artırmaya yönelik önemli bir gelişme olarak literatürde geniş biçimde ele alınmaktadır (Angelakis ve ark., 2020).

Damla sulama sistemlerinin en belirgin üstünlüğü, sulama suyunun bitkinin gerçek gereksinimine daha yakın bir şekilde uygulanabilmesidir. Bu özellik, hem su tasarrufu sağlanmasına hem de bitki gelişiminin daha dengeli biçimde sürdürülmesine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, sistem performansı büyük ölçüde tasarım doğruluğu, işletme koşulları ve bakım süreçlerine bağlıdır. Damlatıcı tıkanmaları, basınç düzensizlikleri ve sistemdeki küçük hatalar, uygulama homojenliğini olumsuz yönde etkileyerek beklenen etkinlik kazanımlarını sınırlayabilmektedir (Koech ve Langat, 2018).

Enerji kullanımı açısından değerlendirildiğinde, damla sulama yöntemleri genellikle yağmurlama sistemlerine kıyasla daha düşük basınç gereksinimine sahiptir. Ancak bu avantaj, sistemin otomasyon düzeyi ve kontrol bileşenleri arttıkça değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca, ilk yatırım maliyetlerinin görece yüksek olması ve teknik bilgi gereksinimi, damla sulamanın yaygınlaştırılmasında karşılaşılan temel engeller arasında yer almaktadır. Bu durum, damla sulama sistemlerinin yalnızca teknik bir çözüm olarak değil, aynı zamanda uygun yönetim ve kapasite geliştirme süreçleriyle birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır (Lankford ve ark., 2020).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, damla sulama yöntemlerinin geleneksel sulama yaklaşımları arasında en yüksek su kullanım etkinliğini sağlayan sistemler arasında yer aldığını ortaya koymakla birlikte, bu etkinliğin her koşulda otomatik olarak sağlanmadığını da vurgulamaktadır. Sulama programlaması, bitki su ihtiyacının doğru belirlenmesi ve çevresel koşullara uyum gibi unsurlar göz ardı edildiğinde, damla sulama sistemleri dahi beklenen performansını sunamaya bilmektedir. Bu bağlamda damla sulama, geleneksel yöntemler içinde en ileri aşamayı temsil etmekte; ancak daha dinamik, veri temelli ve otomasyon destekli yaklaşımlarla bütünleştirildiğinde gerçek potansiyeline ulaşabilmektedir (Lakhier ve ark., 2024).

4. Hassas Sulama ve Sulama Otomasyonu Yaklaşımı

Hassas sulama yaklaşımı, tarımsal sulamanın planlanması ve uygulanmasında bitki, toprak ve atmosfer bileşenlerinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesine dayanan, veri temelli bir yönetim anlayışını ifade etmektedir. Bu yaklaşımda temel amaç, sulama suyunun yalnızca miktar olarak değil; zamanlama, uygulama sıklığı ve mekânsal dağılım açısından da optimize edilmesidir. Geleneksel sulama yöntemlerinde çoğunlukla sabit programlar veya üretici deneyimi esas alınırken, hassas sulama sistemlerinde sulama kararları gerçek zamanlı ölçümler ve sayısal analizler doğrultusunda şekillendirilmektedir. Bu yönüyle hassas sulama, sulama uygulamalarını reaktif bir süreçten çıkararak öngörücü ve uyarlanabilir bir yapıya dönüştürmektedir (Lakhia ve ark., 2024).

Sulama otomasyonu, hassas sulama yaklaşımının sahaya uygulanmasını mümkün kılan temel bileşenlerden biridir. Otomasyon sistemleri; toprak nem sensörleri, iklim ölçüm istasyonları, bitki tabanlı göstergeler ve kontrol üniteleri aracılığıyla sulama sistemlerinin insan müdahalesine olan bağımlılığını azaltmayı hedeflemektedir. Bu sistemler sayesinde sulama, önceden belirlenen eşik değerler veya karar algoritmaları doğrultusunda otomatik olarak başlatılmakta ve sonlandırılmaktadır. Böylece hem su kullanım etkinliği artırılmakta hem de iş gücü ve enerji kullanımında önemli tasarruflar sağlanabilmektedir (Ali ve ark., 2025).

Hassas sulama ve sulama otomasyonu yaklaşımlarının temel üstünlüğü, değişken çevresel koşullara hızlı ve esnek biçimde uyum sağlayabilme kapasitesidir. İklim değişikliğiyle birlikte artan sıcaklık dalgalanmaları, düzensiz yağış rejimleri ve ekstrem hava olayları, bitkisel su gereksinimlerinin zamansal ve mekânsal olarak daha heterojen bir yapı kazanmasına neden olmaktadır. Bu koşullar altında, sabit ve genelleştirilmiş sulama programlarının etkinliği sınırlı kalmakta; buna karşılık hassas sulama sistemleri, gerçek zamanlı veri akışı sayesinde bitki su ihtiyacındaki değişimleri daha doğru biçimde yansıtabilmektedir (Lakhia ve ark., 2024).

Literatürde, hassas sulama ve otomasyon teknolojilerinin su kullanım etkinliği, verim artışı ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli potansiyel sunduğu vurgulanmakla birlikte, bu sistemlerin başarısının büyük ölçüde uygun tasarım, doğru sensör seçimi ve etkili yönetim stratejilerine bağlı olduğu belirtilmektedir. Teknolojik altyapının yetersiz olduğu veya veri yorumlama süreçlerinin etkin biçimde yürütülmediği durumlarda, hassas sulama sistemleri beklenen kazanımları veremeyebilirler. Bu nedenle, hassas sulama yaklaşımları yalnızca bir teknoloji yatırımı olarak değil, bütüncül bir sulama

yönetim sistemi çerçevesinde ele alınmalıdır (Lankford ve ark., 2020; Ali ve ark., 2025).

4.1. Hassas Sulamanın Temel Bileşenleri

Hassas sulama sistemleri, tarımsal sulamanın planlanması ve uygulanmasında ölçüm–iletişim–karar–uygulama döngüsünü bütüncül bir yapı içinde ele alan çok katmanlı sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerin temelini, sahadan elde edilen verilerin gerçek zamanlı veya yarı gerçek zamanlı olarak toplanması, işlenmesi ve sulama kararlarına dönüştürülmesi oluşturmaktadır. Güncel literatürde hassas sulama; sensör tabanlı veri toplama altyapıları, veri iletim ve IoT sistemleri, karar destek ve algoritmik zamanlama yaklaşımları ile sulama otomasyonu bileşenlerinin entegrasyonu üzerinden değerlendirilmektedir (Abioye ve ark., 2022; Mansoor ve ark., 2025).

4.1.1. Sensör tabanlı veri toplama sistemleri

Hassas sulamanın en kritik bileşenlerinden biri, bitki–toprak–atmosfer etkileşimini temsil eden değişkenlerin güvenilir biçimde ölçülmesidir. Bu kapsamda toprak nem sensörleri, iklim sensörleri ve bitki temelli göstergeler, sulama kararlarının temel girdilerini oluşturmaktadır. Özellikle kapasitif toprak nem sensörleri, düşük maliyetleri ve kolay entegrasyon olanakları nedeniyle son yıllarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, sensör performansının toprak tipi, substrat özellikleri ve çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği; bu nedenle sensör seçimi ve kalibrasyonunun sistem başarısı açısından belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Gümüser ve ark., 2025; Abdelmoneim ve ark., 2025).

Sera ve kontrollü ortam uygulamalarında sensör yönlendirmeli sulama sistemleri, bitkisel su ihtiyacının daha hassas biçimde karşılanmasına olanak tanımakta; farklı toprak nem eşiklerine dayalı sulama stratejilerinin verim ve su kullanımı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasına imkân sağlamaktadır (Dirlik ve ark., 2025). Açık alan uygulamalarında ise toprak nemi ölçümleri, hava koşulları ve evapotranspirasyon verileriyle birlikte değerlendirilerek sulama zamanlamasının daha güvenilir hâle getirilmesi hedeflenmektedir (Zhao ve ark., 2023).

4.1.2. Veri iletimi ve IoT altyapıları

Sensörlerden elde edilen verilerin etkin biçimde kullanılabilmesi, bu verilerin güvenilir ve enerji açısından verimli haberleşme altyapıları üzerinden iletilmesine bağlıdır. Kablosuz sensör ağları (WSN) ve IoT tabanlı mimariler, hassas sulama sistemlerinde veri toplama ve izleme süreçlerinin omurgasını

oluşturmaktadır. Bu sistemler, tarla veya sera ölçeğinde dağıtılmış sensör düğümlerinden elde edilen verilerin merkezi veya bulut tabanlı platformlara aktarılmasını mümkün kılmaktadır (Lloret ve ark., 2021; Meriç, 2025).

Son yıllarda LoRaWAN gibi düşük güç tüketimli geniş alan ağlarının (LPWAN) tarımsal uygulamalarda yaygınlaşması, özellikle geniş alanlarda ve enerji kısıtlı koşullarda hassas sulama sistemlerinin uygulanabilirliğini artırmıştır. LoRaWAN tabanlı mimariler, uzun menzil ve düşük enerji tüketimi avantajlarıyla karar destek sistemlerine sürekli veri akışı sağlamaktadır (Arshad ve ark., 2022). Ayrıca Blynk ve ThingSpeak gibi IoT platformları, veri görselleştirme ve uzaktan kontrol imkânları sunarak sulama yönetiminin kullanıcı dostu bir arayüz üzerinden yürütülmesine katkı sağlamaktadır (Saputri ve ark., 2025; Glória ve ark., 2021).

4.1.3. Karar destek sistemleri ve algoritmik sulama zamanlaması

Hassas sulama sistemlerinde toplanan verilerin anlamlı sulama kararlarına dönüştürülmesi, karar destek sistemleri (DSS) ve algoritmik yaklaşımlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistemler, toprak nemi, meteorolojik veriler, bitki gelişim durumu ve model çıktıları gibi çoklu veri kaynaklarını bir arada değerlendirerek sulama zamanlamasını ve su miktarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modeller, sulama kararlarının doğruluğunu artırma potansiyeli nedeniyle son yıllarda yoğun ilgi görmektedir (Kashyap ve ark., 2021; Saggi ve Jain, 2022).

Model tabanlı yaklaşımlarda, simüle edilen toprak nemi ve evapotranspirasyon değerlerinin sensör verileriyle birlikte kullanılması, sulama zamanlamasının hem öngörücü hem de uyarlanabilir bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır (Zhao ve ark., 2023). Center pivot gibi büyük ölçekli sistemlerde ise DSS uygulamaları, mekânsal değişkenliği dikkate alan sulama stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımakta; ancak veri kalitesi, model belirsizlikleri ve işletme karmaşıklığı gibi faktörler bu sistemlerin etkinliğini sınırlayabilmektedir (Zhang ve ark., 2021).

4.1.4. Sulama otomasyonu ve geri besleme mekanizmaları

Sulama otomasyonu, hassas sulama sistemlerinde kararların sahaya uygulanmasını sağlayan son aşamayı temsil etmektedir. Otomasyon sistemleri, sensör verileri ve DSS çıktıları doğrultusunda sulama ekipmanlarını otomatik olarak devreye almakta veya kapatmaktadır. Bu kapalı devre yapı, sulama uygulamalarının sürekli olarak izlenmesine ve geri besleme mekanizmaları aracılığıyla sistem performansının iyileştirilmesine olanak tanımaktadır (Ferrarezi ve Peng, 2021; Ali ve ark., 2025).

Ancak literatürde, otomasyon düzeyinin artmasıyla birlikte sistem karmaşıklığının ve teknik bilgi gereksiniminin de arttığı vurgulanmaktadır. Sensör arızaları, veri iletim kesintileri veya yanlış eşik değerlerinin tanımlanması, otomatik sistemlerin beklenen performansı sunamamasına neden olabilmektedir. Bu nedenle sulama otomasyonu, yalnızca donanımsal bir çözüm olarak değil, etkin izleme, bakım ve yönetim süreçleriyle desteklenen bir sistem yaklaşımı çerçevesinde ele alınmalıdır (Abioye ve ark., 2022; Mansoor ve ark., 2025).

4.1.5. Tarım 4.0 bağlamında entegrasyon ve sınırlılıklar

Hassas sulama sistemleri, Tarım 4.0 çerçevesinde dijital tarım uygulamalarının temel bileşenlerinden biri olarak konumlandırılmaktadır. Sensörler, IoT altyapıları, veri analitiği ve otomasyonun bütünleşik biçimde kullanılması, sulama yönetiminin daha şeffaf, izlenebilir ve uyarlanabilir hâle gelmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, veri güvenliği, sistem ölçeklenebilirliği, maliyetler ve kullanıcı adaptasyonu gibi unsurlar, hassas sulama sistemlerinin yaygınlaştırılmasında karşılaşılan temel sınırlılıklar arasında yer almaktadır (Araújo ve ark., 2023; Mansoor ve ark., 2025).

Bu bağlamda hassas sulama, teknolojik kapasitenin yanı sıra yönetsel ve kurumsal boyutları da içeren çok boyutlu bir dönüşüm süreci olarak değerlendirilmelidir. Başarılı uygulamalar, teknik bileşenlerin doğru entegrasyonunun yanı sıra, veri temelli karar alma kültürünün tarımsal üretim sistemlerine etkin biçimde yerleştirilmesini gerektirmektedir.

4.2. Tarım 4.0 Uygulamalarının Geleneksel Sulama Yöntemleriyle Karşılaştırılması

Tarım 4.0 yaklaşımı kapsamında geliştirilen hassas ve akıllı sulama sistemleri, geleneksel sulama yöntemlerine kıyasla sulama kararlarının alınma biçimi, uygulama doğruluğu ve kaynak kullanım etkinliği açısından belirgin yapısal farklılıklar göstermektedir. Geleneksel sulama uygulamaları genellikle sabit zaman aralıklarına, üretici deneyimine veya basit iklim göstergelerine dayalı olarak yürütülürken; Tarım 4.0 tabanlı sistemlerde sulama, sensör verileri, veri analitiği ve otomasyon altyapıları aracılığıyla dinamik ve uyarlanabilir bir sürece dönüştürülmektedir (Vallejo-Gomez ve ark., 2023; Lakhiar ve ark., 2024).

4.2.1. Su kullanım etkinliği ve verim açısından karşılaştırma

Literatürde, Tarım 4.0 tabanlı hassas sulama uygulamalarının en belirgin üstünlüğü, su kullanım etkinliğinde sağlanan artış olarak öne çıkmaktadır.

Sensör tabanlı ve otomatik sistemler, bitkinin gerçek su ihtiyacını daha doğru biçimde belirleyerek aşırı veya yetersiz sulama riskini azaltmaktadır. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde yapılan çalışmalarda, akıllı sulama sistemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla su tüketimini önemli ölçüde azalttığı ve birim su başına verimi artırdığı bildirilmektedir (Ahmed ve ark., 2023; Ali ve ark., 2025).

Buna karşılık, geleneksel yüzey veya yağmurlama sulama yöntemlerinde su dağılımının homojen olmaması ve çevresel koşullara duyarlılık, su kayıplarını artıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Hassas sulama sistemleri bu sınırlılıkları büyük ölçüde azaltabilmekle birlikte, sağlanan verim artışının her koşulda otomatik olarak gerçekleşmediği; sistem tasarımı ve yönetim kalitesinin belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Lakhia ve ark., 2024).

4.2.2. Sulama zamanlaması ve karar alma süreçleri

Geleneksel sulama uygulamalarında sulama zamanlaması çoğunlukla takvim temelli veya üretici gözlemlerine dayalıdır. Bu yaklaşım, değişken iklim koşulları altında sulama kararlarının doğruluğunu sınırlayabilmektedir. Tarım 4.0 çerçevesinde geliştirilen akıllı sulama sistemleri ise toprak nemi, hava koşulları ve bitki gelişim göstergelerini eş zamanlı olarak değerlendirerek daha hassas bir zamanlama sağlamaktadır (Jamroen ve ark., 2020; Vallejo-Gomez ve ark., 2023).

Makine öğrenmesi ve IoT tabanlı karar destek sistemleri, sulama yönetimini reaktif bir yapıdan çıkararak öngörücü bir sürece dönüştürmektedir. Bununla birlikte, bu sistemlerin etkinliği büyük ölçüde veri kalitesi, sensör güvenilirliği ve algoritmaların yerel koşullara uyarlanmasına bağlıdır. Bu yönüyle Tarım 4.0 uygulamaları, geleneksel yöntemlere kıyasla daha karmaşık bir karar alma altyapısı gerektirmektedir (Nsoh ve ark., 2024; Saha ve ark., 2025).

4.2.3. Enerji tüketimi ve işletme verimliliği

Enerji kullanımı, geleneksel ve akıllı sulama sistemleri arasındaki karşılaştırmada önemli bir diğer boyuttur. Basınçlı sulama sistemleriyle birlikte kullanılan otomasyon ve sensör altyapıları, enerji tüketimini artırabilmektedir. Ancak literatürde, enerji verimli tasarımlar ve yenilenebilir enerji entegrasyonu ile bu dezavantajın önemli ölçüde dengelenebileceği belirtilmektedir (Daraz ve ark., 2025; Abdelhamid ve ark., 2025).

Özellikle güneş enerjisi destekli akıllı sulama sistemleri, enerji-su ilişkisini daha sürdürülebilir bir çerçevede ele almakta ve geleneksel sistemlere kıyasla uzun vadeli işletme avantajları sunmaktadır. Buna rağmen, enerji altyapısının

yetersiz olduğu bölgelerde Tarım 4.0 tabanlı çözümlerin uygulanabilirliği sınırlı kalabilmektedir (Daraz ve ark., 2025).

4.2.4. Yönetim karmaşıklığı, maliyetler ve adaptasyon sorunları

Tarım 4.0 tabanlı sulama sistemlerinin en önemli sınırlılıklarından biri, sistem karmaşıklığı ve ilk yatırım maliyetleridir. Sensörler, iletişim altyapısı, yazılım ve bakım gereksinimleri, özellikle küçük ölçekli işletmeler için önemli engeller oluşturmaktadır. Buna karşın, geleneksel sulama yöntemleri düşük teknik bilgi gereksinimi ve basit işletme yapıları sayesinde hâlen birçok bölgede tercih edilmektedir (Ali ve ark., 2025; Vallejo-Gomez ve ark., 2023). Bununla birlikte, literatürde teknik açıdan yeterli tasarlanmış sulama sistemlerinin dahi sahada beklenen performansı her zaman sağlayamadığı vurgulanmaktadır. Akdeniz koşullarında meyve bahçelerinde yürütölen saha temelli bir çalışmada, damla sulama sistemlerinin hidrolik performans göstergeleri kabul edilebilir sınırlar içinde olmasına rağmen, uygulama ve depolama randımanlarının yönetim eksiklikleri nedeniyle optimal seviyelere ulaşamadığı rapor edilmiştir (Baydar ve ark., 2025). Bu durum, akıllı sulama sistemlerinin yaygınlaşmasının yalnızca teknolojik gelişmelere değil, aynı zamanda üretici eğitimi, teknik destek ve uygun ekonomik teşvik mekanizmalarına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda Tarım 4.0 uygulamaları, geleneksel yöntemlerin tamamen yerine geöen çözümlerden ziyade, belirli koşullar altında üstünlük sağlayan tamamlayıcı yaklaşımlar olarak değerlendirilmektedir (Nsoh ve ark., 2024; Lakhia ve ark., 2024).

4.2.5. Sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğine uyum perspektifi

Tarım 4.0 tabanlı hassas sulama sistemleri, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve iklim değişikliğine uyum açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Gerçek zamanlı izleme ve otomasyon, artan iklim belirsizliği altında sulama yönetiminin daha esnek hâle gelmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi, teknolojik altyapının yanı sıra kurumsal ve sosyo-ekonomik faktörlerle de yakından ilişkilidir (Ahmed ve ark., 2023; Lakhia ve ark., 2024).

Bu çerçevede Tarım 4.0 uygulamaları, geleneksel sulama yöntemlerine kıyasla daha yüksek çevresel performans vaat etmekle birlikte, yaygın ve etkin kullanım için bütöncöl bir dönüşüm sürecini gerekli kılmaktadır.

4.3. Genel Değerlendirme ve Gelecek Perspektifleri

Bu bölümde ele alınan bulgular, Tarım 4.0 çerçevesinde geliştirilen hassas sulama ve sulama otomasyonu uygulamalarının, geleneksel sulama

yöntemlerine kıyasla sunduğu olanakları ve sınırlılıkları bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmeye imkân tanımaktadır. İncelenen literatür, akıllı sulama sistemlerinin su kullanım etkinliğini artırma, sulama zamanlamasını iyileştirme ve çevresel baskılara karşı uyarlanabilirliği güçlendirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymakla birlikte, bu potansiyelin her koşulda otomatik olarak gerçekleşmediğini de açıkça göstermektedir.

Geleneksel sulama yöntemleri, basit işletme yapıları ve düşük teknik gereksinimleri sayesinde birçok tarımsal üretim sisteminde hâlen önemli bir yere sahiptir. Özellikle altyapı olanaklarının sınırlı olduğu bölgelerde bu yöntemler, pratik ve erişilebilir çözümler sunmaya devam etmektedir. Buna karşılık Tarım 4.0 tabanlı hassas sulama yaklaşımları, veri temelli karar alma süreçleri sayesinde sulama yönetimini daha dinamik ve öngörücü bir yapıya dönüştürmektedir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca teknolojik bileşenlerin varlığıyla değil; sistem tasarımı, veri kalitesi, kullanıcı yetkinliği ve kurumsal destek mekanizmalarıyla birlikte anlam kazanmaktadır.

Enerji tüketimi, maliyetler ve yönetim karmaşıklığı gibi unsurlar, akıllı sulama sistemlerinin yaygınlaştırılmasında belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji verimli tasarımlar bu sınırlılıkların bir kısmını hafifletebilmekle birlikte, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler açısından ekonomik sürdürülebilirlik hâlen önemli bir tartışma alanı olarak varlığını korumaktadır. Bu durum, Tarım 4.0 uygulamalarının geleneksel sulama yöntemlerinin doğrudan bir alternatifi olarak değil, belirli üretim koşulları altında stratejik bir tamamlayıcı olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu bağlamda, gelecekte hassas sulama ve sulama otomasyonu uygulamalarının etkinliğinin artırılmasında, sulama kararlarının yalnızca toprak ve iklim verilerine değil, bitki fizyolojik tepkilerine dayandırılması giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Akdeniz iklim koşullarında dolmalık biber bitkisi üzerinde yürütülen saha temelli bir çalışmada, farklı sulama yöntemi ve stratejileri altında stoma direnci ile verim arasında güçlü ve anlamlı ilişkiler ortaya konmuş; belirli stoma direnci aralıklarının yüksek verim açısından kritik eşik değerler sunduğu gösterilmiştir (Çolak ve Yazar, 2024). Bu tür bitki temelli geri bildirim mekanizmalarının, sensör ve otomasyon altyapılarıyla bütünleştirilmesi, Tarım 4.0 uygulamalarının yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda fizyolojik temelli karar verme süreçleriyle desteklenmesini mümkün kılmaktadır.

Geleceğe yönelik olarak hassas sulama ve sulama otomasyonu alanında beklenen gelişmelerin, sensör teknolojilerinin güvenilirliğinin artırılması, veri iletim altyapılarının sadeleştirilmesi ve karar destek sistemlerinin yerel

koşullara daha iyi uyarlanması yönünde yoğunlaşacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte, teknolojik ilerlemenin tarımsal üretim sistemlerine etkin biçimde entegre edilebilmesi, üretici eğitimi, teknik danışmanlık ve politika destekleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda Tarım 4.0 yaklaşımı, yalnızca bir teknoloji dönüşümü değil; aynı zamanda yönetim, planlama ve karar alma kültüründe yaşanan daha geniş kapsamlı bir değişimi temsil etmektedir.

Sonuç olarak, hassas sulama ve sulama otomasyonu uygulamaları, artan su kıtlığı ve iklim değişikliği baskıları altında tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini destekleyen önemli araçlar sunmaktadır. Ancak bu araçların etkinliği, teknik üstünlüklerin yanı sıra sosyo-ekonomik ve yönetsel koşullarla birlikte ele alındığında anlam kazanmaktadır. Bu nedenle gelecekteki uygulamaların, geleneksel yöntemlerin deneyimsel birikimini dışlamadan, Tarım 4.0 teknolojileriyle bütünleştiren, bitki geri bildirimine dayalı, dengeli ve bağlama duyarlı yaklaşımlar üzerine inşa edilmesi gerekmektedir.

5. Sonuç

Bu kitap bölümünde, hassas sulama ve sulama otomasyonu yaklaşımları, Tarım 4.0 perspektifi çerçevesinde ele alınmış ve geleneksel sulama yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İncelenen literatür, tarımsal sulama yönetiminin, deneyime dayalı ve statik uygulamalardan, veri temelli, dinamik ve uyarlanabilir sistemlere doğru belirgin bir dönüşüm süreci içinde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu dönüşümün temel itici gücü, artan su kıtlığı, iklim değişikliği baskıları ve tarımsal üretimde kaynak kullanım etkinliğinin artırılmasına yönelik gereksinimlerdir.

Geleneksel sulama yöntemleri, basit işletme yapıları, düşük teknik gereksinimleri ve yaygın uygulanabilirlikleri sayesinde birçok üretim sisteminde önemini korumaya devam etmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemlerin değişken çevresel koşullara sınırlı uyum kapasitesi ve su kullanım etkinliği açısından taşıdığı kısıtlar, özellikle su kaynaklarının baskı altında olduğu bölgelerde daha belirgin hâle gelmektedir. Bu bağlamda hassas sulama ve otomasyon destekli yaklaşımlar, sulama kararlarının daha doğru zamanlanması, su kayıplarının azaltılması ve çevresel etkilerin sınırlandırılması açısından önemli olanaklar sunmaktadır.

Tarım 4.0 tabanlı sulama sistemlerinin sunduğu bu olanaklar, sensör teknolojileri, IoT altyapıları, karar destek sistemleri ve otomasyon bileşenlerinin bütünleşik biçimde kullanılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Ancak bölüm boyunca da vurgulandığı üzere, bu sistemlerin başarısı yalnızca teknolojik kapasiteye bağlı değildir. Sistem tasarımı, veri kalitesi, işletme becerisi, ekonomik koşullar ve kullanıcı adaptasyonu gibi unsurlar, hassas sulama uygulamalarının

etkinliğini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenle Tarım 4.0 uygulamaları, geleneksel sulama yöntemlerinin doğrudan ve evrensel bir alternatifi olarak değil, belirli koşullar altında üstünlük sağlayan ve uygun biçimde entegre edilmesi gereken çözümler olarak değerlendirilmelidir.

Enerji tüketimi, ilk yatırım maliyetleri ve yönetim karmaşıklığı gibi sınırlılıklar, akıllı sulama sistemlerinin yaygınlaştırılmasında karşılaşılan başlıca engeller olmaya devam etmektedir. Buna karşın, enerji verimli tasarımlar, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve kullanıcı dostu karar destek araçlarının geliştirilmesi, bu engellerin aşılmasına yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler açısından, teknolojik çözümlerin yerel koşullara uyarlanması ve destek mekanizmalarıyla birlikte sunulması, Tarım 4.0 tabanlı sulama uygulamalarının benimsenmesini kolaylaştıracaktır.

Sonuç olarak, hassas sulama ve sulama otomasyonu, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından güçlü bir potansiyel taşımakla birlikte, bu potansiyelin etkin biçimde hayata geçirilmesi bütüncül bir yaklaşımı gerekli kılmaktadır. Gelecekteki uygulamaların, geleneksel sulama yöntemlerinin sahaya dayalı deneyimlerini dışlamadan, Tarım 4.0 teknolojileriyle bütünleştiren dengeli ve bağlama duyarlı stratejiler üzerine inşa edilmesi, su kaynaklarının korunması ve tarımsal üretimin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Kaynaklar

- Abdelhamid, M. A., Abdelkader, T. K., Sayed, H. A., Zhang, Z., Zhao, X., & Atia, M. F. (2025). Design and evaluation of a solar powered smart irrigation system for sustainable urban agriculture. *Scientific Reports*, 15(1), 11761.
- Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Dragonetti, G., Derardja, B., & Khadra, R. (2025). Comparative analysis of soil moisture-and weather-based irrigation scheduling for drip-irrigated lettuce using low-cost Internet of Things capacitive sensors. *Sensors*, 25(5), 1568.
- Abioye, E. A., Hensel, O., Esau, T. J., Elijah, O., Abidin, M. S. Z., Ayobami, A. S., ... & Nasirahmadi, A. (2022). Precision irrigation management using machine learning and digital farming solutions. *AgriEngineering*, 4(1), 70-103.
- Ahmed, Z., Gui, D., Murtaza, G., Yunfei, L., & Ali, S. (2023). An overview of smart irrigation management for improving water productivity under climate change in drylands. *Agronomy*, 13(8), 2113.
- Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106.
- An, Y., Li, Q., & Zhang, L. (2022). Managing agricultural water use in a changing climate in China. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 978-990.
- Angelakis, A. N., Zaccaria, D., Krasilnikoff, J., Salgot, M., Bazza, M., Roccaro, P., ... & Fereres, E. (2020). Irrigation of world agricultural lands: Evolution through the millennia. *Water*, 12(5), 1285.
- Araújo, S. O., Peres, R. S., Filipe, L., Manta-Costa, A., Lidon, F., Ramalho, J. C., & Barata, J. (2023). Intelligent data-driven decision support for agricultural systems-ID3SAS. *IEEE Access*, 11, 115798-115815.
- Bozkurt Çolak, Y., & Baydar, A., (2024). Yüzeyaltı Damla Sulama Sistemi. Gelecekte Tarım ve İnovasyon. Ed. M.F. Baran., A. Çelik. İksad Yayınevi, 159-174. ISBN: 978-625-367-816-6.
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., Küçükyumuk, C., & Dalkılıç, B. (2025). Evaluation of Hydraulic and Irrigation Performances of Drip Systems in Nectarine Orchards (*Prunus persica* var. *nucipersica*) in The Mediterranean Region. *Water*, 17(5), 758.
- Çolak, Y. B., & Yazar, A. (2024). Farklı sulama yöntemi ve stratejilerinin dolmalık biber bitkisinin verim ve stoma direncine etkilerinin belirlenmesi. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 11(4), 870-879.

- Dirlik, I., Uğurlar, F., & Kaya, C. (2025). Sensor-Guided Smart Irrigation for Tomato Production: Comparing Low and Optimum Soil Moisture in Greenhouse Environments. *Food and Energy Security*, 14(2), e70082.
- Ferrarezi, R. S., & Peng, T. W. (2021). Smart system for automated irrigation using internet of things devices. *HortTechnology*, 31(6), 642-649.
- Glória, A., Cardoso, J., & Sebastião, P. (2021). Sustainable irrigation system for farming supported by machine learning and real-time sensor data. *Sensors*, 21(9), 3079.
- Gönen, E., Bozkurt Çolak, Y., Özfinaner, M., Yazar, A., & Tanrıverdi, Ç., (2024). Eco-physiological response of grain amaranth to regulated deficit and conventional deficit irrigation with surface and subsurface drip irrigation systems. *The Journal of Agricultural Science*. 162: 482-496.
- Gümüser, M. A., Pichlhöfer, A., & Korjenic, A. (2025). A Comparison of Capacitive Soil Moisture Sensors in Different Substrates for Use in Irrigation Systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(5), 1461.
- Iglesias, A., & Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural water management*, 155, 113-124.
- Jamroen, C., Komkum, P., Fongkerd, C., & Krongpha, W. (2020). An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture. *Ieee Access*, 8, 172756-172769.
- Kashyap, P. K., Kumar, S., Jaiswal, A., Prasad, M., & Gandomi, A. H. (2021). Towards precision agriculture: IoT-enabled intelligent irrigation systems using deep learning neural network. *IEEE Sensors Journal*, 21(16), 17479-17491.
- Koech, R., & Langat, P. (2018). Improving irrigation water use efficiency: A review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. *Water*, 10(12), 1771.
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., ... & 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.
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., ... & 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.
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., ... & 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.
- Lankford, B., Closas, A., Dalton, J., Gunn, E. L., Hess, T., Knox, J. W., ... & Zwarteveen, M. (2020). A scale-based framework to understand the promises, pitfalls and paradoxes of irrigation efficiency to meet major water challenges. *Global Environmental Change*, 65, 102182.
- 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.
- Lloret, J., Sendra, S., Garcia, L., & Jimenez, J. M. (2021). A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture. *Sensors*, 21(21), 7243.
- Mansoor, S., Iqbal, S., Popescu, S. M., Kim, S. L., Chung, Y. S., & Baek, J. H. (2025). Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1587869.
- Meriç, M. K. (2025). Implementation of a wireless sensor network for irrigation management in drip irrigation systems. *Scientific Reports*, 15(1), 14157.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. *Agronomy*, 10(8), 1120.
- Nsoh, B., Katimbo, A., Guo, H., Heeren, D. M., Nakabuye, H. N., Qiao, X., ... & Kiraga, S. (2024). Internet of things-based automated solutions utilizing machine learning for smart and real-time irrigation management: A review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(23), 7480.
- Rosa, L. (2022). Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, 17(6), 063008.
- Saggi, M. K., & Jain, S. (2022). A Survey Towards Decision Support System on Smart Irrigation Scheduling Using Machine Learning approaches: KS Saggi, S. Jain. *Archives of computational methods in engineering*, 29(6), 4455-4478.
- Saha, G., Shahrin, F., Khan, F. H., Meshkat, M. M., & Azad, A. A. M. (2025). Smart IoT-driven precision agriculture: Land mapping, crop prediction, and irrigation system. *PloS one*, 20(3), e0319268.
- Saputri, F. R., Linelson, R., Salehuddin, M., Nor, D. M., & Ahmad, M. I. (2025). Design and development of an irrigation monitoring and control

- system based on blynk internet of things and thingspeak. *PloS one*, 20(4), e0321250.
- Vallejo-Gomez, D., Osorio, M., & Hincapie, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. *Agronomy*, 13(2), 342.
- Xing, Y., & Wang, X. (2024). Precision agriculture and water conservation strategies for sustainable crop production in arid regions. *Plants*, 13(22), 3184.
- 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.
- Zhao, H., Di, L., Guo, L., Zhang, C., & Lin, L. (2023). An automated data-driven irrigation scheduling approach using model simulated soil moisture and evapotranspiration. *Sustainability*, 15(17), 12908.
- Ucak, A.B., Kociğcka, J., Liberacki, D., Saltuk, B., Atilgan, A., Stachowski, P., Rolbiecki, R. (2024). The effects of high temperature and low humidity on crop water stress index of seed pumpkin plants (*Cucurbita pepo* L.) in semi-arid climate conditions. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, 23(1), 63–73. <https://doi.org/10.24326/asphc.2024.5287>
- Ucak AB, Arslan H. 2023. Kısıtlı sulama koşullarında yetiştirilen nohut çeşitlerinin kuraklık stresi direnci göstergeleri . *PeerJ* 11 : e14818 <https://doi.org/10.7717/peerj.14818>

4. Bölüm

Küresel İklim Değişikliğinin Yabancı Ot Biyolojisi, Fizyolojisi ve Mücadele Olanakları Üzerine Etkileri

Yücel KARAMAN¹
Olca BOZDOĞAN¹

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği, son yüzyılda insan faaliyetleri kaynaklı sera gazı emisyonlarının artmasıyla birlikte, tarımsal ekosistemleri çok boyutlu ve giderek artan bir dönüşüm sürecine sokmuştur. Atmosferdeki karbondioksit (CO₂) konsantrasyonundaki sürekli artış ve buna eşlik eden küresel sıcaklık artışı, yalnızca iklim sisteminin fiziksel bileşenlerini değil, aynı zamanda bitkisel üretim süreçlerini, türler arası rekabet ilişkilerini ve tarımsal yönetim stratejilerini de köklü biçimde etkilemektedir. Atmosferdeki CO₂'nin sanayi öncesi dönemde yaklaşık 280 ppm düzeylerinden günümüzde 420 ppm'nin üzerine çıkması ve bu artışın küresel sıcaklık artışıyla güçlü bir şekilde ilişkili olduğunun ortaya konması, iklim değişikliğinin biyosfer üzerindeki etkilerinin bilimsel temelini oluşturmaktadır (Hansen ve ark., 1981; Kuo ve ark., 1990; IPCC, 2021; IPCC, 2023). İklim sistemine ilişkin erken dönem çalışmalarda, CO₂ artışının gezegenin enerji dengesini bozarak yüzey sıcaklıklarında artışa yol açtığı ve bu sürecin doğal iklim değişkenliğinin ötesinde, antropojenik bir zorlanma yarattığı açık biçimde ortaya konmuştur (Hansen ve ark., 1981). Daha sonraki çalışmalar, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu ile küresel sıcaklık artışı arasında yalnızca korelasyon değil, aynı zamanda nedensel bir bütünlük bulunduğunu göstermiştir (Kuo ve ark., 1990). Bu bağlamda, iklim değişikliği günümüzde artık öngörülen bir risk olmaktan çıkmış; tarımsal üretim sistemlerinde gözlemlenebilen, ölçülebilen ve yönetilmesi gereken somut bir gerçeklik hâline gelmiştir.

Tarım sektörü, iklim değişikliğinden en hızlı ve en doğrudan etkilenen insan faaliyetlerinin başında gelmektedir. Sıcaklık artışları, değişen yağış rejimleri, artan kuraklık sıklığı ve ekstrem iklim olayları; bitki büyüme dönemlerini, verim potansiyelini ve ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bununla

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Malatya, Türkiye

birlikte, iklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkileri yalnızca kültür bitkileriyle sınırlı olmayıp, tarımsal sistemlerin ayrılmaz bir parçası olan yabancı otlar, zararlılar ve hastalıklar üzerinden dolayı fakat çoğu zaman daha yıkıcı sonuçlar doğurmaktadır (Semeraro ve ark., 2023). Agro-ekosistemler, doğal ekosistemlerden farklı olarak insan müdahalesiyle şekillenen ve üretim odaklı işleyen sistemlerdir. Bu sistemlerin iklim değişikliğine karşı dayanıklılığı; yalnızca kültür bitkilerinin fizyolojik toleransına değil, aynı zamanda yabancı ot-kültür bitkisi rekabetinin nasıl evrildiğine de bağlıdır. Nitekim agro-ekolojik yaklaşımlar, iklim değişikliği karşısında tarımsal sistemlerin sürdürülebilirliğinin ancak biyolojik etkileşimlerin bütüncül olarak ele alınmasıyla sağlanabileceğini vurgulamaktadır (Altieri ve ark., 2015). Bu çerçevede yabancı otlar, iklim değişikliğinin tarımsal sistemler üzerindeki etkilerini anlamada kilit bir biyolojik etmen olarak öne çıkmaktadır.

Yabancı otlar; yüksek genetik çeşitlilikleri, geniş ekolojik tolerans aralıkları, hızlı büyüme ve üreme kapasiteleri ile değişen çevresel koşullara kültür bitkilerine kıyasla çok daha hızlı uyum sağlayabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle yabancı otlar, iklim değişikliğine verilen ekolojik yanıtların erken ve güçlü göstergeleri olarak kabul edilmektedir (Peters ve ark., 2014). Artan sıcaklıklar ve yükseltilmiş CO₂ koşulları altında birçok yabancı ot türünün büyüme hızında, biyokütle üretiminde ve rekabet gücünde artış gözlenirken, bazı kültür bitkilerinin bu değişimlere aynı ölçüde uyum sağlayamadığı bildirilmektedir (Korres ve ark., 2016). Özellikle CO₂ artışının C₃ ve C₄ fotosentetik mekanizmalara sahip bitkiler üzerindeki farklı etkileri, yabancı ot-kültür bitkisi rekabetini yeniden şekillendirmektedir. Artırılmış CO₂ koşullarında birçok C₃ yabancı ot türünün fotosentetik kapasitesinin ve su kullanım etkinliğinin arttığı, bunun da rekabet avantajı sağladığı belirtilmektedir (Ziska ve ark., 2019). Buna karşılık, sıcaklık artışları özellikle C₄ yabancı ot türlerinin coğrafi yayılış alanlarını genişleterek, daha önce sınırlı kaldıkları bölgelerde baskın hâle gelmelerine olanak tanımaktadır (Peters ve ark., 2014).

İklim değişikliğinin yabancı ot biyolojisi üzerindeki etkileri yalnızca büyüme ve rekabetle sınırlı değildir. Çimlenme zamanlaması, fenolojik gelişim, tohum dormansisi ve toprak tohum bankası dinamikleri de sıcaklık ve CO₂ değişimlerinden doğrudan etkilenmektedir. Bu durum, tarımsal üretim alanlarında yabancı ot florasının zaman içinde değişmesine ve yeni, daha fazla baskılayan türlerin baskın hâle gelmesine yol açmaktadır (Ziska ve ark., 2019). Nitekim birçok bölgede istilacı yabancı ot türlerinin yayılış hızının iklim değişikliği ile paralel olarak arttığı rapor edilmiştir. Bu ekolojik dönüşüm, yabancı ot yönetimi açısından ciddi zorlukları da beraberinde getirmektedir. İklim değişikliği, herbisitlerin etki mekanizmalarını, bitki bünyesinde alım ve

taşıyım süreçlerini ve metabolik parçalanma hızlarını etkileyerek kimyasal mücadelenin etkinliğini azaltabilmektedir (Korres ve ark., 2016). Ayrıca, artan çevresel stres koşulları altında yabancı ot popülasyonlarında dayanıklılık gelişiminin hızlandığı ve mevcut yönetim stratejilerinin yetersiz kaldığına dair bulgular giderek artmaktadır (Anwar ve ark., 2021). Son yıllarda yapılan çalışmalar, çiftçilerin yabancı ot davranışlarında iklim kaynaklı değişimleri açık biçimde gözlemlediğini ortaya koymaktadır. Avustralya tahıl üretim sistemlerinde yürütölen kapsamlı bir anket çalışması, yabancı otların yayılış desenleri, çıkış zamanları ve mücadeleye verdikleri tepkilerin geçmişe kıyasla belirgin biçimde değiştiğini göstermiştir (Bajwa ve ark., 2025). Benzer şekilde, süs bitkileri üretim sistemlerinde yapılan çalışmalarda iklim değişikliğinin yabancı ot yönetimini daha karmaşık ve maliyetli hâle getirdiğini vurgulamaktadır (Mou ve ark., 2025).

Tüm bu bulgular, iklim değişikliği ile yabancı ot biyolojisi arasındaki ilişkinin tek yönlü olmayıp çok faktörlü ve etkileşimli bir nitelik taşıdığını göstermektedir. Sıcaklık artışı ve CO₂ yükselmesi; yabancı otların fizyolojik performansını, ekolojik rekabet gücünü ve evrimsel yönelimlerini birlikte şekillendirmekte, bu da tarımsal üretim sistemlerinde köklü değişimlere yol açmaktadır (Ziska ve ark., 2019). Buna karşın, mevcut literatürde bu iki temel iklim bileşeninin (sıcaklık ve CO₂) yabancı otlar üzerindeki etkilerinin çoğu zaman ayrı ayrı ele alındığı, etkileşimli ve bütöncöl değerdendirmelerin sınırlı kaldığı görölmektedir.

2. Yabancı Otların Artan Sıcaklığa Fizyolojik Tepkileri

Artan sıcaklıklar, yabancı otların yaşam döngüsünün erken evrelerinden itibaren fizyolojik süreçleri doğrudan etkileyerek çimlenme, çıkış ve fide gelişimini yeniden şekillendirmektedir. Birçok yabancı ot türü, geniş termal tolerans aralıkları sayesinde yükselen sıcaklıklara költür bitkilerine kıyasla daha esnek tepkiler verebilmekte; bu durum, özellikle çimlenme hızının artması ve çıkış zamanının erkene kayması şeklinde ortaya çıkmaktadır (Ramesh ve ark., 2017; Anwar ve ark., 2021). Sıcaklık artışı, tohumların temel sıcaklık gereksinimlerinin daha erken karşılanmasına yol açarak toprak yüzeyinde daha uzun bir büyüme periyodu oluşturmakta ve yabancı otların erken dönemde rekabet avantajı kazanmasına neden olmaktadır. Sıcaklığın çimlenme ve erken fide gelişimi üzerindeki etkisi, çevresel stres faktörleriyle birlikte değerdendirildiğinde daha belirgin hâle gelmektedir. Özellikle sıcaklık–tuzluluk gibi etkileşimler, yabancı ot türlerinin fizyolojik esnekliğini ortaya koymakta; bazı yabancı otların yüksek sıcaklık koşullarında stres toleransını koruyarak veya artırarak költür bitkilerine göre daha başarılı çimlenme ve gelişim

sergilediği bildirilmektedir (Nikolić ve ark., 2023). Benzer şekilde, *Parthenium hysterophorus* gibi istilacı türlerde yapılan modelleme çalışmaları, artan sıcaklıkların temel ve optimum sıcaklık aralıklarını genişleterek çimlenme yüzdesini ve hızını artırdığını, bunun da tarla koşullarında daha yoğun ve eş zamanlı çıkışlara yol açtığını göstermektedir (Afzal ve ark., 2022).

Yükselen sıcaklıkların yabancı ot fizyolojisi üzerindeki etkileri yalnızca çimlenme ile sınırlı kalmayıp, fotosentez–solunum dengesi ve büyüme hızını da kapsamaktadır. Sıcaklık artışı, birçok yabancı ot türünde metabolik faaliyetleri hızlandırarak nispi büyüme oranını artırmakta; bu durum, özellikle erken gelişme döneminde yabancı ot–kültür bitkisi rekabetini yabancı otlar lehine çevirmektedir (Kumar ve ark., 2023; Ramesh ve ark., 2017). Ayrıca, yüksek sıcaklık koşullarında yabancı otların fenotipik uyum yeteneklerinin artması, çevresel değişkenliğe daha hızlı uyum sağlamalarına olanak tanımaktadır (Anwar ve ark., 2021). Sıcaklık artışına bağlı olarak yabancı otların fenolojik davranışlarında da belirgin kaymalar gözlenmektedir. Isınan koşullar altında çimlenme ve çiçeklenme zamanlarının erkene kayması, bazı türlerde büyüme döneminin uzamasına ve yıllık tohum üretiminin artmasına neden olmaktadır. Özellikle istilacı türlerde gözlenen bu fenolojik kaymalar, yalnızca büyümenin hızlanmasından değil, aynı zamanda yaşam döngüsünün yeniden düzenlenmesinden kaynaklanmaktadır (Osaki ve ark., 2022). Bu durum, yabancı otların popülasyon dinamiklerini güçlendirerek uzun vadede istilacılık potansiyelini artırmaktadır.

Sonuç olarak, artan sıcaklıklar yabancı otların fizyolojik performansını çok yönlü biçimde etkileyerek çimlenme başarısını, büyüme hızını ve fenolojik zamanlamayı değiştirmektedir. Bu fizyolojik avantajlar, yabancı otların kültür bitkileri karşısında rekabet gücünü artırmakta ve mevcut yabancı ot yönetim stratejilerinin etkinliğini zorlayan yeni bir ekolojik denge oluşturmaktadır (Mou ve ark., 2025; Kumar ve ark., 2023). Bu nedenle, sıcaklık artışının yabancı ot biyolojisi üzerindeki etkilerinin anlaşılması, iklim değişikliği koşullarında etkili ve sürdürülebilir yabancı ot yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir.

3. Artan Karbondioksitin Yabancı Otlar Üzerindeki Etkileri

Atmosferdeki karbondioksit (CO_2) konsantrasyonundaki artış, yabancı otların fizyolojik performansını ve tarımsal sistemlerdeki rekabet dengelerini doğrudan etkileyen temel iklim etmenlerinden biridir. Yükseltilmiş CO_2 koşulları, özellikle C_3 fotosentetik mekanizmalı yabancı otlarda fotosentetik karbon kazanımını artırarak biyokütle üretimini, yaprak alanını ve su kullanım etkinliğini güçlendirmektedir. Uzun süreli iklim değişikliği çalışmalarına dayalı bulgular, Rubisco (Ribüloz-1,5-bisfosfat karboksilaz/oksijenaz) aktivitesinde

kısmi bir aşağı düzenleme görölse dahi, net karbon kazanımının arttığını ve bunun bitki büyümesini desteklediğini ortaya koymaktadır (Leakey ve ark., 2009). Bu fizyolojik avantaj, yabancı otların erken gelişme dönemlerinde kültür bitkileriyle rekabet gücünü artıran önemli bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir (Anwar ve ark., 2021). Artan CO₂'nin yabancı otlar üzerindeki etkileri, fotosentetik mekanizmalara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Genel olarak C₃ yabancı otlar, artırılmış CO₂ koşullarından daha güçlü biçimde faydalanırken, C₄ türlerde doğrudan fotosentetik uyarım sınırlı kalmaktadır. Ancak sıcaklık ve su stresi gibi eşlik eden çevresel faktörler altında, C₄ yabancı otların da dolaylı avantajlar elde edebildiği bildirilmektedir (Korres ve ark., 2016). C₃ kültür bitkileri ile C₄ yabancı otlar arasındaki rekabeti ele alan klasik çalışmalar, artan CO₂ ve sıcaklık koşullarında rekabet ilişkilerinin türlere ve çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. (Alberto ve ark., 1996). Bu bulgular, yabancı ot florasının genel yapısını ve baskın türlerin zaman içinde değişebileceğini göstermektedir.

Artırılmış CO₂ koşulları, yabancı ot-kültür bitkisi rekabetinde yalnızca büyüme ve biyokütle üzerinden değil, aynı zamanda besin elementi kullanımı üzerinden de etkili olmaktadır. İklim değişikliği üzerine yönelik saha çalışmaları, CO₂ artışının C₃ kültür bitkilerinde mutlak besin alımını artırırken, bazı C₄ yabancı ot türlerinde göreceli rekabet gücünü zayıflatabildiğini ortaya koymuştur (Zeng ve ark., 2011). Buna karşın, istilacı yabancı ot türlerinde yürütülen uygulamalı çalışmalar, artan CO₂'nin stres koşulları altında dahi büyümeyi destekleyerek bu türlerin yayılma ve yerleşme potansiyelini artırabildiğini göstermektedir (Saravanane ve ark., 2023). Bu bulgular, CO₂ artışının yabancı ot-ürün etkileşimlerini tek yönlü değil, türlere ve çevresel koşullara bağlı olarak farklı biçimlerde etkilediğini göstermektedir. Atmosferdeki artan CO₂'nin yabancı ot mücadelesi üzerindeki etkileri, herbisit etkinliği ve dayanıklılık gelişimi açısından da kritik sonuçlar doğurmaktadır. Yükseltilmiş CO₂ koşullarında bazı yabancı ot türlerinde yaprak anatomisinin, biyokütle dağılımının ve metabolik faaliyetlerin değişmesi, sistemik herbisitlerin alım ve taşınımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Nitekim glifosata karşı dirençli C₃ ve C₄ yabancı ot türlerinde, artan CO₂ altında herbisit duyarlılığının daha da azaldığı rapor edilmiştir (Fernando ve ark., 2016). Bu durum, iklim değişikliği koşullarında mevcut kimyasal mücadele stratejilerinin etkinliğinin sorgulanmasını ve yabancı ot yönetiminde daha bütüncül yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Mou ve ark., 2025; Kaur ve ark., 2024).

4. Sıcaklık ve Karbondioksit Etkileşiminin Yabancı Otlar Üzerindeki Etkileri

Artan sıcaklık ve yükseltilmiş atmosferik karbondioksit (CO₂) konsantrasyonu, yabancı otların fizyolojik ve ekolojik tepkilerini çoğu zaman tek tek değil, etkileşimli bir biçimde şekillendirmektedir. Meta-analizler, sıcaklık ve CO₂ artışının birlikte ele alındığında fotosentez, büyüme ve fenoloji üzerindeki etkilerinin türlere ve çevresel bağlama bağlı olarak sinerjik ya da antagonistik olabildiğini göstermektedir (Wang ve ark., 2012). Bu durum, iklim değişikliğinin yabancı ot biyolojisi üzerindeki etkilerinin yalnızca tek bir çevresel faktör üzerinden açıklanamayacağını, çok faktörlü bir yaklaşım gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Sıcaklık $\times$ CO₂ etkileşiminin fizyolojik düzeydeki en belirgin sonuçları, fotosentetik aktivite ve büyüme dinamiklerinde gözlenmektedir. Kısa dönemli deneysel çalışmalar, yükseltilmiş CO₂ ve sıcaklığın birlikte artmasının C₃ bitkilerde fotosentetik indüksiyonu ve karbon kazanımını belirgin biçimde artırabildiğini, buna karşın C₄ bitkilerde bu etkinin daha sınırlı veya çevre koşullarına bağımlı olduğunu ortaya koymuştur (Zheng ve ark., 2022; Lee, 2011). Bununla birlikte, uzun dönemli gözlemler ve alan temelli çalışmalar, sıcaklık ve CO₂'nin birlikte artmasının büyüme periyodunu uzatarak yabancı otların yıllık biyokütle üretimini ve rekabet gücünü artırabildiğini göstermektedir (Tursun ve ark., 2018; Wang ve ark., 2019). Bu fizyolojik avantajlar, yabancı otların tarımsal sistemlerde daha baskın hâle gelmesine zemin hazırlamaktadır.

Yabancı ot-kültür bitkisi rekabetinde sıcaklık ve CO₂ etkileşimi önemli bir rol oynamaktadır. Klasik rekabet çalışmaları, artırılmış CO₂ koşullarında C₃ kültür bitkilerinin C₄ yabancı otlara karşı rekabet gücünün artabildiğini; ancak bu avantajın eş zamanlı sıcaklık artışıyla zayıflayabildiğini ortaya koymuştur (Alberto ve ark., 1996). Benzer şekilde, daha güncel çalışmalar da sıcaklık artışının C₄ yabancı otların büyüme ve üreme performansını destekleyerek, CO₂ kaynaklı avantajları dengeleyebildiğini bildirmektedir (Lee, 2011). Bu bulgular, gelecekte yabancı ot florasının yapısı ve baskın türlerin, sıcaklık ve CO₂ düzeylerine bağlı olarak değişebileceğine işaret etmektedir. Sıcaklık ve CO₂'nin birlikte artışı, yabancı ot yönetimi ve herbisit etkinliği üzerinde de önemli sonuçlar doğurmaktadır. Yükseltilmiş CO₂ ve sıcaklık koşulları, bazı yabancı ot türlerinde herbisit alımı, taşınımı ve metabolizmasını değiştirerek kimyasal mücadelenin etkinliğini azaltabilmektedir. Nitekim glifosat ve cyhalofop-butyl gibi herbisitlerle yapılan çalışmalar, artan CO₂ ve sıcaklık altında herbisit duyarlılığının azaldığını ve direnç düzeylerinin güçlenebildiğini göstermektedir (Refatti ve ark., 2019; Bozdoğan ve ark., 2025). Benzer şekilde ALS (asetolaktat sentaz) inhibitörü herbisitlerle yürütülen deneyler, sıcaklık $\times$ CO₂

etkileşiminin herbisit performansını tür bazında farklılaştırdığını ortaya koymaktadır (Ghazikhanlou Sani ve ark., 2023). Bu durum, iklim değişikliği koşullarında yabancı ot mücadele stratejilerinin yeniden değerlendirilmesini ve daha entegre yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır.

5. Yabancı Otların Yayılışı, İstilacılığı ve Tarımsal Floradaki Değişimler

İklim değişikliği, yabancı otların coğrafi yayılış alanlarını, popülasyon dinamiklerini ve tarımsal sistemlerdeki baskınlıklarını köklü biçimde dönüştürmektedir. Artan sıcaklıklar ve değişen iklim rejimleri, birçok yabancı ot türünün enlem ve yükselti boyunca yeni alanlara doğru yayılmasını kolaylaştırmakta; bu durum özellikle sıcaklık toleransı yüksek ve geniş ekolojik toleransa sahip türlerin tarım alanlarında daha yaygın hâle gelmesine yol açmaktadır (Peters ve ark., 2014; Ramesh ve ark., 2017). Sonuç olarak, geçmişte sınırlı dağılıma sahip bazı türler günümüzde farklı agro-ekolojik bölgelerde kalıcı popülasyonlar oluşturabilmektedir. İklim değişikliğinin yabancı ot florası üzerindeki en belirgin etkilerinden biri, istilacı türlerin yayılma hızının ve başarı oranının artmasıdır. Küresel ölçekte yapılan modelleme çalışmaları, gelecekte iklim değişikliğinin etkisiyle istilacı yabancı ot türlerinin hem sayı hem de etki alanı bakımından önemli ölçüde artacağını öngörmektedir (Shabani ve ark., 2020). Bu türler, hızlı büyüme, yüksek tohum üretimi ve çevresel değişkenliğe uyum yetenekleri sayesinde yerel flora üzerinde baskı oluşturarak biyolojik çeşitliliği azaltmakta ve tarımsal üretim sistemlerinin dengesini bozmaktadır (Umkulzhum ve ark., 2024).

Sıcaklık artışına bağlı fenolojik kaymalar, yabancı otların yaşam döngüsünü hızlandırarak istilacılık potansiyelini daha da güçlendirmektedir. Isınan koşullar altında çimlenme, çiçeklenme ve tohum bağlama dönemlerinin erkene kayması, bazı yabancı ot türlerinde yaşam döngüsünün kısalmasına ve popülasyon artış hızının yükselmesine neden olmaktadır. Bu süreç, özellikle istilacı yabancı ot türlerinde daha belirgin olup, bireylerin daha erken dönemde generatif gelişim göstermesine ve tarla koşullarında popülasyon yoğunluğunun artmasına katkı sağlamaktadır. Keller ve Shea, 2021). Bu fenolojik esneklik, yabancı otların iklim değişikliğine karşı avantajlı konumlarını pekiştiren temel mekanizmalardan biridir.

Tarımsal yoğunlaşma, herbisit kullanımına dayalı yönetim stratejileri ve iklim değişikliği birlikte değerlendirildiğinde, yabancı ot tehdidinin geçmişe kıyasla daha karmaşık ve zor yönetilebilir bir hâl aldığı görülmektedir. Uzun dönemli tarla verileri, ısınan iklim koşullarının yabancı otların ürünler üzerindeki rekabet baskısını artırdığını ve potansiyel verim kayıplarını büyüttüğünü ortaya koymaktadır (Storkey ve ark., 2021). Bu bağlamda, iklim

değişikliğine bağlı yabancı ot yayılışı ve flora değişimleri, yalnızca ekolojik bir sorun değil; aynı zamanda sürdürülebilir tarımsal üretim açısından stratejik bir risk unsuru olarak değerlendirilmelidir (Anwar ve ark., 2021). Bu durum, yabancı ot yönetiminde uzun vadeli, bölgeye özgü ve iklim duyarlı yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

6. Değişen İklim Koşullarında Herbisit Etkinliği ve Dayanıklılık Gelişimi

İklim değişikliğiyle birlikte artan sıcaklık ve karbondioksit (CO₂) düzeyleri, herbisitlerin yabancı otlar üzerindeki etkinliğini fizyolojik ve biyokimyasal süreçler yoluyla etkilemektedir. Yükseltilmiş CO₂ koşullarında yabancı otlarda yaprak alanının ve biyokütlenin artması, kütikula kalınlığında ve yaprak anatomisinde meydana gelen değişimler, özellikle çıkış sonrası uygulanan sistemik herbisitlerin yaprak tarafından alımını ve hedef dokulara taşınımını sınırlandırabilmektedir (Pacanoski ve Mehmeti, 2023). Buna karşılık, artan sıcaklıklar herbisitlerin bitki dokularına alınımını kısa vadede artırabilse de metabolik faaliyetlerin hızlanması herbisitlerin bitki bünyesinde daha hızlı parçalanmasına ve etkinliğin azalmasına yol açabilmektedir. (Bozdoğan ve ark., 2025). Sıcaklık ve CO₂'nin herbisit performansı üzerindeki etkileri herbisitlerin etki mekanizmasına ve yabancı ot türüne bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. EPSPS (5-Enolpirüvülşikimat-3-fosfat sentez) ve ALS inhibitörü herbisitlerle yapılan deneysel çalışmalar, yükseltilmiş CO₂ ve sıcaklık koşullarında yabancı otların bu herbisitlere karşı duyarlılığının azaldığını ve kontrol başarısının düştüğünü ortaya koymuştur (Fernando ve ark., 2016; Ghazikhanlou Sani ve ark., 2023). Özellikle artan CO₂'ye bağlı biyokütle artışı, sistemik herbisitlerin bitki dokuları içinde “seyrelme etkisi” göstermesine neden olmakta ve hedef enzimlere ulaşan etkin madde miktarını azaltmaktadır (Pacanoski ve Mehmeti, 2023).

İklim değişikliği koşulları, yalnızca herbisit etkinliğini azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda herbisit dayanıklılığının gelişme ve yayılma hızını da artırmaktadır. Yükseltilmiş CO₂ ve sıcaklık altında hızlanan büyüme ve rejenerasyon, herbisit uygulamalarından sağ kalan bireylerin daha kısa sürede yeniden tohum bağlamasına olanak tanımakta ve dayanıklı genotiplerin popülasyon içinde hızla yayılmasını teşvik etmektedir. Nitekim çoklu dayanıklılığa sahip *Echinochloa* türlerinde yapılan çalışmalar, artan CO₂ ve sıcaklığın herbisit direncini güçlendirdiğini ve kontrol seçeneklerini ciddi biçimde sınırlandırdığını göstermiştir (Refatti ve ark., 2019). Bu durum, iklim değişikliğinin dayanıklılık gelişimini etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, iklim değişikliği koşullarında yabancı ot yönetimi yalnızca herbisit

seçimine indirgenemeyecek kadar karmaşık hâle gelmiştir. Herbisit etkinliğinin çevresel koşullara duyarlılığının artması, uygulama zamanlaması, doz ayarlamaları ve etki mekanizması çeşitliliğinin daha dikkatli planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca kültürel ve mekanik mücadele yöntemleriyle desteklenen entegre yabancı ot yönetimi yaklaşımları, herbisitlere aşır bağımlılığın azaltılması ve dayanıklılık riskinin sınırlandırılması açısından kritik önem taşımaktadır (Pacanoski ve Mehmeti, 2023; Bozdoğan ve ark., 2025). Değişen iklim koşulları, herbisit etkinliğinin istikrarını azaltarak yabancı ot yönetiminde iklime duyarlı stratejilere olan gereksinimi artırmaktadır.

7. İklım Değişikliğine Uyumlu Entegre Yabancı Ot Yönetimi Stratejileri

İklım değişikliği koşullarında yabancı otların fizyolojik esnekliğinin artması, yayılış alanlarının genişlemesi ve herbisit etkinliğinin azalması, geleneksel yabancı ot yönetim yaklaşımlarının tek başına yeterli olmadığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Artan sıcaklık ve yükselen CO₂ koşulları altında yabancı ot–kltr bitkisi rekabetinin yabancı otlar lehine kayması, yabancı ot mücadelesinin yalnızca kısa vadeli kontrol hedeflerinden ziyade, uzun vadeli sistem dayanıklılığı perspektifiyle ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede entegre yabancı ot yönetimi, iklim değişikliğine uyumlu tarımsal üretim sistemlerinin temel etmenlerinden biri hâline gelmiştir (Anwar ve ark., 2021; Ramesh ve ark., 2017). İklime duyarlı entegre yabancı ot yönetimi yaklaşımlarında, herbisitler hâlen önemli bir araç olmakla birlikte, uygulama zamanlaması, doz ve etki mekanizması seçimi çevresel koşullara göre yeniden yapılandırılmalıdır. Sıcaklık ve CO₂'nin herbisit performansı üzerindeki etkilerinin artan belirsizliği, tek etki mekanizmasına dayalı stratejilerin riskini artırmakta ve herbisit rotasyonu ile karışımların önemini ön plana çıkarmaktadır. Bunun yanı sıra, herbisit dışı yöntemlerin (ekim nöbeti, uygun ekim zamanı ve mekanik kontrol) iklim değişikliği koşullarında yabancı ot baskısını azaltmada kritik tamamlayıcı roller üstlendiği bildirilmektedir (Pacanoski ve Mehmeti, 2023; Storkey ve ark., 2021).

Kültürel uygulamalar, iklim değişikliği koşullarında yabancı ot yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Rekabet gücü yüksek çeşitlerin kullanımı, örtü bitkileri ve toprak işleme sistemlerinin yeniden düzenlenmesi, yabancı otların çimlenme ve yerleşme başarısını sınırlayabilmektedir. Özellikle iklim değişikliğinin tetiklediği fenolojik kaymalar dikkate alındığında, yabancı otların erken çıkış avantajını kırmaya yönelik stratejilerin önemi giderek artmaktadır. Bu uygulamalar, herbisitlere olan bağımlılığı azaltarak dayanıklılık gelişimi riskini de dolaylı olarak sınırlandırmaktadır (Peters ve ark., 2014; Mou ve ark., 2025).

Sonuç olarak, iklim değişikliğine uyumlu yabancı ot yönetimi; kimyasal, kültürel ve mekanik yöntemlerin çevresel koşullarla uyumlu biçimde bütünleştirildiği dinamik bir yaklaşımı gerektirmektedir. Değişen iklim koşulları altında yabancı ot baskısının mekânsal ve zamansal değişkenlik göstermesi, sabit uygulamalar yerine esnek, izlemeye dayalı ve bölgeye özgü stratejilerin benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca yabancı ot kontrolünü değil, aynı zamanda tarımsal üretim sistemlerinin uzun vadeli sürdürülebilirliğini ve iklim değişikliğine karşı dayanıklılığını güçlendirmeyi hedeflemektedir.

8. Genel Sonuçlar ve ıkarımlar

Artan sıcaklık ve karbondioksit (CO₂) konsantrasyonunun, yabancı otların fizyolojisi, ekolojisi, yayılışı ve yönetimi üzerinde belirleyici etkiler oluşturduğu açık biçimde ortaya konmuştur. Mevcut bulgular, iklim değişikliği koşullarında yabancı otların; geniş ekolojik toleransları, yüksek uyum kapasiteleri ve hızlı adaptasyon yetenekleri sayesinde kltr bitkilerine kıyasla çevresel değişimlere daha etkili yanıtlar verebildiğini göstermektedir. Bu durum, yabancı ot–kltr bitkisi rekabetinin birçok üretim sisteminde yabancı otlar lehine değişmesine ve tarımsal üretimde yeni denge koşullarının ortaya çıkmasına yol açmaktadır. İklım değişikliği bağlamında yürütülen çalışmalar, sıcaklık ve CO₂ artışının yabancı otların çimlenme, büyüme ve fenolojik süreçlerini etkilediğini; aynı zamanda herbisit etkinliği ve dayanıklılık gelişimi üzerinde de önemli sonuçlar doğurduğunu ortaya koymaktadır. Ancak mevcut literatürün büyük ölçüde tek faktörlü, kısa süreli ve kontrollü koşullarda yürütülen çalışmalara dayandığı görülmektedir. Bu durum, elde edilen bulguların tarla koşullarına aktarılmasını zorlaştırmakta ve iklim değişikliğinin yabancı ot popülasyonları üzerindeki uzun vadeli etkilerinin yeterince anlaşılmasını sınırlamaktadır. Bu çerçevede, gelecekteki araştırmaların; sıcaklık, CO₂, yağış rejimleri ve ekstrem iklim olaylarını birlikte ele alan çok faktörlü deneysel tasarımlara yönelmesi gerekmektedir. Özellikle uzun dönemli ve çok yıllık tarla denemeleri, yabancı ot popülasyonlarının adaptif yanıtlarının, toprak tohum bankası dinamiklerinin ve genetik çeşitlilikteki değişimlerin daha sağlıklı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, istilacı yabancı ot türleri ile yerel türlerin iklim değişikliğine verdikleri tepkiler arasındaki farklılıkların ortaya konması, gelecekte yabancı ot florasında meydana gelebilecek değişimlerin daha doğru öngörülmesine katkı sunacaktır.

Sonuç olarak, iklim değişikliği koşullarında yabancı ot yönetimi yalnızca herbisit etkinliği ve dayanıklılık ekseninde değil, uzun vadeli sistem dayanıklılığını esas alan entegre ve iklıme duyarlı yaklaşımlar çerçevesinde ele

alınmalıdır. Karar destek sistemleri, tahmin modelleri ve erken uyarı mekanizmalarının geliştirilmesi; değişen çevresel koşullar altında yabancı otların daha etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesine katkı sağlayacaktır. Bu değerlendirme ve önerilerin, iklim değişikliğine uyumlu yabancı ot yönetim yaklaşımlarının geliştirilmesi ve gelecekteki araştırmalar için bütüncül bir çerçeve sunması beklenmektedir.

Kaynaklar

- Afzal, I., Akram, M., Javed, T., Ali, F., Kalaji, H. M., Wróbel, J., ... & Ahmed, M. A. (2022). Quantifying the germination response of *Parthenium hysterophorus* at various temperatures and water potentials by using population-based threshold model. *Frontiers in Plant Science*, 13, 961378.
- Alberto, A. M., Ziska, L. H., Cervancia, C. R., & Manalo, P. A. (1996). The influence of increasing carbon dioxide and temperature on competitive interactions between a C3 crop, rice (*Oryza sativa*) and a C4 weed (*Echinochloa glabrescens*). *Functional Plant Biology*, 23(6), 795-802.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for sustainable development*, 35(3), 869-890.
- Anwar, M. P., Islam, A. M., Yeasmin, S., Rashid, M. H., Juraimi, A. S., Ahmed, S., & Shrestha, A. (2021). Weeds and their responses to management efforts in a changing climate. *Agronomy*, 11(10), 1921.
- Bajwa, A. A., Chadha, A., & Grant, B. (2025). Are our weeds changing? A survey of stakeholders from the Australian grain production systems. *Weed Science*, 73(1), e40.
- Bozdoğan, O., Jabran, K., Tursun, N., & Karaman, Y. (2025). Effects of CO2 and temperature levels on glyphosate activity and growth of seven weed species. *Plant Protection Bulletin*, 65(1), 59-71.
- Fernando, N., Manalil, S., Florentine, S. K., Chauhan, B. S., & Seneweera, S. (2016). Glyphosate resistance of C3 and C4 weeds under rising atmospheric CO2. *Frontiers in plant science*, 7, 910.
- Ghazikhanlou Sani, Y., Yousefi, A. R., Jamshidi, K., Shekari, F., Gonzalez-Andujar, J. L., & Korres, N. E. (2023). Weed response to ALS-inhibitor herbicide (Sulfosulfuron+ metsulfuron methyl) under increased temperature and carbon dioxide. *Agronomy*, 13(8), 2084.
- Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., & Russell, G. (1981). Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, 213(4511), 957-966.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

- Kaur, R., Kumar, S., Ali, S. A., Kumar, S., Ezing, U. M., Bana, R., ... & Singh, T. (2024). Impacts of climate change on crop-weed dynamics: Challenges and strategies for weed management in a changing climate. *Open J. Environ. Biol*, 9, 015-021.
- Keller, J. A., & Shea, K. (2021). Warming and shifting phenology accelerate an invasive plant life cycle. *Ecology*, 102(1), e03219.
- Korres, N. E., Norsworthy, J. K., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T. K., Loka, D. A., Oosterhuis, D. M., ... & Palhano, M. (2016). Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 12.
- Kumar, V., Kumari, A., Price, A. J., Bana, R. S., Singh, V., & Bamboriya, S. D. (2023). Impact of futuristic climate variables on weed biology and herbicidal efficacy: A review. *Agronomy*, 13(2), 559.
- Kuo, C., Lindberg, C., & Thomson, D. J. (1990). Coherence established between atmospheric carbon dioxide and global temperature. *Nature*, 343(6260), 709-714.
- Leakey, A. D., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P., & Ort, D. R. (2009). Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of experimental botany*, 60(10), 2859-2876.
- Lee, J. S. (2011). Combined effect of elevated CO₂ and temperature on the growth and phenology of two annual C₃ and C₄ weedy species. *Agriculture, ecosystems & environment*, 140(3-4), 484-491.
- Mou, S. S., Haus, M. J., Hayden, Z. D., Patterson, E. L., & Saha, D. (2025). Climate-driven challenges in weed management for ornamental crop production in the United States: a review. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1556418.
- Nikolić, N., Ghirardelli, A., Schiavon, M., & Masin, R. (2023). Effects of the salinity-temperature interaction on seed germination and early seedling development: a comparative study of crop and weed species. *BMC Plant Biology*, 23(1), 446.
- Osaki, S., Wasaki, J., & Nakatsubo, T. (2022). Phenological shifts of the invasive annual weed *Bidens pilosa* var. *pilosa* in response to warmer temperature. *Plant Ecology*, 223(10), 1155-1165.
- Pacanoski, Z., & Mehmeti, A. (2023). Herbicides weed management in changing environmental conditions. *Acta agriculturae Slovenica*, 119(4), 1-11

- Peters, K., Breitsameter, L., & Gerowitt, B. (2014). Impact of climate change on weeds in agriculture: a review. *Agronomy for sustainable development*, 34(4), 707-721.
- Ramesh, K., Matloob, A., Aslam, F., Florentine, S. K., & Chauhan, B. S. (2017). Weeds in a changing climate: vulnerabilities, consequences, and implications for future weed management. *Frontiers in plant science*, 8, 95.
- Refatti, J. P., De Avila, L. A., Camargo, E. R., Ziska, L. H., Oliveira, C., Salas-Perez, R., ... & Roma-Burgos, N. (2019). High [CO₂] and temperature increase resistance to cyhalofop-butyl in multiple-resistant *Echinochloa colona*. *Frontiers in Plant Science*, 10, 529.
- Saravanane, P., Bajwa, A. A., Djanaguiraman, M., & Adkins, S. W. (2023). Biological response of invasive *Parthenium* weed to elevated concentration of atmospheric carbon dioxide and soil salinity. *Sustainability*, 15(2), 1025.
- Semeraro, T., Scarano, A., Leggieri, A., Calisi, A., & De Caroli, M. (2023). Impact of climate change on agroecosystems and potential adaptation strategies. *Land*, 12(6), 1117.
- Shabani, F., Ahmadi, M., Kumar, L., Solhjoui-fard, S., Tehrany, M. S., Shabani, F., ... & Esmaeili, A. (2020). Invasive weed species' threats to global biodiversity: Future scenarios of changes in the number of invasive species in a changing climate. *Ecological Indicators*, 116, 106436.
- Storkey, J., Mead, A., Addy, J., & MacDonald, A. J. (2021). Agricultural intensification and climate change have increased the threat from weeds. *Global change biology*, 27(11), 2416-2425.
- Tursun, N., Üremiş, İ., Bozdoğan, O., & Doğan, M. N. (2018). Sıcaklık ve CO₂ artışlarına bazı önemli yabancı otların verdikleri tepkilerin araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 34(3), 26-35.
- Umkulzhum, F., Aameena, M., Sussha, V. S., Renjan, B., Sreelekshmi, K., Sethulekshmi, V. S., & Shanavas, S. (2024). Weeds and their response to changing climate: A review. *International Journal of Environment and climate change*, 14(4), 768-779.
- Walck, J. L., Hidayati, S. N., Dixon, K. W., Thompson, K. E. N., & Poschlod, P. (2011). Climate change and plant regeneration from seed. *Global change biology*, 17(6), 2145-2161.
- Wang, D., Heckathorn, S. A., Wang, X., & Philpott, S. M. (2012). A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO₂. *Oecologia*, 169(1), 1-13.

- Wang, S., Ju, W., Peñuelas, J., Cescatti, A., Zhou, Y., Fu, Y., ... & Zhang, Y. (2019). Urban– rural gradients reveal joint control of elevated CO₂ and temperature on extended photosynthetic seasons. *Nature Ecology & Evolution*, 3(7), 1076-1085.
- Zeng, Q., Liu, B., Gilna, B., Zhang, Y., Zhu, C., Ma, H., ... & Zhu, J. (2011). Elevated CO₂ effects on nutrient competition between a C₃ crop (*Oryza sativa* L.) and a C₄ weed (*Echinochloa crusgalli* L.). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89(1), 93-104.
- Zheng, T., Yu, Y., & Kang, H. (2022). Short-term elevated temperature and CO₂ promote photosynthetic induction in the C₃ plant *Glycine max*, but not in the C₄ plant *Amaranthus tricolor*. *Functional Plant Biology*, 49(11), 995-1007.
- Ziska, L. H., Blumenthal, D. M., & Franks, S. J. (2019). Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Science and Management*, 12(2), 79-88.

5. Bölüm

Van İli Koşullarında A Sınıfı Buharlaşıma Kabından (Class-A Pan) Ölçülen Buharlaşımaya Dayalı ET_o Tahminlerinde Kullanılabilecek Pan Katsayılarının Belirlenmesi

Selçuk USTA¹

Özet

Dünyadaki mevcut su kaynaklarının doğru yönetimi ve geleceğe dönük kullanımlarının önceliklendirilmesi amacıyla yürütülen çalışmalarda temel veri olarak değerlendirilen referans evapotranspirasyon (ET_o), mikrometeorolojik yöntemler ile yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Ancak, bu yöntemlerin bitki, toprak ve iklim özelliklerine dayalı çok fazla sayıda parametreye ihtiyaç duymaları kullanımlarını kısıtlamaktadır. Bu yöntemlerin aksine, A sınıfı buharlaşma kabı (Class-A Pan) yönteminde açık su yüzeyinden gerçekleşen evaporasyon (buharlaşma) miktarı (E_p) yerel koşullarla uyumlu pan katsayısı (K_p) ile düzeltilerek, ET_o sadece bir parametreye bağlı olarak tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmada, Van ili koşulları ile uyumlu K_p katsayılarının belirlenmesi ve bu katsayıların günlük ortalama ET_o tahminlerindeki kullanılabilirlik düzeylerinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle, 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük iklim verileri kullanılarak FAO-56 Penman & Monteith (PM) eşitliği ile günlük ortalama ET_o değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, bu günlük ortalama ET_o değerleri Class-A Pan'dan ölçülen günlük E_p miktarlarına bölünerek 0.52 – 0.71 arasında değişen günlük K_p katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayıların günlük ET_o tahminlerindeki kullanılabilirlik düzeyleri 2021 ve 2022 yıllarına ait günlük iklim verileri ile E_p verileri kullanılarak test edilmiştir. Class-A Pan'dan ölçülen E_p miktarları sırasıyla 0.59 – 0.65 ve 0.57 – 0.67 aralıklarında değişen aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayıları ile düzeltilerek 1.89 – 10.79 mm gün⁻¹ ve 1.93 – 10.62 mm gün⁻¹ aralıklarında değişen ET_o değerleri tahmin edilmiştir. FAO-56 PM ile belirlenen ET_o değerleri ise 1.93 – 7.98 mm gün⁻¹ aralığında değişmiştir. Class-A Pan'a dayalı olarak tahmin edilen ET_o değerlerinin FAO-56 PM ile

¹ Doç. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Van Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü. susta@yyu.edu.tr
ORCID No: 0000-0001-8970-7333

belirlenen ET_o değerlerinden olan sapma miktarlarının bir göstergesi olarak hesaplanan ortalama mutlak göreceli hata oranı (MAPE) ve Nash–Sutcliffe katsayısı (NSE); aylık ortalama K_p katsayıları ile yapılan tahminler için sırasıyla %6.62 ve 0.89, on günlük ortalama K_p katsayıları ile yapılan tahminler için ise %6.20 ve 0.90 olarak belirlenmiştir. Van ili koşullarındaki günlük ortalama ET_o tahminlerinde on günlük ortalama K_p katsayılarının daha kullanılabilir ve güvenilir olduğunu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Class-A Pan, Evaporasyon, Güvenilirlik Analizi, Pan Katsayısı, Penman & Monteith, Referans Evapotranspirasyon.

1. Giriş

Yağışla yeryüzüne düşen suyun toprak ve su yüzeylerinden gerçekleşen buharlaşma ve bitki yüzeylerinden gerçekleşen terleme ile atmosfere geri iletilmesi süreci olarak tanımlanan evapotranspirasyon (ET); sulama programlarının hazırlanması, sulama ve drenaj sistemleri ile birlikte gölet ve barajların projelendirilmesi, yapımı ve işletilmesi, yağışın yüzey akışa geçen ve yer altı suyuna sızan miktarlarının belirlenmesi, havza yönetimi ve kuraklığın izlenmesi gibi hidroloji, meteoroloji ve sulama bilimleri kapsamında yürütülen birçok çalışmanın en önemli verisini oluşturmaktadır (Abudu ve ark, 2011; Jing ve ark., 2019; Uçak ve ark., 2016a).

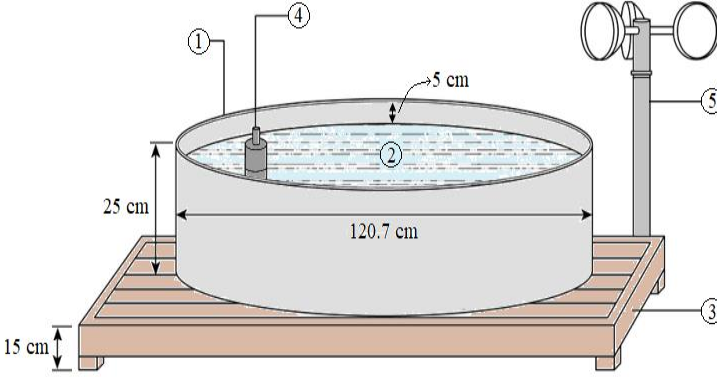
Bitki su tüketimi olarak da ifade edilen ET, hidrolojik döngünün en karmaşık ve doğrudan ölçülmesi en zor olan bileşenidir. ET, lizimetre sistemleri ile doğrudan ve en gerçekçi şekilde ölçülebilmektedir. Ancak, bu sistemlerin kurulum ve işletme giderlerinin çok yüksek olması ve ayrıca ölçme işlemlerinin çok fazla iş gücü ve zaman kullanımı gerektirmesi kullanımlarını kısıtlamaktadır (Abdulkareem ve ark., 2015). Bu nedenle, daha çok ET'nin referans evapotranspirasyona (ET_o) dayalı olarak tahmin edilmesi yoluna gidilmektedir ($ET = ET_o \times K_c$). Bu yöntemde ET_o bitkinin fizyolojisini, örtü derecesini ve yetiştirildiği yöreyi yansıtan bir bitki katsayısı (K_c) ile düzeltilerek ET yüksek doğrulukla tahmin edilmektedir (Allen ve ark. 1998). Ancak, burada ET_o 'ın hava sıcaklığı, oransal nem, rüzgar hızı, solar radyasyon ve topraktaki ısı akısı değişimi gibi iklim özelliklerine bağlı çok fazla sayıda parametreye dayalı olarak değişkenlik göstermesi ve bu doğrultuda ET_o 'ı tahmin etmek amacıyla geliştirilen ampirik yöntemlerin bu parametrelere ihtiyaç duyması ET_o tahminlerinde bir takım sorunlara neden olmaktadır. İklim özelliklerine bağlı bu parametreler daha çok şehir ve bölge merkezlerindeki meteoroloji yer gözlem istasyonları tarafından devamlı ve düzenli olarak ölçülebilmektedir. Tarımsal üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü kırsal bölgelerde ise bu parametrelerin bir çoğu devamlı ve düzenli olarak ölçülememektedir. Bu nedenle, veri temininde

sorunlar yaşanabilmektedir. İklim parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan cihazlarının üreticilerin satın alma gücünün çok üzerinde maliyetlere sahip olması da bir diğer sorunu oluşturmaktadır (Şarlak ve Bağcı, 2020).

ET_o , ampirik tahmin yöntemlerinden farklı olarak, A sınıfı buharlaşma kabı (Class-A Pan) yöntemi ile tek bir parametreye bağlı olarak tahmin edilebilmektedir. Bu yöntemde, buharlaşma kabı içerisinde bulunan suyun yüzeyinden belirli bir dönem (gün, hafta, ay) boyunca gerçekleşen buharlaşma (E_p) miktarı uygun pan katsayıları (K_p) ile düzeltilerek ($ET_o = E_p \times K_p$) aynı dönem boyunca gerçekleşen ET_o miktarı yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir (Allen ve ark., 1998). Bu yöntem, kullanılan tekniğin basitliği, düşük masraf ve uygulama kolaylığından dolayı dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kaya ve ark., 2016).

A sınıfı buharlaşma kabı (Class-A Pan) yönteminin, ET_o tahminlerinin yanı sıra göl, gölet ve baraj gibi su kütlelerinden gerçekleşen buharlaşma miktarlarının tahmin edilmesinde de başarılı bir şekilde kullanılabildiği yapılan çok sayıda çalışma ile ortaya koyulmuştur (Hounam, 1973; Abtew, 2001; Terzi, 2011; Benzaghta ve ark., 2012; Kaya ve ark., 2016; Uçak ve ark., 2016b).

Açık su yüzeylerinden gerçekleşen buharlaşmayı (E_p) ölçmek amacıyla kullanılan A sınıfı buharlaşma kabının (Class-A Pan) genel görünümü ve özellikleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Galvanizli çelik sac kullanılarak 120.70 cm çapında ve 25.00 cm yüksekliğindeki bir silindir formunda imal edilen buharlaşma kabının (1) içerisine, kap üst yüzeyinden 5 cm daha aşağıda olacak şekilde su (2) doldurulmaktadır. Buharlaşma kabı zemin yüzeyinden ortalama yüksekliği 15 cm olacak şekilde bir ahşap platformun üzerine yerleştirilmektedir (3). Buharlaşma (E_p) ölçümlerinde daha çok mikrometrelili derinlikölçer (4) kullanılmaktadır. Bazı durumlarda su seviyesine duyarlı sensörlerde kullanılabilmektedir. Buharlaşma kabı üzerindeki rüzgâr hızını ölçmek amacıyla ahşap platforma bir anemometre (5) monte edilebilmektedir (Yahaya ve ark., 2018; Alsumaiei, 2020).

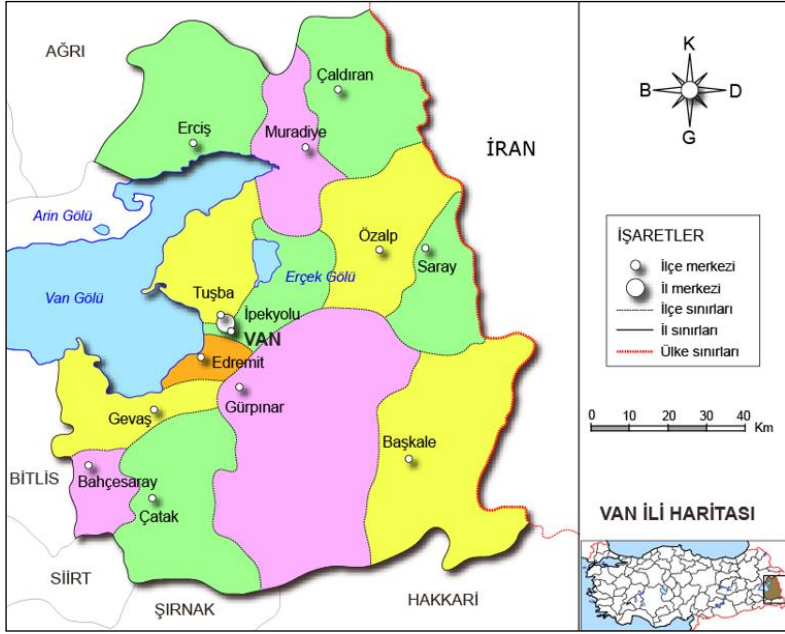


Şekil 1 A Sınıfı Buharlaşma Kabı (Class-A Pan)

A sınıfı buharlaşma kabından (Class-A Pan) ölçülen buharlaşma (E_p) miktarına dayalı referans evapotranspirasyon (ET_o) tahminlerinde kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeyi yüksek pan katsayılarına (K_p) ihtiyaç duyulmaktadır. Buradan yola çıkılarak Türkiye'nin yüksek tarımsal üretim potansiyeline sahip şehirlerinden biri olan Van koşullarında gerçekleştirilen bu çalışmada, yöre koşulları ile uyumlu K_p katsayılarının belirlenmesi ve bu katsayıların günlük ortalama ET_o tahminlerindeki kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeylerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Doğu Anadolu bölgesinin Yukarı Murat – Van bölümündeki Van Gölü kapalı havzası içerisinde bulunan Van ili, $37^{\circ} 43' - 39^{\circ} 26'$ kuzey enlemleri ile $42^{\circ} 40' - 44^{\circ} 30'$ doğu boylamları arasında yer almaktadır. Deniz seviyesine göre ortalama yüksekliği 1726 m olan ilin Türkiye haritası üzerindeki konumu Şekil 2'de gösterilmiştir (Anonim, 2025). İl genelinde yıllık ortalama günlük hava sıcaklığı 9.50°C , nem oranı %58.67, güneşlenme süresi $7.90 \text{ saat gün}^{-1}$, solar radyasyon yoğunluğu $15.32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ gün}^{-1}$ ve yıllık toplam yağış miktarı 395.10 mm düzeyindedir (DMİ, 2025).



Şekil 2. Van İlinin Türkiye Haritası Üzerindeki Konumu

Van ili iklim ve çevre koşulları ile uyumlu A sınıfı buharlaşma kabı (Class-A Pan) pan katsayılarını (K_p) belirlemek amacıyla yürütülen bu çalışmada, öncelikle 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük ortalama hava sıcaklığı (T), oransal nem (RH), solar radyasyon (R_s) ve zeminden 2 m yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı (U_2) verilerinin sekiz yıllık ortalamaları kullanılarak FAO-56 Penman & Monteith (PM) eşitliği ile günlük ortalama referans evapotranspirasyon (ET_o) değerleri belirlenmiştir (Eşitlik 1). Daha sonra, bu ET_o değerleri 2012 – 2020 yılları arasında A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen günlük buharlaşma (E_p) miktarlarının sekiz yıllık ortalamalarına oranlanarak günlük K_p katsayıları belirlenmiştir (Eşitlik 2).

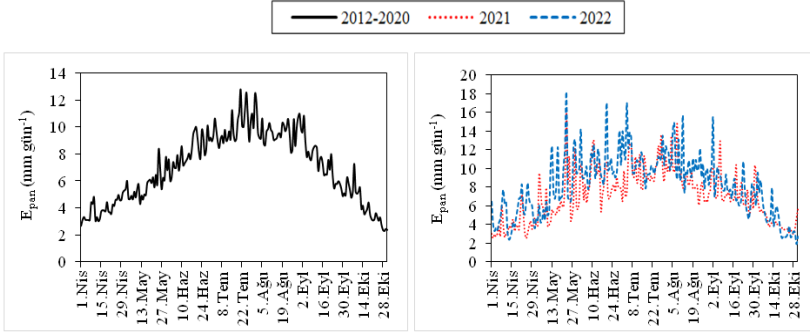
$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \left(\frac{900}{T + 273} \right) \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times U_2)} \quad (1)$$

$$ET_o = E_p \times K_p \quad K_p = \frac{ET_o}{E_p} \quad (2)$$

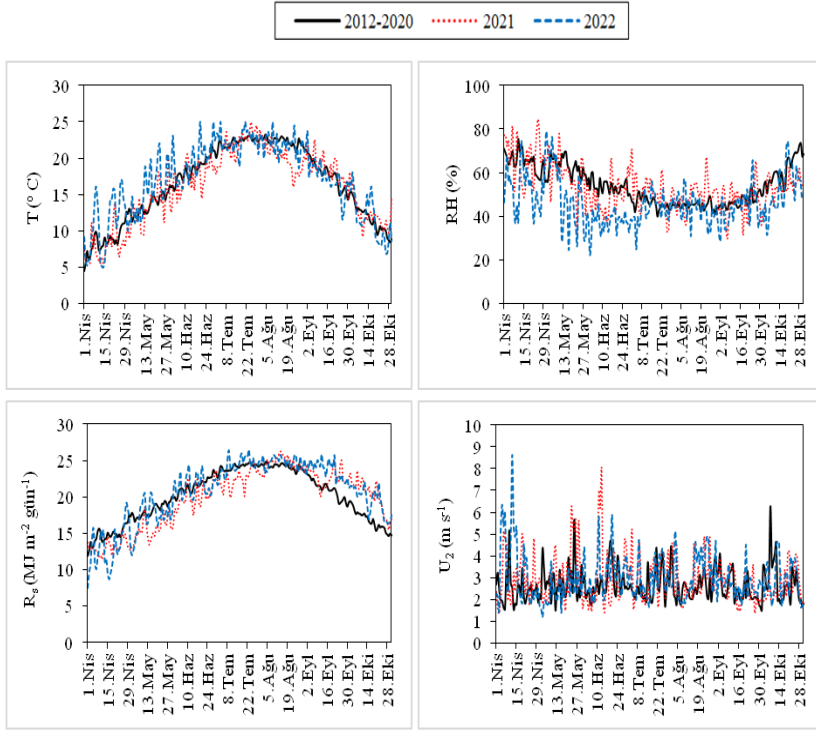
Eşitliklerde; ET_o , günlük ortalama referans evapotranspirasyon miktarı ($mm\ gün^{-1}$); Δ , doygun buhar basıncı eğrisinin eğimi ($kPa\ ^\circ C^{-1}$); R_n , bitki yüzeylerine etki eden günlük ortalama net radyasyon ($MJ\ m^{-2}\ gün^{-1}$); G , günlük ortalama topraktaki ısı akısı değişimi ($MJ\ m^{-2}\ gün^{-1}$); γ , psikometrik sabit ($kPa\ ^\circ C^{-1}$); T , günlük ortalama ortalama hava sıcaklığı ($^\circ C$); U_2 , zemin yüzeyinden 2 m yükseklikte ölçülen günlük ortalama rüzgâr hızı ($m\ s^{-1}$); e_s ve e_a , sırasıyla

doymun ve gerçek buhar basınçları (kPa); E_p , A sınıfı buharlaşma kabından (Class-A Pan) gerçekleşen günlük buharlaşma miktarı (mm gün^{-1}) ve K_p , pan katsayısını ifade etmektedir (Allen ve ark., 1998).

Uzun yıllar ortalama (2012 – 2020) günlük iklim verileri ile E_p verileri kullanılarak belirlenen günlük K_p katsayılarının günlük ortalama ET_o tahminlerindeki kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeyleri 2021 ve 2022 yıllarına ait günlük iklim verileri ile E_p verileri kullanılarak test edilmiştir. Bu kapsamda çalışmanın yürütüldüğü Nisan – Ekim dönemi için belirlenen aylık ortalama K_p ve on günlük ortalama K_p katsayıları için ayrı değerlendirmeler yapılmıştır. Öncelikle 2021 ve 2022 yıllarına ait iklim verileri kullanılarak FAO-56 PM eşitliği aracılığıyla günlük ortalama ET_o değerleri belirlenmiştir. Bu değerler çalışma kapsamında gerçek ET_o değerleri olarak kabul edilmiştir. Daha sonra 2021 ve 2022 yıllarına ait günlük E_p miktarları sırasıyla aylık ortalama K_p ve on günlük ortalama K_p katsayıları ile düzeltilerek ayrı ayrı günlük ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir (Eşitlik 2). ET_o ve K_p hesaplamalarında kullanılmak üzere Van Meteoroloji Bölge Müdürlüğü Edremit yer gözlem istasyonundan temin günlük iklim verileri ile E_p verileri Şekil 3 ve Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 3. Class-A Pan Günlük Buharlaşma (E_p) Miktarları



Şekil 4. Günlük İklim Verileri

Aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayıları kullanılıp A sınıfı buharlaşma kabından (Class-A Pan) gerçekleşen günlük E_p miktarlarına bağlı olarak tahmin edilen günlük ortalama ET_0 değerleri, standart FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen günlük ortalama gerçek ET_0 değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kriterleri olarak; ortalama mutlak hata (Eşitlik 3), ortalama mutlak göreceli hata oranı (Eşitlik 4), karekök ortalama karesel hata (Eşitlik 5) ve Nash–Sutcliffe etkinlik katsayısı (Eşitlik 6) istatistiksel ölçütleri dikkate alınmıştır. A sınıfı buharlaşma kabından gerçekleşen günlük E_p miktarlarının aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayıları ile çarpılarak düzeltilmesi sonucunda tahmin edilen günlük ortalama ET_0 değerleri ile standart FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen günlük ortalama gerçek ET_0 değerleri arasındaki istatistiksel ilişki düzeyini ortaya koymak amacıyla, Microsoft Excel programı kullanılarak regresyon analizi (Eşitlik 7) ve %95 güven aralığında bağımsız örneklem T Testi uygulanmıştır. Sonuçlar regresyon katsayısı (R^2) ve T Testi anlamlılık değerine (P) göre yorumlanmıştır (Nash ve Sutcliffe, 1970; Lewis, 1982).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X - Y_i| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{-Y_i}{X} \right| \times 100 \quad (4)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

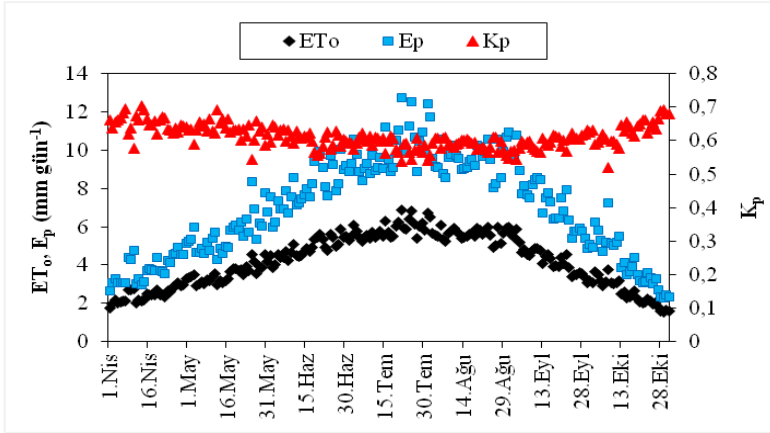
Eşitliklerde; MAE, ortalama mutlak hata (mm gün⁻¹); MAPE, ortalama mutlak göreceli hata oranı (%); RMSE, karekök ortalama karesel hata (mm gün⁻¹); NSE, Nash–Sutcliffe etkinlik katsayısı; X_i ve Y_i, sırasıyla gerçek ve tahmini günlük ET_o değerleri (mm gün⁻¹); R², regresyon katsayısı, $\bar{X}$, günlük ortalama gerçek ET_o değerlerinin ortalaması (mm gün⁻¹) ve n, gözlem sayısını ifade etmektedir. Bu çalışma, Van ili genelindeki tarımsal amaçlı bitkisel üretim faaliyetleri kapsamında ağırlıklı olarak yetiştiriciliği yapılan bitkilerin ekim-dikim zamanları ile büyüme mevsimi uzunlukları dikkate alınarak Nisan – Ekim dönemi (n= 215 gün) için yürütülmüştür.

Aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayıları kullanılıp E_p miktarlarına bağlı olarak tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerlerinin doğruluk düzeyleri MAPE ve NSE yaklaşımlarına göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tahmini günlük ET_o değerlerinin doğruluk düzeyleri MAPE yaklaşımına göre; MAPE < %10 ise “çok iyi”, MAPE %10 – 20 aralığında ise “iyi”, MAPE %20 – 50 aralığında ise “kabul edilebilir” ve MAPE > %50 ise “uyumsuz” olarak değerlendirilmiştir. NSE yaklaşımına göre ise; NSE > 0.75 ise “iyi”, NSE 0.36 – 0.75 aralığında ise “kabul edilebilir” ve NSE < 0.36 ise “uyumsuz” olarak değerlendirilmiştir. %95 Güven aralığında gerçekleştirilen bağımsız örneklem T Testi sonucunda elde edilen anlamlılık değerinin (P) %5’den büyük (P>0.05) olması durumunda, tahmini ve gerçek günlük ortalama ET_o değerlerinin oluşturduğu veri gruplarının ortalamaları arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı (önemli) bulunmamıştır. Bu durumda A sınıfı buharlaşma kabına dayalı olarak tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerlerinin gerçek ET_o değerleri yerine kullanılabileceği öngörülmüştür. Anlamlılık değerinin (P) %5’den küçük (P<0.05) olması durumunda ise tahmini ve gerçek günlük ET_o değerlerinin oluşturduğu veri gruplarının ortalamaları arasındaki fark anlamlı (önemli) bulunmuştur. Bu durumda A sınıfı buharlaşma kabına dayalı olarak tahmin edilen ET_o değerleri ile FAO-56 PM eşitliği

kullanılarak belirlenen gerçek ET_o değerlerinin uyumsuz olduğu ve birbirlerinin yerine kullanılamayacağı öngörülmüştür (De Myttenaere ve ark., 2016; Lufi ve ark., 2020).

3. Bulgular ve Tartışma

Öncelikle meteoroloji yer gözlem istasyonu tarafından 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük T, RH, R_s ve U_2 iklim verilerinin sekiz yıllık ortalamaları kullanılarak FAO-56 PM eşitliği aracılığıyla günlük ortalama ET_o değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu ET_o değerleri 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük toplam E_p değerlerinin sekiz yıllık ortalamalarına oranlanarak günlük K_p katsayıları elde edilmiştir (Şekil 5). Nisan – Ekim dönemi için belirlenen uzun yıllar ortalama günlük ET_o değerleri $1.59 - 6.90$ mm gün⁻¹ aralığında değişmiştir. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o değeri ise 4.21 mm gün⁻¹ olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde uzun yıllar ortalama günlük E_p miktarları $2.29 - 12.77$ mm gün⁻¹ aralığında değerler almıştır. Nisan – Ekim dönemi ortalama E_p değeri ise 6.98 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. Günlük ET_o ve E_p değerleri birbirine oranlanarak $0.52 - 0.71$ arasında değişen günlük K_p katsayıları elde edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: Günlük ET_o , E_p Değerleri ve K_p Katsayıları (2012 – 2020)

Nisan – Ekim dönemi için belirlenen günlük K_p katsayılarının aylık ortalama ve on günlük ortalama değerleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. Sıcaklığın maksimum seviyelere yükseldiği Temmuz ayında aylık ortalama ET_o ve E_{pan} sırasıyla 5.87 mm gün⁻¹ ve 10.02 mm gün⁻¹ ile en yüksek düzeylere ulaşmıştır. Temmuz ayı ortalama K_p katsayısı 0.59 olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın minimum seviyelere gerilediği Nisan ayında aylık ortalama ET_o ve

E_{pan} sırasıyla 2.50 mm gün⁻¹ ve 3.84 mm gün⁻¹ ile en düşük düzeylere gerilemiştir. Aylık ortalama K_p ise 0.65 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Aylık Ortalama K_p Katsayıları

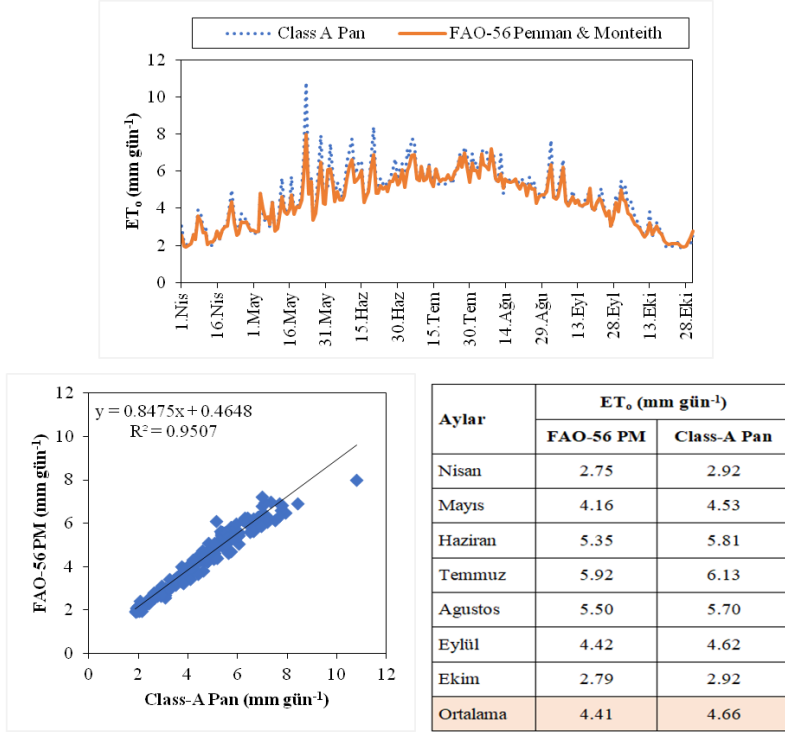
Aylar	ET_o (mm gün ⁻¹)	E_p (mm gün ⁻¹)	K_p
Nisan	2.50	3.84	0.65
Mayıs	3.57	5.67	0.63
Haziran	4.91	8.11	0.61
Temmuz	5.87	10.02	0.59
Ağustos	5.68	9.67	0.59
Eylül	4.36	7.36	0.60
Ekim	2.56	4.12	0.62

Tablo 2. On Günlük Ortalama K_p Katsayıları

Aylar	ET_o (mm gün ⁻¹)	E_p (mm gün ⁻¹)	K_p
1 – 10 Nisan	2.27	3.51	0.65
11 – 20 Nisan	2.38	3.59	0.67
21 – 30 Nisan	2.83	4.41	0.64
1 – 10 Mayıs	3.24	5.09	0.64
11 – 20 Mayıs	3.44	5.33	0.65
21 – 31 Mayıs	3.99	6.50	0.62
1 – 10 Haziran	4.46	7.20	0.62
11 – 20 Haziran	4.94	8.28	0.60
21 – 30 Haziran	5.32	8.85	0.60
1 – 10 Temmuz	5.58	9.31	0.60
11 – 20 Temmuz	5.78	9.73	0.60
21 – 31 Temmuz	6.23	10.92	0.57
1 – 10 Ağustos	5.76	9.75	0.59
11 – 20 Ağustos	5.66	9.53	0.59
21 – 31 Ağustos	5.62	9.72	0.58
1 – 10 Eylül	5.05	8.71	0.58
11 – 20 Eylül	4.35	7.34	0.60
21 – 30 Eylül	3.66	6.03	0.61
1 – 10 Ekim	3.28	5.49	0.60
11 – 20 Ekim	2.56	4.11	0.63
21 – 30 Ekim	1.91	2.88	0.66

Aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayılarının günlük ortalama ET_o tahminlerindeki kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeyleri 2021 ve 2022 yıllarına

ait günlük iklim verileri ile günlük E_p verilerinin iki yıllık ortalama değerleri kullanılarak test edilmiştir. Aylık ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Aylık Ortalama K_p Katsayıları Kullanılarak Tahmin Edilen Günlük Ortalama ET_o değerleri

FAO-56 PM eşitliği kullanılarak iki yıllık ortalama (2021 – 2022) günlük T , RH , R_s ve U_2 verileri ile yapılan hesaplamalarda $1.93 - 7.98 \text{ mm gün}^{-1}$ aralığında değişen günlük ET_o değerleri elde edilmiştir. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o değeri ise 4.41 mm gün^{-1} olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde iki yıllık ortalama (2021 – 2022) günlük E_p verilerinin aylık ortalama K_p katsayıları ile düzeltilmesi sonucunda $1.89 - 10.79 \text{ mm gün}^{-1}$ aralığında değişen günlük ET_o değerleri tahmin edilmiştir. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o ise 4.66 mm gün^{-1} olarak belirlenmiştir. A sınıfı buharlaşma kabından (Class-A Pan) gerçekleşen günlük E_p miktarlarının aylık ortalama K_p katsayıları ile düzeltilmesi sonucunda tahmin edilen ET_o değerlerinin FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen ET_o değerlerindeki değişimi açıklayabilme oranı $\%95.07$ ($R^2 = 0.9507$) olarak belirlenmiştir (Şekil 6). Aylık ortalama K_p katsayıları kullanılarak tahmin edilen ET_o değerleri ile FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen gerçek ET_o değerleri arasındaki sapmanın bir göstergesi olarak

hesaplanan MAE, MAPE ve RMSE hataları ile NSE katsayıları ve bağımsız örneklem T Testi sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Aylık Ortalama K_p katsayılarının Günlük Ortalama ET_o Tahminlerindeki Performans Analizi

Aylar	P	MAE (mm gün ⁻¹)	MAPE (%)	RMSE (mm gün ⁻¹)	NSE	Doğruluk	
						MAPE	NSE
Nisan	0.458	0.20	6.65	0.26	0.98	Çok iyi	İyi
Mayıs	0.403	0.44	8.78	0.72	0.61	Çok iyi	Kabul edi.
Haziran	0.095	0.53	9.47	0.64	0.69	Çok iyi	Kabul edi.
Temmuz	0.399	0.30	4.92	0.41	0.94	Çok iyi	İyi
Agustos	0.470	0.26	4.47	0.36	0.92	Çok iyi	İyi
Eylül	0.460	0.24	4.94	0.36	0.74	Çok iyi	Kabul edi.
Ekim	0.632	0.22	7.12	0.31	0.97	Çok iyi	İyi
Ort.	0.417	0.31	6.62	0.44	0.89	Çok İyi	İyi

MAPE doğruluk düzeyi yaklaşımına göre, aylık ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerlerinin Nisan – Ekim dönemi boyunca “çok iyi” (MAPE < %10) düzeyde doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Bu katsayılar kullanılarak %93.38 (MAE= 0.31 mm gün⁻¹, MAPE= %6.62, RMSE= 0.44 mm gün⁻¹) doğruluk oranına sahip günlük ortalama ET_o değerleri tahmin edilebileceği ortaya koyulmuştur. NSE doğruluk düzeyi yaklaşımına göre, aylık ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerlerinin doğruluk düzeyleri Mayıs, Haziran ve Eylül ayları için “kabul edilebilir” (NSE= %0.36 – 0.75), diğer aylar için ise “iyi” (NSE> 0.75) olarak belirlenmiştir. Aylık ortalama K_p katsayıları kullanılarak tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerleri ile FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen gerçek günlük ortalama ET_o değerlerinin oluşturduğu veri gruplarının ortalamaları arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($P>0.05$, n: 215). Bu sonuç, aylık ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen ET_o değerlerinin FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen gerçek ET_o değerleri yerine kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Tablo 3). Aylık ortalama K_p katsayıları kullanılarak tahmin edilen aylık toplam ET_o değerleri ile FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen aylık toplam gerçek ET_o değerleri ve bu değerler arasındaki sapmanın bir göstergesi olarak hesaplanan MAE ve MAPE hataları Tablo 4’de verilmiştir. FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen aylık toplam gerçek ET_o miktarları 82.58 – 183.62 mm arasında değişmiştir. Nisan – Ekim dönemi sezonluk toplam ET_o miktarı ise 945.19 mm olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde aylık ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen aylık toplam ET_o miktarları 87.45 – 190.08 mm arasında değerler

almıştır. Nisan – Ekim dönemi sezonluk toplam ET_o miktarı ise 997.85 mm olarak tahmin edilmiştir. MAPE doğruluk düzeyi yaklaşımına göre, aylık ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen aylık toplam ET_o miktarlarının %91.21 – 96.49 ($MAE = 4.05 - 14.05$ mm $gün^{-1}$, $MAPE = \%3.51 - 8.79$) arasında değişen oranlarda “çok iyi” ($MAPE < \%10$) düzeyde doğruluğa sahip olduğu görülmüştür (Tablo 4).

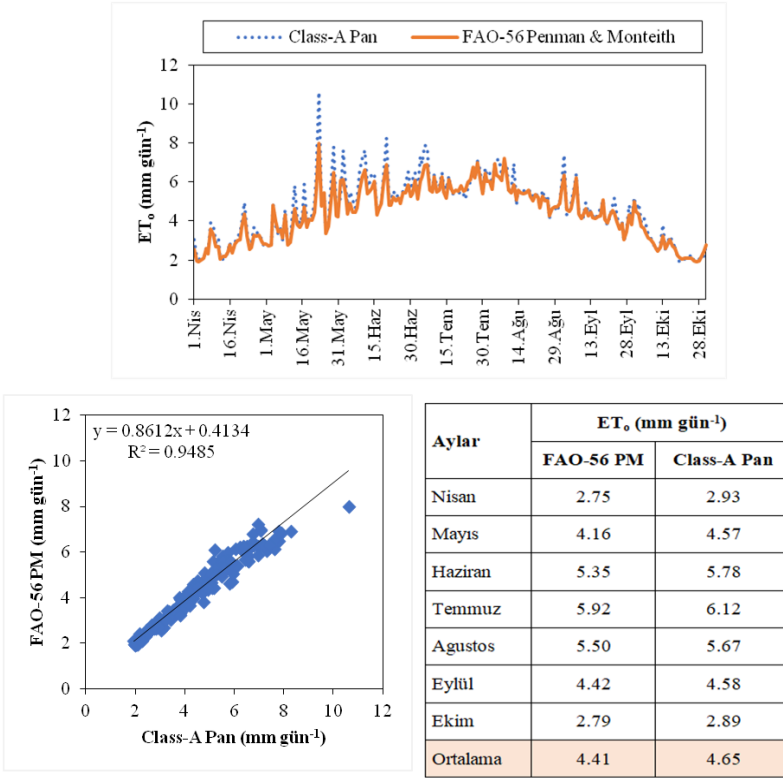
Aylık ortalama K_p katsayıları kullanılıp A sınıfı buharlaşma kabından (Class-A Pan) gerçekleşen günlük E_p miktarlarına dayalı olarak tahmin edilen aylık toplam ET_o miktarlarının olması gerekenden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, tahmini ve gerçek aylık toplam ET_o miktarları arasındaki farkların ($MAE = 4.05 - 14.05$ mm $gün^{-1}$) sulama mevsimi boyunca herhangi bir sulamada uygulanacak sulama suyu miktarından çok daha düşük olması tahmini ET_o değerlerinin yüksek düzeyde kullanılabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Aylık Ortalama K_p katsayılarının Aylık Toplam ET Tahminlerindeki Performans Analizi

Aylar	ET_o (mm $gün^{-1}$)		MAE (mm $gün^{-1}$)	MAPE (%)	Doğruluk düzeyi
	FAO-56 PM	Class-A Pan			
Nisan	82.58	87.45	4.87	5.89	Çok iyi
Mayıs	129.04	140.38	11.35	8.79	Çok iyi
Haziran	160.37	174.42	14.05	8.76	Çok iyi
Temmuz	183.62	190.08	6.46	3.52	Çok iyi
Agustos	170.59	176.57	5.98	3.51	Çok iyi
Eylül	132.64	138.56	5.92	4.46	Çok iyi
Ekim	86.34	90.39	4.05	4.69	Çok iyi
Toplam	945.19	997.85	52.66	5.57	Çok iyi

On günlük ortalama K_p katsayılarının günlük ET_o tahminlerindeki kullanılabilirlik düzeyini belirlemek amacıyla 2021 ve 2022 yıllarına ait günlük iklim verileri ile günlük E_p verilerinin iki yıllık ortalama değerleri kullanılarak yapılan testlerden elde edilen sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir. On günlük ortalama K_p katsayıları kullanılarak $1.93 - 10.62$ mm $gün^{-1}$ aralığında değişen günlük ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o değeri ise 4.65 mm $gün^{-1}$ olarak belirlenmiştir. A sınıfı buharlaşma kabından gerçekleşen günlük E_p miktarlarının on günlük ortalama K_p katsayıları ile düzeltilmesi sonucunda tahmin edilen günlük ET_o değerlerinin günlük gerçek ET_o değerlerindeki değişimi açıklayabilme oranı $\%94.85$ ($R^2 = 0.9485$) olarak belirlenmiştir (Şekil 7). On günlük ortalama K_p katsayıları

kullanılarak tahmin edilen ET_o değerleri ile FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen gerçek ET_o değerleri arasındaki sapmanın bir göstergesi olarak hesaplanan MAE, MAPE ve RMSE hataları ile NSE katsayıları ve bağımsız örneklem T Testi sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. MAPE doğruluk düzeyi yaklaşımına göre, on günlük ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerlerinin Nisan – Ekim dönemi boyunca “çok iyi” (MAPE < %10) düzeyde doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Bu katsayılar kullanılarak %93.73 (MAE= 0.29 mm gün⁻¹, MAPE= %6.27, RMSE= 0.42 mm gün⁻¹) doğruluk oranına sahip günlük ortalama ET_o değerleri tahmin edilebileceği ortaya koyulmuştur (Tablo 5).



Şekil 7. On Günlük Ortalama K_p Katsayıları Kullanılarak Tahmin Edilen Günlük Ortalama ET_o değerleri

NSE doğruluk düzeyi yaklaşımına göre, on günlük ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerlerinin doğruluk düzeyleri Mayıs ve Haziran ayları için “kabul edilebilir” (NSE= %0.36 – 0.75), diğer aylar için ise “iyi” (NSE> 0.75) olarak belirlenmiştir. On günlük ortalama K_p katsayıları

kullanılarak tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerleri ile FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen gerçek günlük ortalama ET_o değerlerinin oluşturduğu veri gruplarının ortalamaları arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($P>0.05$, n : 215). Bu sonuç, aylık ortalama K_p katsayılarında olduğu gibi on günlük ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen ET_o değerlerinin de FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen gerçek ET_o değerleri yerine kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Tablo 5). On günlük ortalama K_p katsayıları kullanılarak tahmin edilen aylık toplam ET_o değerleri ile FAO-56 PM eşitliği kullanılarak belirlenen aylık toplam gerçek ET_o değerleri ve bu değerler arasındaki sapmanın bir göstergesi olarak hesaplanan MAE ve MAPE hataları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 5. On Günlük Ortalama K_p katsayılarının Günlük Ortalama ET_o Tahminlerindeki Performans Analizi

Aylar	P	MAE (mm gün ⁻¹)	MAPE(%)	RMSE (mm gün ⁻¹)	NSE	Doğruluk	
						MAPE	NSE
Nisan	0.427	0.19	6.56	0.25	0.98	Çok iyi	İyi
Mayıs	0.362	0.44	9.13	0.71	0.62	Çok iyi	Kabul edi.
Haziran	0.119	0.49	8.78	0.62	0.71	Çok iyi	Kabul edi.
Temmuz	0.424	0.32	5.30	0.44	0.92	Çok iyi	İyi
Agustos	0.543	0.24	4.12	0.35	0.92	Çok iyi	İyi
Eylül	0.535	0.22	4.69	0.31	0.79	Çok iyi	İyi
Ekim	0.689	0.16	5.29	0.23	0.98	Çok iyi	İyi
Ort.	0.443	0.29	6.27	0.42	0.90	Çok İyi	İyi

On günlük ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen aylık toplam ET_o miktarları 87.72 – 189.80 mm arasında değişmiştir. Nisan – Ekim dönemi toplam ET_o 994.82 mm olarak tahmin edilmiştir. MAPE yaklaşımına göre, tahmini aylık toplam ET_o miktarlarının %90.53 – 97.04 (MAE= 3.20 – 13.05 mm gün⁻¹, MAPE= %2.96 – 9.47) arasında değişen oranlarda “çok iyi” (MAPE < %10) düzeyde doğruluğa sahip olduğu görülmüştür (Tablo 6).

Tablo 6. On Günlük Ortalama K_p katsayılarının Aylık Toplam ET_o Tahminlerindeki Performans Analizi

Aylar	ET_o (mm gün ⁻¹)		MAE (mm gün ⁻¹)	MAPE (%)	Doğruluk düzeyi
	FAO-56 PM	Class-A Pan			
Nisan	82.58	87.72	5.13	6.21	Çok iyi
Mayıs	129.04	141.26	12.22	9.47	Çok iyi
Haziran	160.37	173.42	13.05	8.14	Çok iyi
Temmuz	183.62	189.80	6.18	3.37	Çok iyi
Agustos	170.59	175.63	5.04	2.96	Çok iyi
Eylül	132.64	137.46	4.82	3.63	Çok iyi
Ekim	86.34	89.54	3.20	3.70	Çok iyi
Toplam	945.19	994.82	49.63	5.25	Çok iyi

Aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayıları günlük ortalama ET_o tahminlerinde birbirlerine çok yakın performanslar sergilemişlerdir. Ancak, on günlük ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen günlük ET_o değerlerinin aylık ortalama K_p katsayıları ile tahmin edilen günlük ET_o değerlerine göre daha düşük MAE, MAPE, RMSE hatalarına ve daha yüksek NSE ve P değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir (Tablo 7). Bu sonuç, günlük ortalama ET_o tahminlerinde on günlük ortalama K_p katsayılarının daha kullanılabilir ve güvenilir olduğunu ortaya koymuştur.

Tablo 7. Aylık Ortalama ve On Günlük Ortalama K_p katsayılarının Günlük Ortalama ET_o Tahminlerindeki Performanslarının Karşılaştırılması

Karşılaştırma kriteri	K_p	
	Aylık ortalama	On günlük ortalama
MAE (mm gün ⁻¹)	0.31	0.29
MAPE (%)	6.62	6.27
RMSE (mm gün ⁻¹)	0.44	0.42
NSE	0.89	0.90
R ²	0.95	0.95
P	0.42	0.44
MAPE doğruluk düzeyi	Çok iyi	Çok iyi
NSE doğruluk düzeyi	İyi	İyi

Van koşullarında gerçekleştirilen bu çalışmada FAO-56 PM eşitliği kullanılarak Nisan – Ekim dönemi için 2.75 – 5.92 mm gün⁻¹ arasında değişen aylık ortalama ET_o değerleri elde edilmiştir. A sınıfı buharlaşma kabına dayalı olarak tahmin edilen aylık ET_o değerleri ise 2.89 – 6.13 mm gün⁻¹ arasında

değişmiştir. Benzer şekilde, Van koşullarında aynı dönem için yürütülen bazı çalışmalarda; 2.91 – 5.85 mm gün⁻¹ (Usta ve ark., 2019) ve 2.96 – 5.54 mm gün⁻¹ (Saban Polu, 2021) arasında değişen aylık ortalama ET_o değerleri elde edilmiştir. Günlük ortalama ET_o tahminlerinde kullanılan ampirik modellerin farklı iklim ve çevre koşullarındaki kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeylerini test etmek amacıyla yürütülen bir çok çalışmada, en fazla tercih edilen benzerlik ölçütlerinin başında NSE gelmektedir (Başakın ve ark., 2023; Li ve ark., 2024; Satpathi ve ark., 2024). NSE etkinlik katsayısı en az 0.75 veya daha büyük olan tahmin modellerinin yüksek güvenilirlik düzeyine sahip olduğu belirtilmektedir (Lufi ve ark., 2020; Duc ve Sawada, 2023). Bununla birlikte Irmak ve Haman (2003) ile Moratiel ve ark. (2020) ampirik modeller kullanılarak tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerleri için kabul edilebilir MAE ve RMSE hata üst sınırları olarak sırasıyla 0.52 mm gün⁻¹ ve 0.50 mm gün⁻¹ değerlerini önermişlerdir.

Van ili iklim ve çevre özellikleri dikkate alınarak yürütülen bu çalışmada, A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen günlük E_p miktarlarının aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayıları ile düzeltilmesi sonucunda tahmin edilen günlük ortalama ET_o değerleri için belirlenen NSE katsayıları ile MAE ve MAPE hatalarının (Tablo 8) yukarıda belirtilen sınırlamalar (NSE > 0.75, MAE ≤ 0.52 mm gün⁻¹, RMSE ≤ 0.50 mm gün⁻¹) ile uyumlu olduğu görülmüştür. Van genelinde tarımsal amaçlı bitkisel üretim ve sulama faaliyetlerinin ağırlıklı olarak yürütüldüğü Nisan – Ekim dönemi için, bu çalışma kapsamında belirlenen aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayılarının yöre koşulları ile uyumlu olduğu ve A sınıfı buharlaşma kabından gerçekleşen E_p miktarına dayalı günlük ve aylık ortalama ET_o tahminlerinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Van ili koşullarında A sınıfı buharlaşma kabından (Class-A Pan) ölçülen buharlaşmaya (E_p) dayalı referans evapotranspirasyon (ET_o) tahminlerinde kullanılabilecek en uygun pan katsayılarının (K_p) belirlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük iklim verileri kullanılarak FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen günlük ET_o değerleri, aynı tarih aralığında Class-A Pan'dan ölçülen günlük E_p miktarlarına bölünerek 0.52 – 0.71 arasında değişen K_p katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayıların günlük ET_o tahminlerindeki kullanılabilirlik düzeyleri 2021 ve 2022 yıllarına ait iklim verileri ile E_p verileri kullanılarak test edilmiştir. Class-A Pan'dan ölçülen E_p miktarları sırasıyla 0.59 – 0.65 ve 0.57 – 0.67 aralıklarında değişen aylık ortalama ve on günlük ortalama K_p katsayıları ile düzeltilerek 1.89 – 10.79 mm

gün⁻¹ ve 1.93 – 10.62 mm gün⁻¹ aralıklarında değişen ET_o değerleri tahmin edilmiştir. FAO-56 PM ile belirlenen ET_o değerleri ise 1.93 – 7.98 mm gün⁻¹ aralığında değişmiştir. A sınıfı buharlaşma kabına dayalı olarak tahmin edilen günlük ET_o değerlerinin FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen günlük ET_o değerlerinden olan sapma miktarlarının bir göstergesi olarak hesaplanan MAE, MAPE ve NSE; aylık ortalama K_p katsayıları ile yapılan tahminler için sırasıyla 0.31 mm gün⁻¹, %6.62 ve 0.89, on günlük ortalama K_p katsayıları ile yapılan tahminler için ise 0.29 mm gün⁻¹, %6.20 ve 0.90 olarak belirlenmiştir. Van ili koşullarındaki günlük ortalama ET_o tahminlerinde on günlük ortalama K_p katsayılarının daha kullanılabilir ve güvenilir olduğunu sonucuna ulaşılmıştır. A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen buharlaşmaya dayalı referans evapotranspirasyon tahminlerinde, yerel koşullar ve zamana bağlı olarak değişkenlik gösteren iklim özelliklerini maksimum düzeyde temsil eden pan katsayılarının kullanılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- Abdulkareem, J. H., Abdulkadir, A., & Abdu, N. (2015). A review of different types of lysimeter used in solute transport studies. *International Journal of Plant & Soil Science*, 8(3), 1-14. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/18098>
- Abtew, W. (2001). Evaporation estimation for Lake Okeechobee in south Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127(3), 140-147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2001\)127:3\(140\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2001)127:3(140))
- Abudu, S., Cui, C., King, J. P., Moreno, J., & Bawazır, A. S. (2011). Modeling of daily pan evaporation using partial least squares regression. *Science China Tech. Sci.*, 54(1), 163-174. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4205-z>
- 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. <https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E00.htm> (erişim tarihi: 18 Temmuz 2023).
- Alsumaiei, A. A. (2020). Utility of artificial neural networks in modeling pan evaporation in hyperarid climates. *Water*, 12, 1508. <https://doi.org/10.3390/w12051508>
- Anonim (2025). Van İli Haritası. <https://static.milliyet.com.tr/others/image/harita/van-ili-haritasi.png> (erişim tarihi: 06.07.2025).
- Başakın, E. E., Ekmekcioğlu, Ö., Stoy, P. C., & Özger, M. (2023). Estimation of daily reference evapotranspiration by hybrid singular spectrum analysis-based stochastic gradient boosting. *MethodsX*, 10, 102163. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102163>
- Benzaghta, M. A., Mohammed, T. A., Ghazali, A. H., & Som, M. A. M. (2012). Prediction of evaporation in tropical climate using artificial neural network and climate based models. *Scientific Research and Essays*, 7(36), 3133-3148. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1311>
- De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., & Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing*, 192, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>
- DMİ, (2025). Van İli İklim Verileri. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara
- Duc, L., & Sawada, Y. (2023). A signal-processing-based interpretation of the Nash–Sutcliffe efficiency. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(9), 1827-1839. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1827-2023>

- Hounam, C. E. (1973). Comparison between pan and lake evaporation, Technical Note No. 126, World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland.
- Irmak, S., & Haman, D. Z. (2003). Evaluation of five methods for estimating class A pan evaporation in a humid climate. *HortTechnology*, 13(3), 500-508. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.13.3.0500>
- Jing, W., Yaseen, Z. M., Shahid, S., Saggi, M. K., Tao, H., Kisi, O., & Chau, K. W. (2019). Implementation of evolutionary computing models for reference evapotranspiration modeling: short review, assessment and possible future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 811-823. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1645045>
- Kaya, S., Evren, S., & Daşcı, E. (2016). Yarı-kurak iklim koşullarında A sınıfı kap buharlaşmasını tahmin için çeşitli eşitliklerin karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 30(2), 1-9.
- Lewis, C. D. (1982). Industrial and Business Forecasting Methods. London, England: Butterworths Publishing, 1982, pp. 40-142.
- Li, Z., Li, Y., Yu, X., Jia, G., Chen, P., Zheng, P., Wang, Y., & Ding, B. (2024). Applicability and improvement of different potential evapotranspiration models in different climate zones of China. *Ecological Processes*, 13, 20. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00488-7>
- Lufi, S., Ery, S., & Rispiningtati, R. (2020). Hydrological analysis of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) data in Lesti sub watershed. *Civil and Environmental Science Journal*, 3(1), 18-30. <https://doi.org/10.21776/ub.civense.2020.00301.3>
- Moratiel, R., Bravo, R., Saa, A., Tarquis, A. M., & Almorox, J. (2020). Estimation of evapotranspiration by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) Penman–Monteith temperature (PMT) and Hargreaves–Samani (HS) models under temporal and spatial criteria – a case study in Duero basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(3), 859-875. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-859-2020>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Saban Polu P. 2021. Using solar radiation data in calculation of reference evapotranspiration and Eastern Anatolia Region reference evapotranspiration frequency analysis. M.Sc. Thesis. Erciyes University.

- Satpathi, A., Danodia, A., Abed, S. A., Nain, A. S., Al-Ansari, N., Ranjan, R., Vishwakarna, D. K., Gacem, A., Mansour, L., & Yadav, K. K. (2024). Estimation of the crop evapotranspiration for Udham Singh Nagar district using modified Priestley-Taylor model and Landsat imagery. *Scientific Reports*, 14, 21463. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72299-x>
- Şarlak, N., & Bağçacı, S. Ç. (2020). Ampirik potansiyel evapotranspirasyon tahmin yöntemlerinin değerlendirilmesi: uygulama Konya kapalı havzası. *Teknik Dergi*, 31(1), 9755-9772. <https://doi.org/10.18400/tekderg.408019>
- Uçak, A. B., Oktem, A., Sezer, C., Cengiz, R., & Inal, B. (2016a). Determination of arid and temperature resistant sweet corn (*Zea mays saccharata* Sturt) lines. *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)*, 2(7), 79-88.
- Uçak, AB, Ayasan, T., & Turan, N. (2016b). Kısıtlı Sulama Uygulamalarının Silaj Mısırının Verimi, Kalitesi ve Su Kullanım Verimliliği Üzerindeki Etkisi. *Türk Tarım-Gıda Bilimi ve Teknolojisi Dergisi* , 4 (12), 1228-1239.
- Usta, S., Gençoğlu, S., Gençoğlu, C., & Uçak, A. B. (2019). Development of Hargreaves-Samani equation calibration models for Van province conditions. In: *Proceedings of the 1st Erciyes Agriculture, Animal & Food Sciences Conference*. 433–439.
- Yahaya, O., Smart, B., Omoakhlen, A. I., & Ehibor, O. G. (2018). Development and calibration of automated class A evaporimeter. *Hydrology: Current Research*, 9(3), 304. <https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000304>

6. Bölüm

Bazı Ampirik Evapotranspirasyon Tahmin Modellerinin Van Gölü Havzası Koşullarındaki Performanslarının Karşılaştırılması

Selçuk USTA¹

Özet

Bu çalışmada, hava sıcaklığı ve solar radyasyona bağlı olarak referans evapotranspirasyonun (ET_0) tahmin edilmesinde kullanılan Caprio, Irmak ve Tabari ampirik modellerinin Van Gölü havzası iklim ve çevre koşullarında karşılaştırılarak, kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Havza sınırları içerisindeki yerleşim yerlerinin 2013 ile 2020 yılları arasında ölçülen 8 yıllık aylık ortalama iklim verileri kullanılarak, Nisan – Ekim dönemi için yürütülen testlerde, standart FAO-56 Penman & Monteith (PM) eşitliği ile hesaplanan aylık ortalama ET_0 değerleri gerçek değerler olarak kabul edilmiştir. FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen ve modellerle tahmin edilen ET_0 değerlerinin karşılaştırılmasında ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) doğrulama ölçütlerinden faydalanılmıştır. Van Gölü havzası geneli için yapılan değerlendirmelere göre, 2.13 – 4.79 mm gün⁻¹ aralığında değişen gerçek ET_0 değerlerine en yakın tahminler Irmak modeli ile yapılmıştır. Bu model kullanılarak %87.89 oranı ile (MAE= 0.43 mm gün⁻¹, MAPE= %12.11) “iyi” düzeyde (%10 ≤ MAPE < %20) doğruluğu sahip 1.81 – 4.31 mm gün⁻¹ aralığında değişen aylık ortalama ET_0 değerleri tahmin edilmiştir. Tabari ve Caprio modelleri havza genelinde Irmak modeline göre daha düşük performanslar sergilemişlerdir. Bu modeller kullanılarak tahmin edilen aylık ortalama ET_0 değerlerinin MAPE yaklaşımına göre doğruluk düzeyleri sırasıyla %81.02 (MAE= 0.70 mm gün⁻¹, MAPE= %18.98) ve %78.14 (MAE= 0.64 mm gün⁻¹, MAPE= %21.86) olarak belirlenmiştir. Van Gölü havzası koşullarında standart FAO-56 PM eşitliği için gerekli olan iklim verilerinin tamamının ölçülemediği ya da temin edilemediği durumlarda, Irmak modelinin iyi bir alternatif olacağı ve kalibrasyona gerek kalmadan havza koşullarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Ampirik Model, Evapotranspirasyon, FAO-56 Penman & Monteith, Performans Analizi, Van Gölü Havzası

¹ Doç. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Van Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü. susta@yyu.edu.tr
ORCID No: 0000-0001-8970-7333

1. Giriş

Yeryüzündeki mevcut suyun toprak ve su yüzeylerinden gerçekleşen buharlaşma (E) ve bitki yaprak yüzeylerinden gerçekleşen terleme (T) yolu ile atmosfere salınması süreci olarak tanımlanan evapotranspirasyon (ET); sulama yönetimi, su dengesi tahmini, yüzey akışı tahmini, yeraltı suyu seviyesi tahmini, su stresi değerlendirmesi, kuraklığın izlenmesi, rezervuar yönetimi, günlük akış modellemesi ve iklim değişikliği etki değerlendirmesi gibi alanlarda çok önemli bir rol oynamaktadır (Muhammad ve ark., 2019; Uçak ve ark., 2016). ET, lizimetre sistemleri kullanılarak en doğru ve güvenilir bir biçimde ölçülebilmektedir. Ancak bu sistemlerinin kurulum, işletme ve bakım giderleri çok yüksek, ölçme işlemleri ise zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle, hidrolojik çalışmalarda ET'nin doğrudan ölçülmesi yerine bitki, toprak ve iklim özelliklerine dayalı çok sayıda parametre kullanılarak tahmin edilmesi yolu daha fazla tercih edilmektedir (Karaca ve ark., 2017).

ET tahminlerinde en yaygın kabul gören ve tercih edilen yöntem, referans evapotranspirasyonun (ET_0) ölçülmesidir (Gocić ve Trajković, 2014). Ancak, ET_0 miktarının doğrudan ölçülmesi pahalı ve zaman alıcı olmakla birlikte, kendi içerisinde çok önemli belirsizlikler barındırmaktadır. Bu nedenle, bitki, toprak ve iklim özelliklerine dayalı çok fazla sayıda parametreye bağlı olarak gerçekleşen ET_0 miktarını tahmin etmek amacıyla, hava sıcaklığı ve solar radyasyon gibi kolay ölçülebilen, tahmin edilebilen yada temin edilebilen daha az sayıda parametre kullanımı gerektiren çok fazla sayıda tahmin modeli geliştirilmiştir (Makkink, 1957; Blaney ve Criddle, 1962; Jensen ve Haise, 1963; Schendel, 1967; Priestley ve Taylor, 1972; Caprio, 1974; Hargreaves ve Samani, 1985; Abtew, 1996). Ancak bu ampirik modellerin geliştirilmiş oldukları yöre koşulları ile uyumlu olmaları, farklı iklim ve çevre koşullarına sahip bölgelerde kullanılmaları durumunda güvenilirlik düzeylerinin test edilmesini ve gerekiyorsa kalibrasyonlarının yapılmasını zorunlu hale getirmektedir (Izadifar ve Elshorbagy, 2010).

Bu çalışmada, hava sıcaklığı ve solar radyasyon parametrelerine dayalı olarak ET_0 miktarının tahmin edilmesinde kullanılan Caprio (Caprio, 1974), Irmak (Irmak ve ark., 2003) ve Tabari (Tabari ve ark., (2013) modellerinin Van Gölü kapalı havzası koşullarındaki kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Havza sınırları içerisinde bulunan yerleşim yerlerindeki nüfusun büyük bir çoğunluğunun geçim kaynağını tarım ve hayvancılık faaliyetleri oluşturmaktadır. Bununla birlikte Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarına göre Van Gölü havzasının da içerisinde bulunduğu Doğu Anadolu bölgesinde ciddi iklim değişikliği etkilerinin gözlemlendiği ve bölgenin kuraklık riski altında olduğu vurgulanmıştır (IPCC, 2013). Bu nedenle çalışma alanı olarak Van Gölü havzası seçilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçların havzadaki sulama

faaliyetleri kapsamında hazırlanacak sulama programları (Uçak ve ark., 2024) ile kuraklık eylem planı çalışmalarında faydalı olacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Van Gölü havzası, Doğu Anadolu Bölgesi'nin doğusunda Van Gölü'ne sularını döken akarsuların oluşturduğu bir kapalı havzadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nin güney-güneydoğusunda konumlanan Van Gölü, Bitlis ili sınırları içerisinde bulunan Nemrut volkanik dağı'nın patlaması sonucu, bölgedeki tektonik çöküntü alanının önünün kapanmasıyla oluşmuş bir volkanik set gölüdür. Etrafı yüksek dağlar ve platolarla çevrili olan ve sularını çevre denizlere gönderemeyen bu göle sularını döken akarsuların oluşturduğu Van Gölü havzası, Konya havzasından sonra Türkiye'nin ikinci büyük içe akışlı (kapalı) havzasıdır. Van Gölü Havzası 37°55' – 39°24' kuzey (N) enlemleri ile 42°05' – 44°22' doğu (E) boylamları arasında yer almaktadır. Toplam yüz ölçümü 29.437 km² olan havzanın sınırları içerisinde Van ili merkezi ve bu ile bağlı Bahçesaray, Başkale, Çaldıran, Çatak, Erciş, Gevaş, Gürpınar, Muradiye, Özalp ve Saray ilçeleri ile birlikte Bitlis ilinin Tatvan, Ahlat ve Adilcevaz ilçeleri yer almaktadır. Van, Bitlis ve Ağrı illerinin toplam yüz ölçümlerinin sırasıyla %62'si, %34'ü ve %1.8'i Van Gölü havzası sınırları içerisinde bulunmaktadır. Havzanın yıllık toplam yağış yüksekliği 474 mm düzeyindedir. Türkiye haritası üzerindeki konumu ve sınırları Şekil 1'de gösterilen Van Gölü kapalı havzasında bulunan yerleşim yerlerinin enlem, boylam ve rakımları Tablo 1'de verilmiştir (Çiftçi ve ark., 2008; Anonim, 2020; Kale ve Duman, 2024).



Şekil 1. Van Gölü Kapalı Havzası

Tablo 1. Van Gölü Havzasındaki İl ve İlçelerin Enlem, Boyam ve Rakımları

Yerleşim yeri	Enlem (°N)	Boylam (°E)	Rakım (m)
Adilcevaz	38.8058	42.7764	1682
Ahlat	38.7528	42.4944	1711
Bahçesaray	38.1266	42.8059	1653
Başkale	38.0403	44.0157	2323
Çaldıran	39.1728	43.9139	2043
Çatak	38.0086	43.0597	1498
Erciş	39.0311	43.3597	1685
Gevaş	38.2922	43.1055	1682
Gürpınar	38.3217	43.3913	1747
Muradiye	38.9898	43.7681	1710
Özalp	38.6532	43.9880	1997
Saray	38.6442	44.1701	2093
Tatvan	38.5022	42.2814	1664
Van	38.4854	43.3730	1725

Van Gölü havzası sınırları içerisinde yer alan il ve ilçelerin 2013 ve 2020 yılları arasında ölçülen günlük maksimum, minimum ve ortalama hava sıcaklıkları ($T_{\max}$, $T_{\min}$, T), oransal nem (RH), zemin yüzeyinden 2 m yükseklikteki rüzgâr hızı (U_2), günlük güneşlenme süresi (n) ve solar radyasyon (R_s) verilerinin 8 yıllık aylık ortalama değerleri bu çalışmanın materyalini oluşturmuştur. Çalışma, havzada yetiştirilen tarımsal ürünlerin büyüme mevsimleri dikkate alınarak Nisan – Ekim dönemi için yürütülmüştür. Havzadaki il ve ilçelere ait T ve n verilerinin 8 yıllık aylık ortalamaları sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3’de verilmiştir (DMİ, 2025). R_s verileri ise Angström & Prescott (AP) modeli kullanılıp, enlem ve zamana bağlı olarak yerleşim yeri bazında tahmin edilmiştir (Allen ve ark., 1998).

Tablo 2. Van Gölü Havzası Günlük Ortalama Hava Sıcaklıkları

Yerleşim yeri	T (°C)							
	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Ort.
Adilcevaz	7.50	12.10	17.24	21.00	20.50	16.50	10.50	15.00
Ahlat	7.20	12.00	17.12	20.50	21.00	16.00	10.00	14.79
Bahçesaray	8.80	13.70	19.10	23.70	23.50	19.10	12.40	17.20
Başkale	4.80	9.90	15.30	19.60	19.50	15.40	8.50	13.30
Çaldıran	5.50	10.90	16.00	20.30	20.20	15.60	8.40	13.80
Çatak	9.80	14.30	19.10	23.00	22.60	18.70	12.70	17.20
Erciş	7.10	12.30	17.70	21.80	21.20	16.20	9.70	15.10
Gevaş	8.10	12.80	17.70	21.60	21.10	16.90	10.60	15.60
Gürpınar	8.50	13.60	18.70	22.70	22.30	17.90	10.90	16.40
Muradiye	7.70	13.00	18.50	23.00	22.60	17.50	10.80	16.16
Özalp	5.80	11.00	16.20	20.70	20.40	15.30	8.50	14.00
Saray	5.70	11.20	16.70	21.00	21.20	16.80	9.70	14.60
Tatvan	6.50	11.50	17.00	21.00	21.00	16.50	10.00	14.80
Van	8.20	13.20	18.50	22.60	22.40	18.10	11.20	16.30

Tablo 3. Van Gölü Havzası Günlük Ortalama Güneşlenme Süreleri

Yerleşim yeri	n (saat)							
	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Ort.
Adilcevaz	3.90	5.30	6.70	7.90	7.80	6.60	4.80	6.20
Ahlat	3.80	5.30	6.70	7.70	7.90	6.40	4.70	6.10
Bahçesaray	4.30	5.80	7.30	8.70	8.60	7.30	5.40	6.80
Başkale	3.20	4.60	6.20	7.50	7.50	6.30	4.30	5.60
Çaldıran	3.40	4.90	6.40	7.70	7.70	6.30	4.20	5.80
Çatak	4.60	5.90	7.30	8.50	8.40	7.20	5.50	6.80
Erciş	3.80	5.30	6.90	8.10	8.00	6.50	4.60	6.20
Gevaş	4.10	5.50	6.90	8.00	7.90	6.70	4.90	6.30
Gürpınar	4.20	5.70	7.20	8.40	8.30	7.00	4.90	6.50
Muradiye	4.00	5.60	7.20	8.50	8.30	6.90	4.90	6.50
Özalp	3.50	5.00	6.50	7.80	7.70	6.20	4.30	5.80
Saray	3.40	5.00	6.60	7.90	7.90	6.70	4.60	6.00
Tatvan	3.70	5.10	6.70	7.90	7.90	6.60	4.70	6.00
Van	4.20	5.60	7.20	8.30	8.30	7.00	5.00	6.50

Giriş değişkenleri olarak T ve R_s verilerinin kullanıldığı ampirik Caprio, Irmak ve Tabari referans evapotranspirasyon (ET_o) tahmin modellerinin Van Gölü havzası iklim ve çevre koşulları altındaki kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeylerinin belirlenmesi amacıyla yapılan karşılaştırmalarda, standart FAO-56 Penman & Monteith (PM) eşitliği karşılaştırma kriteri olarak dikkate alınmıştır (Eşitlik 1). Bu eşitliğe dayalı CROPWAT yazılımı ile hesaplanan aylık ortalama ET_o değerleri gerçek değerler olarak kabul edilmiştir (Allen ve ark., 1998; FAO, 2023).

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

Standart FAO-56 Penman & Monteith eşitliğinde; ET_o, referans evapotranspirasyon (mm gün⁻¹); Δ, doymuş buhar basıncı eğrisinin eğimi (kPa °C⁻¹); R_n, net radyasyon (MJ m⁻² gün⁻¹); G, topraktaki ısı akısı değişimi (MJ m⁻² gün⁻¹); γ, psikometrik sabit (kPa °C⁻¹); T, ortalama hava sıcaklığı (°C); U₂, zemin yüzeyinden 2 m yükseklikteki rüzgâr hızı (m s⁻¹); e_s ve e_a, doymuş ve gerçek buhar basınçlarını (kPa) ifade etmektedir. CROPWAT yazılımı ile yapılan hesaplamalarda U₂ km gün⁻¹ cinsinden kullanılmıştır. Van Gölü havzası koşullarında değerlendirilen ampirik Caprio (Eşitlik 2), Irmak (Eşitlik 3) ve Tabari (Eşitlik 4) tahmin modellerine ait orijinal eşitlikler Tablo 4'de verilmiştir. Giriş değişkenleri olarak T ve R_s verilerinin kullanıldığı bu modellerde, R_s Angström & Prescott (AP) modeli ile tahmin edilmiştir (Eşitlik 5). Bu modelin alt bileşenlerinin belirlenmesinde sırasıyla Eşitlik (6-12)

kullanılmıştır. AP modeli katsayıları (a_s , b_s) sırasıyla 0.25 ve 0.50 olarak alınmıştır (Angström, 1924; Prescott, 1940; Allen ve ark., 1998).

Tablo 4. Caprio, Irmak ve Tabari Modellerinin Orijinal Eşitlikleri

Model	Eşitlik	NO.
Caprio (Caprio, 1974)	$ET_o = (0.01092708 \times T + 0.0060706) \times R_s$	(2)
Irmak (Irmak ve ark., 2003)	$ET_o = 0.079 \times T + 0.149 \times R_s - 0.611$	(3)
Tabari (Tabari ve ark., 2013)	$ET_o = 0.0353 \times T + 0.174 \times R_s - 0.642$	(4)

$$R_s = \left[a_s + b_s \times \left(\frac{n}{N} \right) \right] \times R_a \quad (5)$$

$$j = [(30.56 \times Ay) - 30 + \text{Gün}] - 2 \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos \left(\frac{2 \times \pi \times j}{365} \right) \quad (7)$$

$$\delta = 0.409 \times \sin \left[\left(\frac{2 \times \pi \times j}{365} \right) - 1.39 \right] \quad (8)$$

$$\emptyset = E \times \left(\frac{\pi}{180} \right) \quad (9)$$

$$w_s = \arccos (-\tan \emptyset \times \tan \delta) \quad (10)$$

$$R_a = 24 \times \left(\frac{60}{\pi} \right) \times G_{sc} \times d_r \times [(w_s \times \sin \emptyset \times \sin \delta) + (\cos \emptyset \times \cos \delta \times \sin w_s)] \quad (11)$$

$$N = \left(\frac{24}{\pi} \right) \times w_s \quad (12)$$

AP modeli eşitliği ile bu modelin alt bileşenlerinin belirlenmesinde kullanılan eşitliklerde; J, Julian tarihi; Ay, her bir ayın numarası (1-12); d_r , dünya-güneş ters oransal uzaklığı; δ , solar diklik (radyan); E, enlem (derece); $\emptyset$, enlem (radyan); w_s , güneş batım saatindeki açı (radyan); G_{sc} , solar sabite ($0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dakika}^{-1}$); R_a , extraterrestrial radyasyon ($\text{MJ m}^{-2} \text{ gün}^{-1}$) ve N, olası maksimum günlük güneşlenme süresidir (saat).

Caprio, Irmak ve Tabari modelleri kullanılarak tahmin edilen aylık ortalama ET_o değerleri FAO-56 PM eşitliği kullanılarak hesaplanan gerçek ET_o değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kriterleri olarak; ortalama mutlak hata (MAE) (Eşitlik 13) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) (Eşitlik 14) istatistiksel yaklaşımlarından faydalanılmıştır. Tahmin modelleri ile elde edilen ET_o değerlerinin doğruluk düzeyleri; $\text{MAPE} < \%10$ ise “çok iyi”, $\%10 \leq \text{MAPE} < \%20$ ise “iyi”, $\%20 \leq \text{MAPE} < \%50$ ise “kabul edilebilir” ve $\text{MAPE} \geq \%50$ ise “uyumsuz” olarak değerlendirilmiştir (Lewis, 1982; De Myttenaere ve ark., 2016). Aşağıdaki eşitliklerde; X_i ve Y_i , sırasıyla gerçek ve tahmini ET_o değerlerini (mm gün^{-1}) ifade etmektedir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (13)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - Y_i}{X_i} \right| \times 100 \quad (14)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Van Gölü havzasındaki yerleşim yerleri için FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen aylık ortalama gerçek ET_o değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Ampirik Caprio, Irmak ve Tabari modelleri kullanılarak tahmin edilen aylık ortalama ET_o değerleri sırasıyla Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8’de ve bu modellerin tahmin performanslarının bir göstergesi olarak hesaplanan MAE ve MAPE hataları ile birlikte doğruluk düzeyleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 5. FAO 56-PM ile Belirlenen Aylık Ortalama ET_o Değerleri

Yerleşim yeri	ET_o (mm gün ⁻¹)							
	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Ort.
Adilcevaz	2.14	2.85	3.71	4.47	4.48	4.29	3.26	3.60
Ahlat	1.88	3.07	4.22	5.08	4.79	3.86	2.20	3.59
Bahçesaray	2.38	3.17	4.11	4.98	5.05	4.79	3.62	4.01
Başkale	3.21	3.27	4.22	4.78	4.36	3.63	2.03	3.50
Çaldıran	1.76	2.64	3.52	4.33	4.43	4.12	2.86	3.38
Çatak	2.57	3.29	4.11	4.85	4.88	4.71	3.67	4.01
Erciş	1.98	3.04	3.98	4.58	4.13	3.16	1.76	3.23
Gevaş	2.28	3.24	4.05	4.55	4.03	3.23	1.83	3.32
Gülpınar	2.33	3.15	4.03	4.79	4.82	4.56	3.33	3.86
Muradiye	2.21	3.41	4.42	5.28	4.69	3.53	2.00	3.65
Özalp	2.05	3.24	4.22	5.05	4.56	3.50	1.90	3.50
Saray	1.80	2.70	3.65	4.47	4.61	4.35	3.10	3.53
Tatvan	1.85	2.97	3.98	4.55	3.96	3.03	1.70	3.15
Van	2.38	3.54	4.62	5.28	4.83	3.80	2.20	3.81
Ortalama	2.13	3.11	4.06	4.79	4.55	3.90	2.53	3.58

Tablo 6. Caprio Modeli ile Tahmin Edilen Aylık Ortalama ET_o Değerleri

Yerleşim yeri	ET _o (mm gün ⁻¹)							
	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Ort.
Adilcevaz	1.25	2.39	3.84	5.01	4.53	2.93	1.30	3.04
Ahlat	1.15	2.39	3.84	4.85	4.69	2.81	1.23	2.99
Bahçesaray	1.51	2.83	4.49	5.95	5.52	3.61	1.63	3.65
Başkale	0.77	1.90	3.35	4.57	4.25	2.70	1.02	2.65
Çaldıran	0.88	2.12	3.54	4.78	4.43	2.70	0.99	2.78
Çatak	1.71	2.99	4.49	5.71	5.22	3.51	1.70	3.62
Erciş	1.17	2.46	4.05	5.27	4.74	2.85	1.18	3.10
Gevaş	1.37	2.60	4.05	5.22	4.74	3.04	1.33	3.19
Gürpınar	1.44	2.80	4.36	5.60	5.13	3.29	1.38	3.43
Muradiye	1.28	2.64	4.29	5.69	5.19	3.16	1.35	3.37
Özalp	0.94	2.15	3.60	4.92	4.51	2.65	1.01	2.83
Saray	0.92	2.20	3.75	5.02	4.76	3.01	1.19	2.98
Tatvan	1.06	2.27	3.84	5.02	4.70	2.94	1.24	3.01
Van	1.38	2.70	4.23	5.56	5.14	3.33	1.42	3.41
Ortalama	1.20	2.46	3.98	5.23	4.82	3.04	1.28	3.15

Tablo 7. Irmak Modeli ile Tahmin Edilen Aylık Ortalama ET_o Değerleri

Yerleşim yeri	ET _o (mm gün ⁻¹)							
	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Ort.
Adilcevaz	2.09	2.93	3.71	4.22	3.94	3.03	1.83	3.11
Ahlat	2.02	2.93	3.71	4.15	4.01	2.97	1.77	3.08
Bahçesaray	2.28	3.18	4.01	4.61	4.37	3.40	2.09	3.42
Başkale	1.70	2.65	3.48	4.03	3.82	2.91	1.60	2.89
Çaldıran	1.81	2.78	3.57	4.12	3.90	2.90	1.55	2.95
Çatak	2.42	3.26	4.01	4.51	4.25	3.35	2.13	3.42
Erciş	2.03	2.97	3.81	4.33	4.04	2.99	1.72	3.13
Gevaş	2.18	3.05	3.81	4.31	4.04	3.10	1.86	3.19
Gürpınar	2.24	3.16	3.96	4.46	4.20	3.23	1.89	3.31
Muradiye	2.11	3.07	3.92	4.50	4.23	3.16	1.86	3.27
Özalp	1.86	2.80	3.60	4.18	3.93	2.88	1.58	2.98
Saray	1.85	2.82	3.67	4.22	4.04	3.08	1.73	3.06
Tatvan	1.96	2.87	3.71	4.22	4.02	3.05	1.77	3.09
Van	2.19	3.11	3.93	4.45	4.21	3.26	1.93	3.30
Ortalama	2.06	2.97	3.78	4.31	4.07	3.09	1.81	3.16

Tablo 8. Tabari Modeli ile Tahmin Edilen Aylık Ortalama ET_o Değerleri

Yerleşim yeri	ET _o (mm gün ⁻¹)							
	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Ort.
Adilcevaz	2.09	2.81	3.44	3.80	3.51	2.67	1.61	2.85
Ahlat	2.03	2.81	3.44	3.75	3.56	2.63	1.56	2.83
Bahçesaray	2.23	3.00	3.67	4.10	3.84	2.96	1.80	3.09
Başkale	1.82	2.60	3.26	3.66	3.42	2.59	1.46	2.69
Çaldıran	1.87	2.69	3.33	3.72	3.47	2.57	1.41	2.72
Çatak	2.34	3.07	3.67	4.03	3.75	2.92	1.84	3.09
Erciş	2.04	2.84	3.51	3.88	3.58	2.64	1.53	2.86
Gevaş	2.16	2.91	3.52	3.87	3.59	2.73	1.64	2.92
Gürpınar	2.20	2.99	3.63	3.99	3.71	2.83	1.66	3.00
Muradiye	2.10	2.92	3.60	4.01	3.72	2.77	1.63	2.96
Özalp	1.91	2.71	3.35	3.77	3.50	2.56	1.44	2.75
Saray	1.90	2.73	3.41	3.80	3.59	2.71	1.54	2.81
Tatvan	1.99	2.76	3.44	3.81	3.57	2.69	1.57	2.83
Van	2.16	2.95	3.60	3.98	3.72	2.84	1.68	2.99
Ortalama	2.06	2.84	3.49	3.87	3.61	2.72	1.60	2.88

Bitlis'in Adilcevaz ilçesinde FAO-56 PM eşitliği ile hesaplanan aylık ortalama gerçek ET_o değerleri 2.14 – 4.48 mm gün⁻¹ aralığında değişmiştir. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o değeri ise 3.60 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir (Tablo 5). Caprio, Irmak ve Tabari modelleri kullanılarak sırasıyla 1.25 – 5.01 mm gün⁻¹, 1.83 – 4.22 mm gün⁻¹ ve 1.61 – 3.80 mm gün⁻¹ aralıklarında değişen aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir. Dönemlik ortalama değerler ise sırasıyla 3.04 mm gün⁻¹, 3.11 mm gün⁻¹ ve 2.85 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir (Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8).

Tablo 9. Caprio, Irmak ve Tabari Modellerinin Performans Analizleri

Yerleşim yeri	Model	MAE (mm gün ⁻¹)	MAPE (%)	Doğruluk düzeyi
Adilcevaz	Caprio	0.77	23.78	Kabul edilebilir
	Irmak	0.52	13.72	İyi
	Tabari	0.75	19.42	İyi
Ahlat	Caprio	0.59	21.12	Kabul edilebilir
	Irmak	0.55	14.48	İyi
	Tabari	0.80	21.10	Kabul edilebilir
Bahçesaray	Caprio	0.90	23.59	Kabul edilebilir
	Irmak	0.60	14.13	İyi
	Tabari	0.93	21.76	Kabul edilebilir
Başkale	Caprio	0.85	29.98	Kabul edilebilir
	Irmak	0.61	18.20	İyi
	Tabari	0.81	23.23	Kabul edilebilir
Çaldıran	Caprio	0.74	25.75	Kabul edilebilir
	Irmak	0.50	14.52	İyi
	Tabari	0.70	19.69	İyi
Çatak	Caprio	0.85	22.30	Kabul edilebilir
	Irmak	0.59	14.23	İyi
	Tabari	0.92	22.06	Kabul edilebilir
Erciş	Caprio	0.52	19.23	İyi
	Irmak	0.12	3.52	Çok iyi
	Tabari	0.39	11.38	İyi
Gevaş	Caprio	0.52	17.88	İyi
	Irmak	0.13	3.84	Çok iyi
	Tabari	0.40	11.55	İyi
Gürpınar	Caprio	0.84	23.79	Kabul edilebilir
	Irmak	0.56	13.99	İyi
	Tabari	0.86	21.23	Kabul edilebilir
Muradiye	Caprio	0.54	18.42	İyi
	Irmak	0.38	9.69	Çok iyi
	Tabari	0.69	17.56	İyi
Özalp	Caprio	0.68	25.34	Kabul edilebilir
	Irmak	0.53	14.75	İyi
	Tabari	0.75	20.50	Kabul edilebilir
Saray	Caprio	0.78	25.43	Kabul edilebilir
	Irmak	0.52	14.17	İyi
	Tabari	0.75	19.84	İyi
Tatvan	Caprio	0.48	18.41	İyi
	Irmak	0.14	4.21	Çok iyi
	Tabari	0.36	10.42	İyi
Van	Caprio	0.58	18.85	İyi
	Irmak	0.51	12.95	İyi
	Tabari	0.82	20.64	Kabul edilebilir

Van Gölü havzası genelinde Nisan – Temmuz döneminde artma, Temmuz – Ekim döneminde ise azalma eğilimi gösteren aylık gerçek ET_o değerleri Adilcevaz’a komşu olan Ahlat ilçesinde 1.88 – 5.08 mm gün⁻¹ arasında değerler almıştır. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o değeri ise Adilcevaz’a benzer şekilde 3.59 mm gün⁻¹ olarak gerçekleşmiştir (Tablo 5). Ahlat koşullarında Caprio, Irmak ve Tabari modelleri kullanılarak tahmin edilen aylık ET_o değerleri sırasıyla 1.15 – 4.85 mm gün⁻¹, 1.77 – 4.15 mm gün⁻¹ ve 1.56 – 3.75 mm gün⁻¹ aralıklarında değişmiştir. Nisan – Ekim dönemi tahmini ortalama ET_o değerleri ise sırasıyla 2.99 mm gün⁻¹, 3.08 mm gün⁻¹ ve 2.83 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir (Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8). Havzanın kuzey batısında yer alan Adilcevaz ve en doğusunda yer alan Ahlat koşullarında gerçek ET_o değerlerine en yakın tahminler Irmak modeli ile elde edilmiştir (Tablo 7). Adilcevaz ve Ahlat’ta en yüksek tahmin performansına sahip olan Irmak modeli kullanılarak, bu iki ilçede sırasıyla %86.28 (MAE= 0.52 mm gün⁻¹, MAPE= %13.72) ve %85.52 (MAE= 0.55 mm gün⁻¹, MAPE= %14.48) oranları ile “iyi” düzeyde (%10 ≤ MAPE < %20) doğruluğu sahip aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir (Tablo 10). Birbirlerine çok yakın performanslar sergileyen Tabari ve Caprio modelleri kullanılarak, Irmak modeline göre daha düşük doğruluk oranlarına sahip aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir. Her iki ilçede Tabari modeli kullanılarak %80.58 (MAE= 0.75 mm gün⁻¹, MAPE= %19.42) doğruluğa sahip ET_o değerleri tahmin edilirken, bu oran Caprio modelinde %76.22 (MAE= 0.77 mm gün⁻¹, MAPE= %23.78) düzeyine gerilemiştir (Tablo 6, Tablo 8). Adilcevaz ve Ahlat ilçelerine benzer şekilde Tatvan koşullarında da en yüksek doğruluğa sahip aylık ortalama ET_o değerleri %95.79 oranı ile Irmak modeli kullanılarak elde edilmiştir (MAE= 0.14 mm gün⁻¹, MAPE= %4.21). Bu modeli %89.58 (MAE= 0.36 mm gün⁻¹, MAPE= %10.42) ile Tabari ve %81.59 (MAE= 0.48 mm gün⁻¹, MAPE= %18.41) ile Caprio izlemiştir (Tablo 9). Irmak modelinin Van Gölü havzası koşullarında Erciş ve Gevaş’tan sonra en iyi üçüncü performansını gösterdiği yerleşim yeri Tatvan olmuştur. Irmak modeli kullanılarak Tatvan, Gevaş ve Erciş ilçeleri koşullarında “çok iyi” (MAPE < %10) düzeyde doğruluğa sahip aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir (Tablo 9).

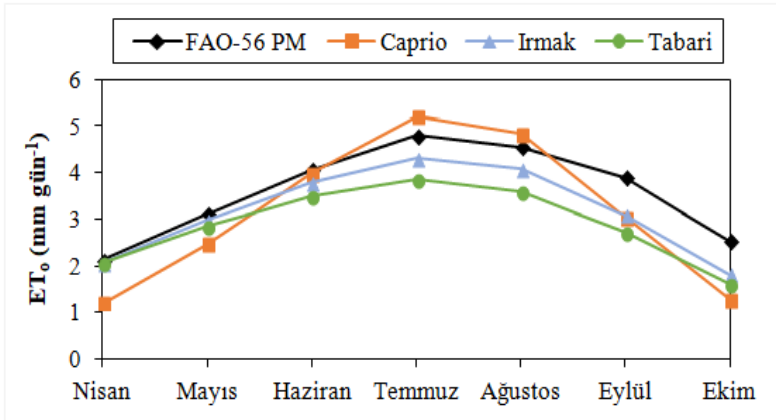
Van Gölünün kuzey sahilinde bulunan Erciş ile güney sahilindeki Gevaş Van Gölü havzası içerisinde Irmak modelinin en yüksek performansı gösterdiği yerleşim yerleri olmuştur. Bu model kullanılarak Erciş ve Gevaş koşullarında sırasıyla %96.48 (MAE= 0.12 mm gün⁻¹, MAPE= %3.52) ve %96.16 (MAE= 0.13 mm gün⁻¹, MAPE= %3.84) oranları ile “çok iyi” düzeyde (MAPE < %10) doğruluğu sahip aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir (Tablo 9). Erciş ilçesinde FAO-56 PM eşitliği ile hesaplanan aylık ortalama ET_o değerleri 1.76 –

4.58 mm gün⁻¹ aralığında değerler almıştır. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o değeri ise 3.23 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir (Tablo 5). Caprio, Irmak ve Tabari modelleri ile sırasıyla 1.17 – 5.27 mm gün⁻¹, 1.72 – 4.33 mm gün⁻¹ ve 1.53 – 3.88 mm gün⁻¹ aralıklarında değişen aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir. Dönemlik ortalama ET_o değerleri ise sırasıyla 3.10 mm gün⁻¹, 3.13 mm gün⁻¹ ve 2.86 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir (Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8). Gevaş ilçesinde FAO-56 PM eşitliği ile 2.14 – 4.48 mm gün⁻¹ arasında değişen aylık ortalama gerçek ET_o değerleri elde edilmiştir. Caprio, Irmak ve Tabari modelleri kullanılarak sırasıyla 1.33 – 5.22 mm gün⁻¹, 1.86 – 4.31 mm gün⁻¹ ve 1.64 – 3.87 mm gün⁻¹ aralıklarında değişen aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir. Nisan – Ekim dönemi ortalama ET_o değeri ise FAO-56 PM için 3.32 mm gün⁻¹, Caprio ve Irmak için 3.19 mm gün⁻¹ ve Tabari için 2.92 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. Van Gölünün doğu sahili boyunca uzanan Van ili Merkezinde 2.20 – 5.28 mm gün⁻¹ aralığında değerler alan aylık ortalama gerçek ET_o değerlerine en yakın tahminler havzadaki diğer yerleşim yerlerinde olduğu gibi Irmak modeli ile elde edilmiştir. Bu model ile 1.93 – 4.45 mm gün⁻¹ arasında değişen %87.05 (MAPE= %12.95) oranı ile “iyi” düzeyde (%10 ≤ MAPE < %20) doğruluğa sahip aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir (Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8, Tablo 9).

Van Gölü havzasının en yüksek rakımlı yerlerinde bulunan Başkale, Çaldıran, Özalp ve Saray ilçelerinde aylık ortalama gerçek ET_o değerlerine en yakın değerler Irmak modeli ile tahmin edilmiştir. Bu modeli sırasıyla Tabari ve Caprio izlemiştir. Bu ilçelerde Nisan – Ekim dönemi ortalama gerçek ET_o değerleri 3.38 – 3.53 mm gün⁻¹ aralığında değerler almıştır (Tablo 5). Irmak, Tabari ve Caprio modelleri ile tahmin edilen dönemlik ortalama ET_o değerleri ise sırasıyla 2.89 – 3.06 mm gün⁻¹, 2.69 – 2.81 mm gün⁻¹ ve 2.65 – 3.98 mm gün⁻¹ aralıklarında değişmiştir (Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8). Van Gölü havzasının en yüksek rakımlı yerlerinde en iyi performansa sahip olan Irmak ile %81.80 – 85.83 (MAE= 0.50 – 0.61 mm gün⁻¹, MAPE= %14.17 – 18.20) aralığında değişen “iyi” düzeyde (%10 ≤ MAPE < %20) doğruluğa sahip aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir. Bu oran Tabari ve Caprio modellerinde sırasıyla %76.77 – 80.31 (MAE= 0.70 – 0.81 mm gün⁻¹, MAPE= %19.69 – 23.23) ve %70.02 – 74.66 (MAE= 0.68 – 0.85 mm gün⁻¹, MAPE= %25.34 – 29.98) aralıklarında değişmiştir. Tabari ve Caprio modelleri ile yapılan tahminlerin doğruluğu genel olarak “kabul edilebilir” (%20 ≤ MAPE < %50) düzeyde gerçekleşmiştir (Tablo 9). Havzanın en düşük rakımlı yerleşim yeri olan Çatak ilçesinde de en iyi performans gösteren model Irmak olmuştur. İlçe koşullarında bu model kullanılarak %85.77 (MAPE= %14.23) oranı ile “iyi” düzeyde (%10 ≤ MAPE < %20) doğruluğa sahip aylık ortalama ET_o.

değerleri tahmin edilmiştir (Tablo 9). Irmak modelinin sırasıyla Erciş, Gevaş ve Tatvan'dan sonra en iyi performans gösterdiği dördüncü yerleşim yeri Muradiye olmuştur. Bu ilçe koşullarında 2.00 – 5.28 mm gün⁻¹ arasında değişen gerçek ET_o değerlerine en yakın değerler (1.86– 4.50 mm gün⁻¹) Irmak ile tahmin edilmiştir (Tablo 5, Tablo 7). Bu model kullanılarak %90.31 (MAPE= %9.69) oranı ile “çok iyi” düzeyde (MAPE < %10) doğruluğa sahip aylık ortalama ET_o değerleri tahmin edilmiştir (Tablo 9).

Van Gölü havzası geneli için FAO-56 PM eşitliği ile belirlenen aylık ortalama gerçek ET_o değerleri ile Ampirik Caprio, Irmak ve Tabari modelleri kullanılarak tahmin edilen aylık ortalama ET_o değerleri Şekil 2’de verilmiştir. Havza koşullarında en düşük ve en yüksek aylık ortalama gerçek ET_o değerleri sırasıyla Nisan (2.13 mm gün⁻¹) ve Temmuz (4.79 mm gün⁻¹) ayları için elde edilmiştir. Havza geneli aylık ortalama ET_o değerleri; Mayıs için 3.11 mm gün⁻¹, Haziran için 4.06 mm gün⁻¹, Ağustos için 4.55 mm gün⁻¹, Eylül için 3.90 mm gün⁻¹ ve Ekim için 2.53 mm gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. Van Gölü havzası geneli Nisan – Ekim dönemi sezonluk ortalama ET_o değeri 3.58 mm gün⁻¹ olarak elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Van Gölü Havzası Aylık Ortalama ET_o Değerleri

Van Gölü havzası sınırları içerisinde yer alan Van ili merkezi ve bu ile bağlı Bahçesaray, Başkale, Çaldıran, Çatak, Erciş, Gevaş, Gürpınar, Muradiye, Özalp ve Saray ilçeleri ile birlikte Bitlis ilinin Tatvan, Ahlat ve Adilcevaz ilçelerinin iklim ve çevre koşulları altında test edilerek değerlendirilen üç ampirik referans evapotranspirasyon tahmin modeli, performanslarına göre en iyiden en kötüye doğru; Irmak > Tabari > Caprio şeklinde sıralanmışlardır (Tablo 10). Üç modelinde aylık ortalama referans evapotranspirasyonu olması gerekenden daha düşük tahmin ettikleri gözlemlenmiştir. Irmak, Tabari ve Caprio modelleri

kullanılarak tahmin edilen aylık ortalama ET_o değerlerinin doğruluk oranları sırasıyla; %87.89 (MAPE= %12.11), %81.02 (MAPE= %18.98) ve %78.14 (MAPE= %21.86) olarak elde edilmiştir. MAPE yaklaşımına göre bu modellerin doğruluk düzeyleri Irmak ve Tabari için “iyi” ($\%10 \leq \text{MAPE} < \%20$), Caprio için ise “kabul edilebilir” ($\%20 \leq \text{MAPE} < \%250$) olarak belirlenmiştir. MAPE doğrulama ölçütüne göre, Van Gölü havzası iklim ve çevre koşulları ile en uyumlu modelin Irmak olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Tablo 10).

Tablo 10. Tahmin Modellerinin Havza Geneli Performans Analizleri

Aylar	ET_o (mm gün ⁻¹)		MAE (mm gün ⁻¹)	MAPE (%)	Doğruluk düzeyi
	FAO-56 PM	Caprio			
Nisan	2.13	1.20	0.93	43.53	Kabul edilebilir
Mayıs	3.11	2.46	0.65	20.98	Kabul edilebilir
Haziran	4.06	3.98	0.08	1.85	Çok iyi
Temmuz	4.79	5.23	0.44	9.13	Çok iyi
Ağustos	4.55	4.82	0.28	6.14	Çok iyi
Eylül	3.90	3.04	0.86	22.04	Kabul edilebilir
Ekim	2.53	1.28	1.25	49.37	Kabul edilebilir
Ortalama	3.58	3.15	0.64	21.86	Kabul edilebilir

Aylar	ET_o (mm gün ⁻¹)		MAE (mm gün ⁻¹)	MAPE (%)	Doğruluk düzeyi
	FAO-56 PM	Irmak			
Nisan	2.13	2.06	0.08	3.52	Çok iyi
Mayıs	3.11	2.97	0.14	4.60	Çok iyi
Haziran	4.06	3.78	0.28	6.91	Çok iyi
Temmuz	4.79	4.31	0.48	10.05	İyi
Ağustos	4.55	4.07	0.47	10.39	İyi
Eylül	3.90	3.09	0.80	20.63	Kabul edilebilir
Ekim	2.53	1.81	0.73	28.64	Kabul edilebilir
Ortalama	3.58	3.16	0.43	12.11	İyi

Aylar	ET_o (mm gün ⁻¹)		MAE (mm gün ⁻¹)	MAPE (%)	Doğruluk düzeyi
	FAO-56 PM	Tabari			
Nisan	2.13	2.06	0.07	3.27	Çok iyi
Mayıs	3.11	2.84	0.27	8.70	Çok iyi
Haziran	4.06	3.49	0.57	14.03	İyi
Temmuz	4.79	3.87	0.92	19.17	İyi
Ağustos	4.55	3.61	0.94	20.59	Kabul edilebilir
Eylül	3.90	2.72	1.18	30.16	Kabul edilebilir
Ekim	2.53	1.60	0.94	36.96	Kabul edilebilir
Ortalama	3.58	2.88	0.70	18.98	İyi

Van Gölü havzası koşullarında test edilen Caprio, Irmak ve Tabari ET₀ tahmin modellerinin Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında göstermiş oldukları performansların genel olarak Eylül ve Ekim aylarına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ve radyasyona dayalı bu modellerde oransal nemin giriş değişkeni olarak kullanılmaması nedeniyle, yağışların başladığı Eylül ve Ekim aylarındaki performanslarının düşük olduğu düşünülmektedir. Ampirik ET₀ tahmin modelleri için kabul edilebilir MAE üst sınırı olarak 0.52 mm gün⁻¹ değeri önerilmektedir (Irmak ve Haman, 2003; Moratiel ve ark., 2020). Bu sınır dikkate alındığında Irmak (MAE= 0.43 mm gün⁻¹) modelinin Van Gölü havzası koşullarında kalibre edilmeden kullanılabileceği, Tabari (MAE= 0.70 mm gün⁻¹) ve Caprio (MAE= 0.64 mm gün⁻¹) modellerinin ise kalibrasyon işlemlerinden sonra kullanılabilme potansiyellerinin yüksek olduğu düşünülmektedir (Tablo 10).

4. Sonuç

Bu çalışmada, referans evapotranspirasyon tahminlerinde kullanılan Caprio, Irmak ve Tabari modellerinin Van Gölü havzası iklim ve çevre koşulları altındaki kullanılabilirlik ve güvenilirlik düzeyleri belirlenmiştir. Havzada yer alan yerleşim yerlerinin 2013 ile 2020 yılları arasında ölçülen 8 yıllık aylık ortalama iklim verileri kullanılarak Nisan – Ekim dönemi için yürütülen testler kapsamında, standart FAO-56 Penman & Monteith eşitliği ile belirlenen referans evapotranspirasyon değerleri gerçek değerler olarak kabul edilmiştir. Van Gölü havzası genelinde tahmin performansı en yüksek model Irmak olmuştur. Bu modeli sırasıyla Tabari ve Caprio izlemiştir. Irmak modeli ile yaklaşık olarak %88 doğruluk oranına sahip aylık ortalama referans evapotranspirasyon değerleri tahmin edilmiştir. Hava sıcaklığı ve solar radyasyona bağlı olarak referans evapotranspirasyonu tahmin eden bu modelde, sadece hava sıcaklığı için ölçme işlemi gerekmektedir. Solar radyasyon ise enlem ve zamana bağlı olarak tahmin edilebilmektedir. Van Gölü havzası koşullarında FAO-56 Penman & Monteith eşitliği için gerekli olan iklim verilerinin tamamının ölçülemediği ya da temin edilemediği durumlarda, Irmak modelinin iyi bir alternatif olacağı ve kalibrasyona gerek kalmadan havza koşullarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynaklar

- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. *Journal of the American Water Resources Association*, 32, 465-473. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x>
- 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. <https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E00.htm> (erişim tarihi: 18 Temmuz 2023).
- Angström, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Journal of Royal Meteorological Society*, 50, 121-126.
- Anonim. (2020). Van Gölü Havzası Taşkın Yönetim Planı. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Ta%C5%9Fk%C4%B1n%20Y%C3%B6netim%20Planlar%C4%B1%2026.12.2022/VAN_Yoneti ci_Ozeti_v2.pdf (erişim tarihi: 15 Eylül 2025).
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1962). Determining consumptive use and irrigation water requirements. United States Department of Agriculture (USDA) Technical Bulletin 1275, Beltsville.
- Caprio, J. M. (1974). The solar thermal unit concept in problems related to plant development and potential evapotranspiration. In: Lieth, H. (eds) Phenology and Seasonality Modeling. *Ecological Studies*, 8, 353-364. https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8_29
- Çiftçi, Y., Işık, M. A., Alkeveli, T., & Yeşilova, Ç. (2008). Van Gölü Havzasının çevre jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 32(2), 45-77.
- De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., & Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing*, 192, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>
- DMİ, (2025). Van Gölü Kapalı Havzası İklim Verileri. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara
- FAO. (2023). CROPWAT-A Computer Program for Irrigation Planning and Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/land-water/databases-andsoftware/cropwat/en/> (erişim tarihi: 22 Mart 2023).
- Gocić, M., & Trajković, S. (2014). Analysis of trends in reference evapotranspiration data in a humid climate. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 165-180. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.798659>

- Hargreaves, G. L., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf (erişim tarihi: 12 Ekim 2023).
- Irmak, S., & Haman, D. Z. (2003). Evaluation of five methods for estimating class A pan evaporation in a humid climate. *HortTechnology*, 13(3), 500-508. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.13.3.0500>
- Irmak, S., Irmak, A., Jones, J. W., Howell, T. A., Jacobs, J. M., Allen, R. G. & Hoogenboom, G. (2003) Predicting daily net radiation using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(4), 256-269.
- Izadifar, Z., & Elshorbagy, A. (2010). Prediction of hourly actual evapotranspiration using neural networks, genetic programming, and statistical models. *Hydrological Processes*, 24(23), 3413-3425. <https://doi.org/10.1002/hyp.7771>.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, 89, 15-41. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287>
- Kale, M. M., & Duman, N. (2024). Bendimahi çayı (Van Gölü Kapalı Havzası) hidrolojik kuraklık analizi. *Fırat University Journal of Social Sciences*, 34(2), 499-516. <https://doi.org/10.18069/firatsbed.1458082>
- Karaca, C., Tekelioğlu, B., Büyüктаş, D. & Baştuğ, R. (2017). Kıyas bitki su tüketiminde kullanılan eşitliklerin değerlendirilmesi. *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, özel sayı, 144-161.
- Lewis, C. D. (1982). Industrial and Business Forecasting Methods. London, England: Butterworths Publishing, 1982, pp. 40-142.
- Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman Formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11, 277-288.
- Moratiel, R., Bravo, R., Saa, A., Tarquis, A. M., & Almorox, J. (2020). Estimation of evapotranspiration by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) Penman–Monteith temperature (PMT) and Hargreaves–Samani (HS) models under temporal and spatial criteria – a case study in Duero basin (Spain). *Natural*

- Hazards and Earth System Sciences*, 20(3), 859-875.
<https://doi.org/10.5194/nhess-20-859-2020>
- Muhammad, M. K. I., Nashwan, M. S., Shahid, S., Ismail, T. B., Song, Y. H., & Chung, E. S. (2019). Evaluation of empirical reference evapotranspiration models using compromise programming: A case study of Peninsular Malaysia. *Sustainability*, 11(16), 4267.
<https://doi.org/10.3390/su11164267>
- Prescott, J. A. (1940). Evaporation from water surface in relation to solar radiation, *Transactions of the Royal Society of Australia*, 46, 114-118.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Schendel, U. (1967). Vegetations wasserverbrauch und-wasserbedarf. *Habilitation, Kiel*, 137(1), 1-11.
- Tabari, H., Grismer, M. E., & Trajković, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2), 107-117. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0295-z>
- Uçak, A. B., Öktem, A., Sezer, C., Cengiz, R., & Inal, B. (2016). Determination of arid and temperature resistant sweet corn (*Zea mays saccharata* Sturt) lines. *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)*, 2(7), 79-88.
- Uçak, A.B., Kociğcka, J., Liberacki, D., Saltuk, B., Atilgan, A., Stachowski, P., Rolbiecki, R. (2024). The effects of high temperature and low humidity on crop water stress index of seed pumpkin plants (*Cucurbita pepo* L.) in semi-arid climate conditions. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, 23(1), 63–73. <https://doi.org/10.24326/asphc.2024.5287>

7. Bölüm

Kuru Kayısı Üretim Yapısı, Değer Zinciri ve Sürdürülebilirlik Politikaları

Ahmet ASLAN¹

Özet

Bu kitap bölümü, Türkiye ve özellikle Malatya ilinde üretilen kuru kayısının üretim, işleme ve pazarlama yapısını; iklim değişikliği kaynaklı riskler ve küresel rekabet dinamikleri çerçevesinde bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Çalışmada, Malatya ilinde üretilen kuru kayısının dünya kuru kayısı piyasasındaki tarihsel liderliği ve marka gücü vurgulanmakta; buna karşın son yıllarda artan iklim belirsizlikleri, yapısal üretim sorunları ve Orta Asya ülkelerinin yükselen rekabet baskısının bu liderliği giderek kırılgan hale getirdiği ortaya konulmaktadır.

Bölüm, kayısının mevcut üretim yapısını küçük ölçekli işletmeler, yaşlanan bahçeler ve sınırlı yenileme oranları bağlamında analiz etmekte; üretim sonrası aşamalarda ise geleneksel kurutma yöntemlerinin ağırlığı, yetersiz depolama altyapısı ve değer zinciri içinde katma değer dengesiz dağılımına dikkat çekmektedir. İklim kaynaklı arz şoklarının üretim miktarı, fiyat oluşumu, üretici gelirleri ve ihracat performansı üzerindeki etkileri sayısal göstergelerle ele alınmakta; bu şokların yalnızca kısa vadeli kayıplara değil, aynı zamanda Türkiye'nin küresel pazarlardaki güvenilir tedarikçi imajına zarar verdiği vurgulanmaktadır.

Ayrıca bölümde, küresel kuru kayısı piyasasında Orta Asya ülkelerinin artan rolü ve düşük maliyetli üretim modelleri ayrıntılı biçimde incelenmekte; Kuru kayısının rekabet avantajının maliyet temelli bir stratejiyle değil, kalite, arz istikrarı, katma değer ve marka temelli politikalarla sürdürülebileceği savunulmaktadır. Bu çerçevede geliştirilen politika önerileri; katma değerli ürün geliştirme, üretici örgütlenmesi, lisanslı depoculuk, risk yönetimi ve coğrafi işaret temelli pazarlama stratejilerinin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak bu bölüm, Türkiye'nin kuru kayısı ihracatının neredeyse tamamını oluşturan Malatya ili ve çevresinde yetiştirilen kuru kayısının

geleceğinin üretim artışından ziyade yapısal dönüşümün başarısına bağlı olduğunu; bilgiye dayalı politika tasarımı ve kurumsal kapasitenin güçlendirilmesinin sektörün sürdürülebilir rekabet gücü açısından belirleyici olacağını göstermektedir.

1. Giriş

Tarım sektörü, yalnızca gıda arzının sürekliliğini sağlayan bir üretim faaliyeti değil; aynı zamanda kırsal kalkınma, istihdam, dış ticaret dengesi ve bölgesel sosyo-ekonomik yapı üzerinde belirleyici etkiler yaratan stratejik bir sektördür. Özellikle belirli coğrafyalarla özdeşleşmiş, yüksek katma değer potansiyeline sahip tarımsal ürünler, ulusal ekonomiler açısından hem ekonomik hem de politik anlamda kritik bir rol üstlenmektedir. Bu çerçevede Malatya kayısı, Türkiye tarımının küresel ölçekte tanınan ve marka değeri en yüksek ürünlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Malatya ili, sahip olduğu iklimsel ve ekolojik koşullar, uzun yıllara dayanan üretim tecrübesi ve ürün bazında uzmanlaşmış üretici profili sayesinde dünya kuru kayısı üretim ve ticaretinde merkezi bir konum kazanmıştır. Türkiye'nin dünya kuru kayısı ihracatındaki baskın payının büyük ölçüde Malatya kaynaklı olması, bu ürünün yalnızca yerel veya ulusal değil, küresel bir tarımsal emtia niteliği taşıdığını göstermektedir. Kayısı, Malatya ekonomisinde tarımsal gelirin temel bileşenlerinden biri olmanın ötesinde; ticaret, sanayi ve hizmetler sektörlerini besleyen çok katmanlı bir ekonomik yapı meydana getirmiştir.

Ancak son yıllarda Malatya ilinde kayısı yetiştiriciliğinin bu güçlü ve ayrıcalıklı konumunun giderek daha kırılgan bir yapıya büründüğü gözlemlenmektedir. İklim değişikliğinin etkileriyle birlikte artan ilkbahar geç donları, üretimde ciddi dalgalanmalara yol açmakta; yıllık ürün miktarı ve ürün kalitesi üzerindeki belirsizlikler üretici gelirlerinde istikrarsızlığa neden olmaktadır. Bu iklimsel riskler, geçmişte istisnai olaylar olarak değerlendirilirken, günümüzde yapısal ve süreklilik arz eden bir sorun alanı haline gelmiştir.

İklim kaynaklı risklerin etkisi, Malatya kayısı yetiştiriciliğinin mevcut üretim yapısındaki yapısal sorunlarla birleştiğinde daha da derinleşmektedir. Üretim cephesinde küçük ölçekli işletme yapısı, bahçelerin önemli bir bölümünün yaşlanmış olması ve yıllık bahçe yenileme oranlarının sınırlı düzeylerde kalması, verimlilik artışının önündeki temel engeller arasında yer almaktadır. Bu yapı, modern üretim tekniklerinin yaygınlaşmasını

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-0003-2358, ahmet.aslan@ozal.edu.tr

zorlaştırmakta ve üretimi iklim şoklarına karşı daha savunmasız hale getirmektedir.

Üretim sonrası aşamalarda ise Malatya kayısının ekonomik potansiyelinin tam anlamıyla değerlendirilemediği görülmektedir. Geleneksel kurutma yöntemlerinin yaygın biçimde kullanılması, kalite standardizasyonunu zorlaştırmakta; depolama altyapısındaki yetersizlikler üreticilerin pazarlama sürecindeki pazarlık gücünü zayıflatmaktadır. Değer zinciri içinde katma değer büyük ölçüde üretici dışındaki aktörler tarafından elde edilmesi, gelir dağılımı açısından da yapısal bir dengesizlik yaratmaktadır. Bu unsurlar, kayısının küresel rekabet gücünü sınırlayan içsel faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Öte yandan küresel kuru kayısı piyasasında yaşanan dönüşüm, rekabet baskısının yalnızca iç dinamiklerden kaynaklanmadığını ortaya koymaktadır. Özbekistan ve Tacikistan başta olmak üzere Orta Asya ülkeleri, devlet destekli üretim politikaları, genç bahçe yapıları ve düşük maliyet avantajları sayesinde dünya pazarlarında giderek daha görünür hale gelmektedir. Bu ülkelerin artan üretim ve ihracat kapasiteleri, Malatya menşeli kuru kayısının uzun yıllar boyunca sahip olduğu tartışmasız liderliğin sürdürülebilirliğini yeniden değerlendirmeyi zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışma, Malatya ili ve çevresinde üretilen kayısının mevcut durumunu üretim, işleme, depolama, pazarlama ve dış ticaret boyutlarıyla bütüncül bir çerçevede ele almayı amaçlamaktadır. Çalışmanın temel amacı; Malatya kayısının karşı karşıya olduğu yapısal sorunları, iklim kaynaklı riskleri ve küresel rekabet baskılarını ortaya koymak, buna karşılık sektörün sahip olduğu fırsatları ve stratejik dönüşüm potansiyelini analiz etmektir. Bu bağlamda çalışma, yalnızca betimleyici bir analiz sunmakla yetinmemekte; aynı zamanda politika yapıcılar, sektör aktörleri ve araştırmacılar için yol gösterici nitelikte politika ve strateji önerileri geliştirmeyi hedeflemektedir.

Bu çerçevede izleyen bölümlerde sırasıyla Malatya kayısının Türkiye ve dünya ekonomisindeki yeri ele alınmakta; üretim yapısı ve verimlilik düzeyi analiz edilmekte; üretim sonrası süreçler ve değer zinciri yapısı ayrıntılı biçimde incelenmektedir. Ardından iklim kaynaklı arz şoklarının ekonomik etkileri ve küresel rekabet dinamikleri değerlendirilmekte; son bölümde ise Malatya kayısının sürdürülebilir rekabet gücünü destekleyecek stratejik yönelimler ve politika seçenekleri tartışılmaktadır.

2. Türkiye Ve Dünya Ekonomisinde Malatya Kayısının Yeri

Malatya kayısı, Türkiye tarımının dış ticaret odaklı ürün yapısı içerisinde ayrıcalıklı ve stratejik bir konuma sahiptir. Türkiye, uygun iklim koşullarının

hakim olduğu normal üretim yıllarında dünya kuru kayısı ihracatının yaklaşık %60–65’ini tek başına gerçekleştirmekte; bu ihracatın çok büyük bir bölümü Malatya ili merkezli olarak yapılmaktadır. Bu yüksek yoğunlaşma düzeyi, Malatya kayısısını yalnızca ihracatçı bir tarımsal ürün olmaktan çıkararak, küresel kuru kayısı piyasasında fiyat, kalite ve arz koşullarını belirleyen referans bir ürün haline getirmektedir.

Kayısının Türkiye ekonomisi içindeki önemi, yalnızca ihracat hacmi ve döviz geliriyle sınırlı değildir. Ürün, tarımsal üretimden başlayarak kurutma, işleme, ambalajlama, depolama, lojistik ve dış ticaret faaliyetlerine uzanan geniş bir değer zinciri aracılığıyla önemli bir istihdam alanı yaratmaktadır. Malatya özelinde bakıldığında, kayısıya dayalı ekonomik faaliyetlerin tarımsal gelirler içindeki payı birçok ilçede %50’nin üzerine çıkmakta; bu durum, kayısının bölgesel refah ve ekonomik istikrar açısından taşıdığı önemi daha da artırmaktadır.

Türkiye’nin kuru kayısı ihracat performansı büyük ölçüde Malatya’daki üretim koşullarına bağlı olarak şekillenmektedir. Rekoltenin yüksek olduğu yıllarda ihracat hacmi 80 bin tonun üzerine çıkabilmekte; buna karşılık iklim kaynaklı üretim kayıplarının yaşandığı dönemlerde ihracat miktarı 40 bin tonun altına kadar gerileyebilmektedir. Bu dalgalı yapı, ihracat gelirlerinde de belirgin bir oynaklığa yol açmakta ve hem üreticiler hem de ihracatçı firmalar açısından gelir öngörülebilirliğini zayıflatmaktadır.

Uluslararası piyasalarda Malatya kayısısı, coğrafi kökeni ve kalite algısı sayesinde rakip ülke ürünlerinden ayrıışan bir konuma sahiptir. Özellikle Avrupa Birliği ülkeleri, Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya gibi yüksek gelirli pazarlarda Malatya menşeli kuru kayısı, belirli dönemlerde önemli ölçüde fiyat primi elde edebilmektedir. Ancak bu fiyat primi, büyük ölçüde ürün kalitesinin sürekliliği ve arz istikrarına bağlıdır. Arz dalgalanmalarının yoğunlaştığı yıllarda, uluslararası alıcıların alternatif tedarikçilere yönelmesi, Malatya kayısının pazardaki konumunu kısa sürede zayıflatabilmektedir.

Küresel kuru kayısı piyasası her ne kadar Türkiye merkezli bir yapıya sahip olsa da son yıllarda rekabetin belirgin biçimde yoğunlaştığı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Özbekistan ve Tacikistan başta olmak üzere Orta Asya ülkeleri, devlet destekli bahçe tesis programları, genç ve yüksek verimli üretim alanları ile düşük işçilik maliyetleri sayesinde dünya pazarlarında hızla görünürlük kazanmıştır. İran ve İspanya gibi ülkeler ise farklı kalite ve pazar katmanlarında Türkiye’nin rakipleri arasında yer almaktadır. Bu gelişmeler, küresel piyasanın giderek daha rekabetçi ve çok aktörlü bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir.

Bu bağlamda Malatya kayısının Türkiye ve dünya ekonomisindeki yeri, niceliksel üstünlükten ziyade niteliksel ve stratejik bir çerçevede yeniden değerlendirilmelidir. Ürün, sahip olduğu marka değeri, coğrafi işaret potansiyeli ve yüksek katma değerli ürün geliştirme imkanlarıyla, tarımsal ihracatta yapısal dönüşümün öncü örneklerinden biri olabilecek niteliktedir. Ancak bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi, mevcut üretim ve pazarlama modelinin iklim değişikliği, rekabet baskısı ve gelir istikrarsızlığı gibi yeni koşullara uyum sağlayacak biçimde yeniden yapılandırılmasına bağlıdır.

3. Mevcut Durum Analizi: Üretim Yapısı Ve Verimlilik

Kayısının üretim yapısı, niceliksel büyüklük ile yapısal kırılganlığın bir arada bulunduğu özgün bir karakter sergilemektedir. İl genelinde kayısı üretimi büyük ölçüde aile işletmelerine dayalı, küçük ve orta ölçekli tarım işletmeleri tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu yapı, üretimin sosyal açıdan geniş bir kesime yayılmasını sağlamakla birlikte, verimlilik artışı ve modern üretim tekniklerinin benimsenmesi açısından önemli sınırlılıklar da barındırmaktadır.

İşletme ölçeği bakımından değerlendirildiğinde, Malatya'daki kayısı işletmelerinin önemli bir bölümünün 10–20 dekar aralığında üretim yaptığı görülmektedir. Parçalı arazi yapısı ve miras yoluyla bölünme eğilimi, işletme büyüklüklerinin zaman içerisinde daha da küçülmesine yol açmaktadır. Bu durum, mekanizasyon yatırımlarının yaygınlaşmasını zorlaştırmakta; birim maliyetleri yükselterek üreticilerin rekabet gücünü olumsuz etkilemektedir. Küçük ölçekli yapı, aynı zamanda üreticilerin finansmana erişimini ve uzun vadeli yatırım yapabilme kapasitesini de sınırlamaktadır.

Bahçe yaşı ve bahçe yenileme oranları, Malatya ilindeki mevcut verimlilik performansını belirleyen bir diğer kritik unsurdur. Mevcut üretim alanlarının önemli bir bölümünde bahçelerin yaşı 25 yılın üzerindedir. Yaşlanan ağaçlar, hem verim kaybına hem de kalite düşüşüne yol açmakta; hastalık ve iklim streslerine karşı daha hassas bir yapı ortaya çıkarmaktadır. Yıllık bahçe yenileme oranlarının yaklaşık %2–3 seviyesinde kalması, uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından önemli bir risk alanı oluşturmaktadır. Oysa literatürde, benzer çok yıllık meyve türlerinde sağlıklı bir üretim yapısı için yıllık yenileme oranlarının %5–6 düzeyinde olması gerektiği vurgulanmaktadır.

Çeşit deseni açısından bakıldığında, Malatya ilinde sınırlı sayıda çeşidin üretim alanlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, kalite standardizasyonu ve pazar tanınırlığı açısından belirli avantajlar sağlamakla birlikte, iklim kaynaklı risklere karşı üretim sisteminin esnekliğini azaltmaktadır. Özellikle erken çiçeklenen çeşitlerin üretim alanları içindeki yüksek payı, ilkbahar geç donlarının yaşandığı yıllarda rekolte kayıplarını

dramatik biçimde artırmaktadır. Çeşit deseninin dar olması, aynı zamanda uzun vadede yeni pazar taleplerine uyum kapasitesini de sınırlamaktadır.

Verimlilik göstergeleri, kayısı üretiminin iklim koşullarına son derece duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Uygun iklim koşullarının hakim olduğu yıllarda dekara verim 900–1.000 kg seviyelerine yaklaşabilmekte; buna karşılık don ve benzeri olumsuzlukların yaşandığı yıllarda bu değer 300–400 kg’a kadar gerileyebilmektedir. Bu yüksek oynaklık, üretici gelirlerinde ciddi dalgalanmalara yol açmakta ve sektörde gelir istikrarını zayıflatmaktadır. Verim dalgalanmalarının bu denli yüksek olması, üretim planlamasını ve uzun vadeli yatırım kararlarını da olumsuz etkilemektedir.

Girdi kullanımı ve maliyet yapısı da üretim performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Gübre, ilaç, enerji ve işçilik maliyetlerinde son yıllarda yaşanan artışlar, kayısı üretiminde birim maliyetleri önemli ölçüde yükseltmiştir. Küçük ölçekli işletmeler, girdi maliyetlerindeki artışı fiyatlara yansıtma konusunda sınırlı bir pazarlık gücüne sahip olduklarından, maliyet baskısını doğrudan gelir kaybı olarak hissetmektedir. Bu durum, üreticilerin bakım ve yenileme yatırımlarını ertelemesine ve verimlilik kayıplarının kronikleşmesine yol açabilmektedir.

Üretim yapısının kurumsal boyutu da dikkate alınması gereken bir diğer unsurdur. Malatya ilinde kayısı üreticilerinin örgütlenmesinin sınırlı düzeyde olması, ortak girdi temini, teknik danışmanlık ve pazarlama faaliyetlerinde ölçek ekonomilerinden yararlanılmasını güçleştirmektedir. Bireysel üretici ağırlıklı yapı, bilgiye erişim ve yeniliklerin yaygınlaştırılması açısından da önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu durum, üretim yapısındaki yapısal sorunların uzun süre devam etmesine neden olmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Malatya ilinde kayısı üretim yapısı, sahip olduğu doğal ve beşerî avantajlara rağmen, ölçek, bahçe yaşı, çeşit deseni ve verim istikrarı açısından önemli yapısal sınırlılıklar barındırmaktadır. Bu tablo, mevcut üretim modelinin iklim değişikliği ve artan rekabet baskısı altında sürdürülebilir olmadığını; üretim yapısının verimlilik, esneklik ve risk yönetimi ekseninde yeniden ele alınması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

4. Üretim Sonrası Süreçler Ve Değer Zinciri Yapısı

Malatya kayısının ekonomik değeri, büyük ölçüde üretim sonrası süreçlerde şekillenmektedir. Hasat edilen ürünün kurutulması, sınıflandırılması, depolanması, işlenmesi, ambalajlanması ve pazara sunulması aşamalarının her biri, nihai ürünün kalitesi ve elde edilen katma değer üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle üretim sonrası süreçler, Malatya kayısının rekabet

gücünü ve gelir dağılımını doğrudan etkileyen stratejik bir alan olarak değerlendirilmelidir.

Hasat sonrası ilk ve en kritik aşama olan kayısı kurutma süreci, Malatya ilinde günümüzde büyük ölçüde geleneksel yöntemlere dayanmaktadır. Açık alanlarda güneş altında gerçekleştirilen kurutma işlemleri, düşük yatırım maliyeti avantajı sağlamakla birlikte, kalite standardizasyonu ve hijyen açısından önemli sorunlar barındırmaktadır. Kurutma sürecinde sıcaklık, nem ve süre gibi faktörlerin kontrol edilememesi, ürün kalitesinde homojenliğin sağlanmasını güçleştirmekte; bu durum özellikle yüksek gelirli pazarlara yönelik ihracatta kalite risklerini artırmaktadır.

Kükürtleme uygulamaları, kuru kayısının üretim sonrası süreçlerinde hem kalite hem de pazara erişim açısından kritik bir rol oynamaktadır. Kükürt dioksit kullanımı, ürünün rengini koruma ve raf ömrünü uzatma açısından önemli avantajlar sağlasa da, uygulama miktarındaki düzensizlikler uluslararası pazarlarda kalıntı sorunlarına yol açabilmektedir. Özellikle Avrupa Birliği ve Kuzey Amerika pazarlarında uygulanan sıkı gıda güvenliği standartları, kükürtleme süreçlerinde izlenebilirlik ve kontrol mekanizmalarının güçlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Depolama altyapısı, kayısı değer zincirindeki en zayıf halkalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Üreticilerin önemli bir bölümü, ürünlerini kısa süre içerisinde elden çıkarmak zorunda kalmakta; bu durum pazarlama sürecinde üretici aleyhine fiyat oluşumuna neden olmaktadır. Soğuk hava depoları ve lisanslı depoculuk sistemlerinin sınırlı düzeyde yaygınlaşmış olması, arzın zamana yayılmasını ve fiyat dalgalanmalarının dengelenmesini güçleştirmektedir. Depolama yetersizlikleri, aynı zamanda kalite kayıplarını da beraberinde getirmektedir.

İşleme ve ambalajlama aşamaları, kuru kayısının katma değer yaratma potansiyelinin en yüksek olduğu alanlar arasında yer almaktadır. Buna karşın mevcut yapıda, kayısının önemli bir bölümü ham veya yarı işlenmiş ürün olarak ihraç edilmekte; ileri işleme teknikleriyle üretilen katma değerli ürünlerin payı sınırlı kalmaktadır. Dilimlenmiş, kaplamalı, organik sertifikalı veya fonksiyonel gıda niteliği taşıyan ürünlerin üretimi, hem iç pazarda hem de ihracatta daha yüksek birim fiyatlar elde edilmesine imkan tanıyabilecek potansiyele sahiptir.

Değer zincirinde katma değer dağılımı incelendiğinde, üreticilerin zincirin en düşük gelir payını aldığı görülmektedir. Ürün, tarladan nihai tüketiciye ulaşana kadar geçtiği aşamalarda değer kazanmakta; ancak bu değer büyük bölümü aracılar, işleyiciler ve ihracatçılar tarafından elde edilmektedir. Üreticilerin pazarlama sürecindeki zayıf örgütlenme düzeyi ve sınırlı pazarlık gücü, bu yapısal dengesizliğin temel nedenleri arasında yer almaktadır. Bu

durum, üreticilerin gelir istikrarını zayıflatmakta ve sektörde sosyal sürdürülebilirlik açısından risk oluşturmaktadır.

Kooperatifleşme ve üretici birlikleri, değer zincirindeki bu dengesiz yapının düzeltilmesi açısından önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır. Ancak Malatya ilinde kayısı üreticilerinin örgütlenmesi, nicelik ve etkinlik açısından istenilen düzeyin gerisindedir. Mevcut kooperatiflerin önemli bir bölümü, girdi temini ve sınırlı pazarlama faaliyetleriyle sınırlı kalmakta; işleme, markalaşma ve ihracat gibi yüksek katma değerli alanlarda yeterince etkin rol üstlenememektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Malatya kayısının üretim sonrası süreçleri ve değer zinciri yapısı, önemli katma değer fırsatları barındırmakla birlikte, bu potansiyelin büyük ölçüde atıl kaldığını göstermektedir. Geleneksel kurutma yöntemleri, yetersiz depolama altyapısı, sınırlı işleme kapasitesi ve üretici aleyhine işleyen değer dağılımı, sektörün yapısal sorunları arasında yer almaktadır. Bu sorunların aşılması, Malatya kayısının küresel rekabet gücünü artırmak ve üretici refahını güçlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.

5. İklim Değişikliği, Arz Şokları Ve Ekonomik Etkiler

Malatya kayısının üretim ve ticaret yapısını belirleyen en kritik dışsal faktörlerin başında iklim değişikliği gelmektedir. Son yıllarda iklim rejiminde gözlenen düzensizlikler, özellikle sıcaklık artışları ve mevsim geçişlerindeki belirsizlikler, kayısı üretimini doğrudan etkileyen risk unsurlarını belirgin biçimde artırmıştır. Kayısı, erken çiçeklenen bir meyve türü olması nedeniyle ilkbahar geç donlarına karşı son derece hassas bir yapıya sahiptir. Bu özellik, Malatya kayısını iklim kaynaklı arz şoklarına açık hale getirmektedir.

Son yirmi yıllık döneme bakıldığında, Malatya'da ilkbahar geç donu olaylarının hem sıklığında hem de şiddetinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Özellikle mart ve nisan aylarında yaşanan ani sıcaklık düşüşleri, çiçeklenme dönemine giren kayısı ağaçlarında ciddi rekolte kayıplarına yol açmaktadır. Bazı yıllarda üretim kayıplarının %70-90 seviyelerine ulaştığı; hatta belirli havzalarda neredeyse tam ürün kaybının yaşandığı dönemler söz konusu olmuştur. Bu tür aşırı arz şokları, yalnızca üreticileri değil, tüm değer zincirini etkileyen ekonomik sonuçlar doğurmaktadır.

İklim kaynaklı üretim kayıpları, Malatya kayısında arz miktarında ani ve sert dalgalanmalara neden olmaktadır. Rekoltenin keskin biçimde düştüğü yıllarda, iç ve dış piyasalarda fiyatlar hızla yükselmekte; ancak bu fiyat artışı, ürün arzının son derece sınırlı olması nedeniyle üreticilerin gelir kayıplarını telafi etmekte yetersiz kalmaktadır. Buna karşılık rekoltenin yüksek olduğu yıllarda ise arz fazlası baskısı fiyatları aşağı çekmekte ve üretici gelirlerinde yine

istikrarsızlık yaratmaktadır. Bu yapı, kayısı sektöründe fiyat-gelir ilişkisinin zayıf ve dengesiz bir karakter taşımasına yol açmaktadır.

Arz şoklarının ekonomik etkileri, yalnızca üretici gelirleriyle sınırlı değildir. İhracat cephesinde yaşanan ani daralmalar, Türkiye'nin kuru kayısı pazarlarındaki tedarikçi güvenilirliğini zedeleyebilmektedir. Büyük alıcılar açısından arz sürekliliği, fiyat düzeyinden bağımsız olarak temel bir tercih kriteri haline gelmiştir. Bu nedenle üretimde yaşanan sert dalgalanmalar, Malatya kayısının uzun vadeli pazar payı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Arz güvenilirliğinin zayıflaması, uluslararası alıcıların alternatif tedarikçi ülkelere yönelmesini hızlandırmaktadır.

İklim değişikliğinin dolaylı etkileri de kayısı üretimi açısından giderek daha görünür hale gelmektedir. Artan sıcaklıklar ve değişen yağış rejimleri, zararlı ve hastalık baskısını artırmakta; bu durum hem verim hem de kalite üzerinde ilave riskler oluşturmaktadır. Zararlılarla mücadelede artan kimyasal kullanım ihtiyacı, üretim maliyetlerini yükseltirken çevresel sürdürülebilirlik açısından da yeni sorun alanları doğurmaktadır. Bu süreç, kayısı üretiminin ekolojik ayak izini büyüten bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

İklim kaynaklı risklerin ekonomik etkileri, mevcut üretim yapısındaki kırılganlıklarla birleştiğinde daha da derinleşmektedir. Küçük ölçekli işletme yapısı, sınırlı finansal dayanıklılık ve yetersiz risk yönetimi araçları, üreticilerin iklim şoklarına karşı uyum kapasitesini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. TARSİM gibi tarımsal sigorta mekanizmalarının varlığı önemli olmakla birlikte, sigorta kapsamı ve etkinliğinin üreticiler nezdinde yeterli düzeye ulaşmadığı görülmektedir. Bu durum, iklim risklerinin ekonomik yükünün büyük ölçüde üreticiler üzerinde kalmasına neden olmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, iklim değişikliği ve buna bağlı arz şokları, Malatya kayısının mevcut üretim ve pazarlama modelinin sürdürülebilirliğini ciddi biçimde tehdit etmektedir. Üretimde yaşanan aşırı dalgalanmalar, gelir istikrarsızlığını derinleştirmekte; dış ticarete güvenilir tedarikçi imajını zayıflatmaktadır. Bu tablo, iklim risklerinin yalnızca teknik bir tarım sorunu değil, aynı zamanda ekonomik ve politik bir mesele olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

6. Küresel Rekabet, Pazar Yapısı Ve Stratejik Konumlanma

Malatya kayısının uzun yıllar boyunca sürdürdüğü küresel liderlik konumu, dünya kuru kayısı piyasasında oluşan yeni dinamikler karşısında giderek daha karmaşık bir rekabet ortamı içerisinde yeniden şekillenmektedir. Türkiye, tarihsel olarak dünya kuru kayısı üretim ve ihracatının merkezinde yer almış; Malatya ili bu yapının temel taşı olmuştur. Ancak son dönemde üretici ve

ihracatçı ülkelerin sayısındaki artış, küresel pazarın yapısını daha çok aktörlü ve rekabetçi bir düzleme taşımıştır.

Küresel kuru kayısı piyasasında rekabet, yalnızca üretim miktarı üzerinden değil; maliyet yapısı, kalite standardı, arz sürekliliği ve ticari güvenilirlik gibi çok boyutlu unsurlar üzerinden şekillenmektedir. Özbekistan, Tacikistan ve Kırgızistan gibi Orta Asya ülkeleri, devlet destekli tarımsal kalkınma programları, genç bahçe tesisleri ve düşük işçilik maliyetleri sayesinde özellikle fiyat odaklı pazar segmentlerinde hızla güç kazanmaktadır. Bu ülkelerin ihracat kapasitelerini kısa sürede artırabilmeleri, küresel arz yapısında Türkiye'nin göreceli ağırlığını azaltma potansiyeli taşımaktadır.

İran ve İspanya gibi ülkeler ise daha sınırlı hacimlerle üretim yapmalarına rağmen, belirli kalite segmentlerinde Türkiye'ye rakip konumda bulunmaktadır. Bu ülkeler, özellikle organik üretim, düşük kükürt kullanımı ve işlenmiş ürün çeşitliliği gibi alanlarda farklılaşma stratejileri izlemektedir. Bu durum, küresel kuru kayısı piyasasının homojen bir yapıdan ziyade, farklı pazar segmentlerinin oluştuğu çok katmanlı bir yapıya evrildiğini göstermektedir.

Pazar yapısındaki bu dönüşüm, Malatya kayısının rekabet stratejisinin nicelik temelli bir yaklaşımdan nitelik ve güvenilirlik odaklı bir yaklaşıma evrilmesini zorunlu kılmaktadır. Arz sürekliliği, izlenebilirlik, gıda güvenliği standartlarına uyum ve marka değeri, küresel alıcılar açısından giderek daha belirleyici hale gelmektedir. Bu bağlamda, üretimde yaşanan arz dalgalanmaları ve kalite istikrarsızlığı, Malatya kayısının rekabet gücünü sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır.

Uluslararası ticarete alıcı profili de önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Büyük perakende zincirleri ve çok uluslu gıda firmaları, uzun vadeli tedarik sözleşmeleri ve standartlaştırılmış ürün talebi ile piyasada belirleyici aktörler haline gelmiştir. Bu yapı, küçük ölçekli ve dağınık üretim yapısına sahip sektörler açısından uyum baskısını artırmaktadır. Malatya kayısında üretici örgütlenmesinin ve sözleşmeli üretim modellerinin sınırlı düzeyde kalması, bu yeni pazar yapısına uyum sürecini zorlaştırmaktadır.

Stratejik konumlanma açısından değerlendirildiğinde, Malatya kayısının sahip olduğu coğrafi işaret, uzun yıllara dayanan kalite algısı ve küresel bilinirlik önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak bu avantajların sürdürülebilir rekabet üstünlüğüne dönüştürülebilmesi, bütüncül bir stratejik yaklaşımı gerektirmektedir. Ürünün yalnızca ham madde olarak değil, markalı ve katma değerli ürünler şeklinde pazara sunulması; ihracatta pazar çeşitlendirmesinin artırılması ve kalite–arz istikrarının sağlanması, bu stratejinin temel bileşenleri arasında yer almaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, küresel kuru kayısı piyasasında artan rekabet, Malatya kayısının mevcut konumunu otomatik olarak koruyabileceği bir yapıdan uzaklaşmıştır. Liderliğin sürdürülebilirliği, üretimden pazarlamaya uzanan tüm zincirin yeniden yapılandırılmasına ve stratejik bir vizyonla yönetilmesine bağlıdır. Aksi halde Malatya kayısının küresel pazardaki ağırlığının zaman içerisinde aşınması kaçınılmaz bir risk olarak ortaya çıkmaktadır.

7. Politika Araçları, Destek Mekanizmaları Ve Stratejik Öneriler

Malatya kayısının karşı karşıya olduğu yapısal sorunlar, iklim riskleri ve artan küresel rekabet baskısı, sektörün kendiliğinden işleyen piyasa mekanizmalarıyla sürdürülebilir bir dengeye ulaşmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle kayısı sektöründe uygulanacak politika araçları ve destek mekanizmaları, yalnızca kısa vadeli gelir kayıplarını telafi etmeye yönelik değil; uzun vadeli yapısal dönüşümü destekleyen, bütüncül ve stratejik bir çerçevede ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, tarım politikalarının sosyal refah, rekabet gücü ve gıda güvenliği hedefleriyle uyumlu biçimde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Üretim aşamasına yönelik politika araçları, Malatya kayısının sürdürülebilirliğinin temelini oluşturmaktadır. Bahçe yenileme ve gençleştirme programları, bu kapsamda öncelikli politika alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Yaşlanan bahçelerin verim ve kalite üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alındığında, üreticilere yönelik uzun vadeli ve geri ödemesiz fidan destekleri ile düşük faizli yatırım kredilerinin yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca iklim değişikliğine daha dayanıklı, geç çiçeklenen ve yüksek verimli çeşitlerin kullanımını teşvik eden destekleme modelleri, arz istikrarının sağlanması açısından kritik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

İklim risklerine karşı geliştirilecek politika araçları, kayısı sektöründe risk yönetiminin güçlendirilmesini hedeflemelidir. TARSİM kapsamındaki sigorta ürünlerinin kayısı üretimine özgü riskleri daha etkin biçimde kapsayacak şekilde yeniden yapılandırılması; don, dolu ve aşırı hava olaylarına karşı teminat kapsamının genişletilmesi bu çerçevede önem arz etmektedir. Sigorta prim destek oranlarının artırılması ve küçük ölçekli üreticiler için erişilebilirliğin güçlendirilmesi, risk paylaşımının daha adil bir yapıya kavuşmasına katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra erken uyarı sistemleri ve meteorolojik veri altyapısının güçlendirilmesi, önleyici politika yaklaşımının tamamlayıcı unsurları arasında yer almaktadır.

Üretim sonrası süreçlere yönelik politika araçları, katma değer yaratma kapasitesinin artırılmasına odaklanmalıdır. Modern kurutma tesisleri, hijyenik

işleme altyapıları ve ileri ambalajlama teknolojilerine yönelik hibe ve yatırım teşvikleri, ürün kalitesinin standardizasyonunu sağlayarak yüksek gelirli pazarlara erişimi kolaylaştıracaktır. Lisanslı depoculuk sistemlerinin yaygınlaştırılması, üreticilerin ürünlerini daha uzun süre muhafaza edebilmelerine ve pazarlama sürecinde fiyat dalgalanmalarına karşı daha güçlü bir konum elde etmelerine imkan tanıyacaktır. Bu bağlamda enerji, kira ve finansman destekleriyle desteklenen depolama yatırımları, arz yönetiminin etkinliğini artıracak politika araçları arasında yer almaktadır.

Değer zinciri içinde üretici lehine bir denge kurulabilmesi, örgütlenme ve kurumsal kapasitenin güçlendirilmesine bağlıdır. Üretici birlikleri ve kooperatiflerin yalnızca girdi teminiyle sınırlı olmayan, işleme, markalaşma ve ihracat faaliyetlerini de kapsayan çok işlevli yapılara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm sürecinde kamu desteklerinin performans ve sonuç odaklı biçimde tasarlanması, örgütlerin etkinliğini artıracaktır. Ayrıca sözleşmeli üretim modellerinin yaygınlaştırılması, üretici–sanayici–ihracatçı ilişkilerinde belirsizliği azaltarak arz sürekliliğine katkı sağlayacaktır.

Dış ticaret ve pazar geliştirme politikaları, Malatya kayısının küresel rekabet gücünü destekleyen bir diğer önemli politika alanıdır. İhracatta pazar çeşitlendirmesini teşvik eden destek programları, belirli pazarlara aşırı bağımlılığın azaltılmasına katkı sunacaktır. Katma değerli ürün ihracatına yönelik prim ve vergi teşvikleri, sektörün nicelikten ziyade nitelik odaklı bir büyüme stratejisine yönelmesini teşvik edebilir. Bununla birlikte coğrafi işaretin uluslararası düzeyde korunması ve etkin biçimde denetlenmesi, Malatya kayısının marka değerinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Mevzuat ve kurumsal düzenlemeler, politika araçlarının etkinliğini belirleyen temel çerçeveyi oluşturmaktadır. Kükürtleme ve kalite standartlarına ilişkin düzenlemelerin izlenebilirlik esaslı bir yapıya kavuşturulması, gıda güvenliği risklerini azaltırken uluslararası pazarlarda güvenilirliği artıracaktır. Ayrıca tarım–sanayi entegrasyonunu güçlendiren mevzuat düzenlemeleri, kayısı sektöründe değer zinciri bütünlüğünü destekleyebilir. Bu bağlamda kamu kurumları, yerel yönetimler ve sektör paydaşları arasında koordinasyonun artırılması, politika uygulamalarının başarısı açısından belirleyici olacaktır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Malatya kayısına yönelik politika araçları ve destek mekanizmaları, kısa vadeli müdahalelerden ziyade uzun vadeli stratejik hedeflerle uyumlu biçimde tasarlanmalıdır. Üretimden pazarlamaya uzanan tüm aşamaları kapsayan bütüncül bir politika yaklaşımı, sektörün iklim değişikliği ve küresel rekabet koşulları altında sürdürülebilirliğini güçlendirecektir. Bu yaklaşım, Malatya kayısının yalnızca mevcut liderliğini

korumasını değil, aynı zamanda yüksek katma değerli ve istikrarlı bir tarımsal ihracat modeli olarak yeniden konumlanmasını mümkün kılacaktır.

8. Sonuç Ve Değerlendirme

Bu kitap bölümünde Malatya kayısının üretimden pazarlamaya uzanan bütüncül yapısı; ekonomik, kurumsal ve politik boyutlarıyla ele alınmıştır. Çalışma, Malatya kayısının yalnızca yüksek ihracat hacmiyle tanımlanabilecek bir tarımsal ürün olmadığını; aynı zamanda bölgesel kalkınma, dış ticaret dengesi ve tarım politikaları açısından stratejik bir değer taşıdığını ortaya koymaktadır. Ancak bu stratejik konum, mevcut üretim ve pazarlama yapısı içinde kendiliğinden sürdürülebilir değildir.

Analizler, Malatya kayısının üretim cephesinde küçük ölçekli işletme yapısı, yaşlanan bahçeler, sınırlı yenileme oranları ve iklim değişikliğine yüksek duyarlılık gibi yapısal sorunlarla karşı karşıya olduğunu göstermektedir. Bu sorunlar, yalnızca verimlilik kayıplarına değil; aynı zamanda üretici gelirlerinde belirgin bir istikrarsızlığa yol açmaktadır. Özellikle iklim kaynaklı arz şoklarının sıklık ve şiddetinin artması, mevcut üretim modelinin kırılganlığını daha görünür hale getirmiştir.

Üretim sonrası süreçler ve değer zinciri yapısı incelendiğinde, Malatya kayısının sahip olduğu katma değer potansiyelinin önemli ölçüde atıl kaldığı görülmektedir. Geleneksel kurutma yöntemleri, yetersiz depolama altyapısı ve sınırlı işleme kapasitesi, ürün kalitesi ve fiyat istikrarı üzerinde kısıtlayıcı bir etki yaratmaktadır. Değer zinciri boyunca yaratılan katma değerın büyük ölçüde üretici dışındaki aktörler tarafından paylaşılması, sektörde ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik açısından dikkat edilmesi gereken bir tablo ortaya koymaktadır.

Küresel rekabet koşulları, Malatya kayısının uzun yıllar boyunca sahip olduğu liderliğin artık otomatik olarak korunamayacağını açık biçimde göstermektedir. Orta Asya ülkeleri başta olmak üzere yeni üretici ülkelerin yükselişi, küresel pazarın daha rekabetçi ve segmentlere ayrılmış bir yapıya dönüşmesine yol açmaktadır. Bu bağlamda Malatya kayısının geleceği, nicelik temelli bir üretim anlayışından ziyade kalite, güvenilirlik, arz sürekliliği ve markalaşma ekseninde şekillenecek stratejik tercihlere bağlıdır.

Bu çalışma, politika araçları ve destek mekanizmalarının sektörün kısa vadeli sorunlarına tepki veren geçici müdahaleler olarak değil; uzun vadeli yapısal dönüşümü hedefleyen stratejik unsurlar olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bahçe yenileme ve çeşit politikaları, iklim risklerine karşı etkin sigorta ve erken uyarı sistemleri, üretim sonrası altyapı yatırımları, üretici örgütlenmesinin güçlendirilmesi ve katma değerli ihracatın teşviki, bu

dönüşümün temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu alanlarda sağlanacak eşgüdümlü ilerleme, Malatya kayısının sürdürülebilir rekabet gücünü destekleyecektir.

Sonuç olarak Türkiye kuru kayısının geleceği, yalnızca tarımsal üretim kararlarının değil; aynı zamanda ekonomi politikası, ticaret stratejileri ve bölgesel kalkınma yaklaşımlarının birlikte ele alındığı bir ekseninde şekillenmektedir. Bu kitap bölümünde ortaya konulan analiz ve değerlendirmeler, Malatya ili ve çevresine yetiştirilen ve Türkiye kuru kayısı pazarının temelini oluşturan ildeki kayısı piyasasının mevcut kırılganlıklarını aşarak yüksek katma değerli, istikrarlı ve dirençli bir tarımsal ihracat modeli haline gelmesi için politika yapıcılara ve sektör paydaşlarına analitik bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

Kaynaklar

- Aksoy, A., & Yavuz, F. (2012). Tarım ekonomisi. Ankara: Efil Yayınevi.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2> Erişim tarihi: 6 Kasım 2025.
- Arısal, İ. (2009). Kayısı ihracatının geliştirilmesinde Malatya'daki işletmelerin yeri ve önemi (Master's thesis, Inonu University (Turkey)).
- Aslan, A. (2022). Malatya ilinde kuru kayısı üretim ve pazarlama etkinliğinin belirlenmesi (doctoral dissertation, Atatürk Üniversitesi).
- Asma, B. M. (2007). Kayısı yetiştiriciliği ve ıslahı. Malatya: İnönü Üniversitesi Yayınları.
- Duymuş, D. (2023). Kuru Kayısı Ihracatını Etkileyen Kalite Parametreleri ve Ihracatçı Firmalarının Kalite Düzeyinin Belirlenmesi (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- FAO. (2018). Strengthening value chains for agricultural products. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org> Erişim tarihi: 3 Kasım 2025.
- FAO. (2019). Climate change and agriculture: Impacts, adaptation and mitigation. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org> Erişim tarihi: 21 Kasım 2025.
- FAO. (2022). FAOSTAT statistical database. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat> Erişim tarihi: 9 Kasım 2025.
- Gündüz, O., Aslan, A., Ceyhan, V., & Bayramoğlu, Z. (2020). Malatya kuru kayısı üreticiliği ekonomisi. Ankara: Nobel Bilimsel Eserler
- Gündüz, O., Aslan, A., & Yıldırım, Ç. (2023). Malatya İlinde Küçük Ölçekli Üretim Yapan Kayısı İşletmelerinin Sosyo-Ekonomik Özellikleri. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 9(EKS 1), 40-50.
- INC. (2024). <https://inc.nutfruit.org/inc-statistical-yearbook-now-published-key-insights-available-to-members/> Erişim Tarihi: 12.11.2025
- IPCC. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch> Erişim tarihi: 27 Kasım 2025.
- ITC. (2025). International Trade Center, TradeMap Veri tabanı, <https://www.intracen.org/> Erişim tarihi: 10.11.2025
- OECD. (2020). Agricultural policy monitoring and evaluation. Paris: OECD Publishing. <https://www.oecd.org/agriculture> Erişim tarihi: 14 Kasım 2025.

- OECD. (2021). Making climate adaptation work in agriculture. Paris: OECD Publishing. <https://www.oecd.org> Erişim tarihi: 8 Kasım 2025.
- OECD. (2023). Rebuilding agricultural resilience in the face of climate change. Paris: OECD Publishing. <https://www.oecd.org/agriculture> Erişim tarihi: 25 Kasım 2025.
- Tapan, İ. (2023). Malatya İlindeki Coğrafi İşaretili Ürünlerin Değerlendirmesi. Fikriyat, 3(1), 41-64.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2021). Türkiye tarım ürünleri destekleme politikaları. Ankara. <https://www.tarimorman.gov.tr> Erişim tarihi: 5 Kasım 2025.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023). Bitkisel üretim istatistikleri. Ankara. <https://www.tarimorman.gov.tr> Erişim tarihi: 19 Kasım 2025.
- TEPGE (2024). Kayısı ürün Raporu 2024, Yayın no: 401 ISBN: 978-625-97549-5-6
- TÜİK. (2022). Bitkisel üretim istatistikleri. Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu. <https://www.tuik.gov.tr> Erişim tarihi: 11 Kasım 2025.
- TÜİK. (2023). Dış ticaret istatistikleri. Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu. <https://www.tuik.gov.tr> Erişim tarihi: 29 Kasım 2025.
- World Bank. (2020). Agriculture and food global practice: Policy note. Washington, DC: World Bank. <https://www.worldbank.org> Erişim tarihi: 7 Kasım 2025.
- World Bank. (2021). Transforming agriculture for climate resilience. Washington, DC: World Bank. <https://www.worldbank.org> Erişim tarihi: 23 Kasım 2025.

8. Bölüm

Türkiye’de ve Dünyada Su Kıtlığı ile Mücadele

Ali Beyhan UÇAK¹

1. Giriş

Meteorolojik özellikteki doğal afetler arasında kuraklık, en geniş etkiye sahip olan afet türüdür. İklim değişikliği ve bunun sonucu oluşan kuraklık, artan dünya nüfusu, tek başına israf, su kaynaklarını sürekli tehdit altında bırakmaktadır. Su kaynaklarının giderek azalmaya başlaması, küresel susuzluk tehlikesini artırmaktadır. Nüfus artışıyla birlikte bu sınırlı su kaynaklar üzerindeki talep artmakta ve suyun sürdürülebilir yönetimini zorlaştırmaktadır (Dalkılıç ve ark., 2024). Yakın gelecekte de dünyada özellikle kurak ve yarıkurak bölgelerinde yer alan ülkelerin su kaynaklarına ulaşmasında büyük sorunlar yaşanacaktır ve bu su kıtlığının sosyal, ekonomik ve politik yaşama olan olumsuz etkilerini vazgeçilmez bir hale getirecektir. İklim değişikliğinin etkilerinin hissedildiği günümüzde, tarımsal üretim için daha etkili su kaynaklarının kullanılması ve geleceğe yönelik stratejilerin geliştirilmesi önem taşımaktadır (Baydar ve ark., 2025a). Küresel su kıtlığının ana nedenleri, yenilenebilir kaynak miktarının kıtlığı, yüksek nüfus artışının kişi başına düşen kaynakları azaltması ve sürdürülebilir su yönetimi ilkelerine aykırı faaliyetler şeklinde sıralanabilir. Yenilenebilir su kaynaklarının üzerindeki tüketim, yeraltı su seviyelerinde düşüşlere yol açarak kullanılabilir su kaynaklarını hızla azalmaktadır. Nüfus yoğunluğunun artması ve su kaynaklarının dünya genelinde dengesiz dağılması kişi başına düşen su miktarını azaltmaktadır. Ayrıca artan nüfus, yoğun kentleşme ve kişi başına düşen su tüketiminin artması nedeniyle suya olan talep mevcut su kaynaklarını sürekli kirletmektedir (Aydın ve ark., 2017a).

Anonim (2025), 2050’ ye kadar her 4 kişiden en az 1’i, kronik veya tekrarlayan tatlı su kıtlığından etkilenen bir ülkede yaşayacak. 2,3 milyar insan temel temizlik hizmetlerinden yoksun yaşıyor. Son veriler gösteriyor ki; harekete geçilmediği takdirde yoksul ve gelişmekte olan ülkelerdeki 135 milyon insanın daha yaşamının ciddi tehdit altında olacağını gösteriyor. Sektör bazında

¹ Prof. Dr.; Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye
ORCID No: 0000-0003-4344-2848

küresel su tüketimi incelendiğinde %69 gıda ve tarım, %19'u enerji ve endüstriyel sektörler, %12'si ise içme suyu ve evsel kullanımda harcanıyor.

Yeryüzünde 1 milyar insan, bizim evlerimizde her an ulaşabildiğimiz su için, ortalama 6 saat su yolculuğu yapıyor. Üstelik çoğu zaman bu su, temiz ve içilebilir bile değil. Birleşmiş Milletler verilerine göre, her 9 saniyede 1 çocuk kirli sudan dolayı yaşamını yitiriyor. Temiz içme suyu kullanamayanların yarısından fazlası Afrika kıtasında yaşıyor (Anonim, 2025).

2. SU KİTLİĞİ VE KURAKLIK KAVRAMLARI

2.1. Su Kıtlığı Kavramı

Dünya genelinde su kaynakları, miktar ve dağılım açısından eşitsiz ve sınırlıdır (Dalkılıç ve ark., 2025). Beşeri faktörler ve doğal sebeplerin olumsuz etkileri sonucunda su kıtlığı ortaya çıkabilmektedir. Artan nüfus, çarpık kentleşme, endüstriyel atıklar, su ihtiyacını artırarak ve suyun niteliğini düşürerek su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Yeryüzündeki su miktarı çok eski zamanlardan günümüze kadar değişmemiş olmasına rağmen nüfus artışı, kentleşme, tarımsal ve endüstriyel üretim ile su kullanım ihtiyacı artmakta; su kaynakları üzerindeki etkisi büyümektedir. Su döngüsündeki bozulmalar ve artan istekler dünyada su kıtlığına sebep olan arz-talep arasındaki bozuklukları ortaya çıkarmaktadır. Arz-talep arasındaki bozukluk dolayısı ile uluslararası düzeyde su kıtlığı, “tüm su kullanıcılarının suyun tedarikine veya kalitesine yönelik taleplerinin tam olarak karşılanamayacağı nokta” olarak da tanımlanmaktadır. Su kıtlığının en kritik sonucu, suya olan insan isteğinin karşılanamaması ve üretimi de içeren çok çeşitli insan faaliyetlerinde suya bağlı engeller oluşmasıdır.

Bu bağlamda ilk akla gelen de su kıtlığı sonucu içme suyuna erişim sorunudur. Kuraklık, temel hijyen olanaklarını sınırlandırması ile birlikte, tarım, ticaret ve sanayi faaliyetlerini de olumsuz etkileyerek sosyoekonomik sorunlara yol açabilir. Temel hijyen olanaklarının sağlanamaması, toplumlarda yaygın sağlık sorunlarına ve bulaşıcı hastalıklara yol açabilir. Suyun çok kısıntılı olması, toplumun evsel su kullanımı ile tarım ve sanayinin su ihtiyacı arasında yarışan bir istek ortaya çıkarabilir ve bu durum toplumsal kargaşalara yol açabilir. Su kıtlığı, yer altı su kaynaklarından aşırı çekime neden olarak, bu havzalardaki ekosistemlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini bozabilir ve canlı çeşitliliğini azaltabilir. Bu durumun en önemli sonuçlarından biri, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliğinin kalıcı olarak bozulması ve çölleşme riskinin artmasıdır (Duman ve Aktel, 2024; Aydın, 2017b).

3. KURAKLIK

Bir bölgede nem miktarındaki geçici çok büyük farklılıkların o bölgedeki su kıtlığı ile etkileşimli olarak kısaca tanımladığımız kuraklık kendiliğinden oluşan bir iklim olayıdır ve yer ve zaman belirtmeden meydana gelebilir. Kuraklık, sayılan otuz bir kadar doğal afet içerisinde pek çok araştırmacıya göre en önemli doğal afettir. Kuraktan nemli iklim tiplerine kadar her yerde görülebilir. Bununla beraber kurak iklimler nem eksikliğinden ve yüksek değişkenlikteki yağış rejimlerinden dolayı kuraklığa karşı daha hassas konumdadırlar. Daha önce görülmemiş doğal olaylar içerisinde kuraklık çoğunlukla yavaş gelişir, sıklıkla uzun bir süreklilik gösterir ve atmosferik tehditler içinde tahmini en az olanı olması ile beraber etkileri çok geniştir (Kaplukan., 2013). Uzun süreli kuru hava nem azlığı yaratarak bitki, orman ve su kaynaklarında azalmaya sebep olur ve bu havanın etkisi ile, ciddi çevresel, sosyoekonomik sorunlar ortaya çıkar.

Afrika'da kadınlar ve çocuklar ortama 6 kilometre su yolculuğu yapıyor. Her gün evine su getirebilmek için bu yolculuğu yapmak zorunda üstelik kadınlar tecavüze uğrama ve vahşi hayvan saldırısıyla karşılaşma ihtimaliyle yüzleşiyorlar. Bu coğrafyalar da bir bardak su için tehlikelerle dolu yürüyüş yapan milyonlarca insan varken küresel su tüketimi gün geçtikçe artıyor (Anonim, 2025).

3.1. Kuraklık Çeşitleri

3.1.1. Meteorolojik Kuraklık

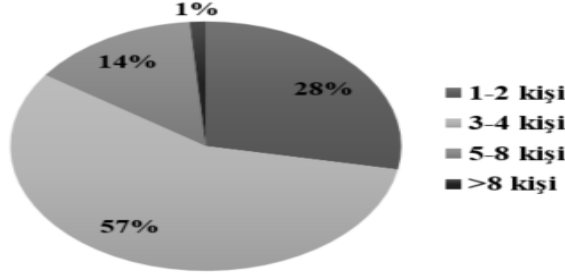
Belirli bir bölgede uzun bir dönem boyunca gözlemlenen yağış miktarının, o bölgenin uzun yıllar ortalamasının belirgin derecede normal değerlerin altına düşmesi durumuna meteorolojik kuraklık denir. Nem azlığının değeri ve sürekliliği meteorolojik kuraklığı belirler ve bölgelere göre değişkenlik göstermektedir.

3.1.2. Tarımsal Kuraklık

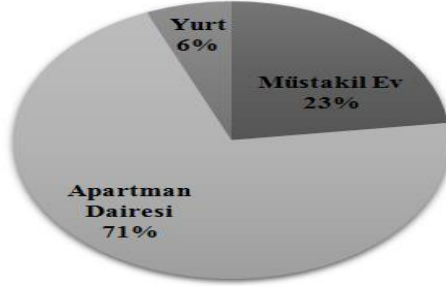
Tarımsal kuraklık, meteorolojik kuraklığın çeşitli özellikleri ile etkileşim gösteren karmaşık bir olgudur. Toprakta bitkinin ihtiyacını karşılayacak miktarda su bulunmaması olarak tanımlanan tarımsal kuraklık nem kaybı ve su kaynaklarında kıtlık olduğu zaman meydana gelir. Ürün miktarında azalmaya, büyümelerinde değişime ve hayvanlar için tehlikeye sebep olur (Gümüş ve ark., 2018).

3.1.3. Hidrolojik Kuraklık

Hidrolojik kuraklık, düşük yağış miktarının su kaynakları üzerindeki etkilerini yansıtan bir durum olup, yer altı su seviyeleri, akarsu akımları ve göl seviyelerindeki düşüşler ile ilişkilidir. Meteorolojik kuraklığın uzun bir süre devam etmesi durumunda yüzeysel ve yer altı su kaynakları seviyelerinde düşüşlere sebep olarak hidrolojik kuraklığa yol açar (Uçak ve ark., 2024). Uzun süreli yağış azlığının kaynak seviyeleri, yüzey akışı ve toprak nemi gibi hidrolojik sistemin unsurlarında kendisini göstermesidir. Yeraltı suları, nehirler ve göllerin seviyesinde hızla düşüşe sebep olur. Hidrolojik kuraklığın başlıca nedeni iklim olmasına rağmen arazi kullanımı (örneğin ağaç kesimi), arazinin verimsizleşmesi bölgenin hidrolojik parametrelerini dönüştürür. İnsan aktiviteleri; arazi kullanımında değişim meydana getirdiği için meteorolojik kuraklığın frekansında değişim olmadığı halde su kıtlığının frekansında değişim meydana getirmesinden dolayı en önemli etken olarak gözlenmiştir. Bölgeler hidrolojik sistemleri ile birbirine bağlı oldukları için meteorolojik kuraklığın etkisi ile yağış kıtlığı yaşanan alanların sınırları daha genişleyebilir (Gümüş ve ark., 2018). Sulak alanların insan hayatı ve ekosistem üzerindeki önemine rağmen bazı nedenlerle sulak alanlarda kurutma çalışmaları yapılmıştır. Özellikle 1950-70 yılları arasında Türkiye’de su taşkınlarını önlemek, sıtmayla mücadele etmek ve yeni tarımsal alanlar açmak nedeni ile resmi kuruluşlar tarafından 93.582 ha’lık 21 adet sulak alan kurutulmuş, 17 adet sulak alan ise kurumaya terk edilmiştir (Gürer ve Yıldız, 2008; Karakılçık ve Özcan, 2009). Fakat yapılan kurutma çalışmaları bölgelerin iklimsel dengelerini bozmuş, tarımsal açıdan ise istenilen verim elde edilememiştir (Önder, 2008, Yıldız Karakoç, 2017). Bu duruma gösterilebilecek en güzel örneklerden birisi Gavur gölüdür. Kahramanmaraş’ta bulunan göl ülkemizde göçmen kuşların son durak yeri olmasına rağmen yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı 1950’li yıllarda kurutulmuştur. Kurutulan göl alanları zamanla tarımsal faaliyetlere açılrsa bile verim elde edilememiştir. 2005 yılında göl tekrardan geri kazandırılmaya çalışılsa da başarılı olunamamıştır (Güngör, 2013, 310-318). Şekil 1 ve 2’de Su Stresi, Su Kıtlığı ve Su Tasarrufu Hakkında Halkın Farkındalığının Belirlenmesi, Akdeniz Üniversitesi Örnek Çalışması verilmiştir.



Şekil 1. Hanede yaşayan kişi sayısı (Aydın ve ark., 2017).



Şekil 2. Katılımcıların yaşadıkları hane tipi (Aydın ve ark., 2017).

Türkiye’de Kuraklığın Tarihçesi

Türkiye’de Bu konuda yer ve zaman esaslarına dayalı analizler tam olarak yapılmamış olmakla birlikte 1927/28, 1956/57, 1959, 1970, 1972/73, 1977, 1982, 1984, 1989/90, 1994, 2000/01 ve 2006/07 yılları ülkemizin büyük bölümünde yağış açığının kritik boyutlara ulaştığı yıllar olarak saptanmıştır. Bilimsel çalışmalarla birlikte Osmanlı dönemi kayıtlarında da bazı kritik kurak yıllar tespit edilmiştir. 1845 yılında yaşanan kuraklık Ankara, Konya, Kastamonu, Sivas illerinde etkili olmuştur. 1846 yılında şiddeti daha da artmış, açlık ve salgın hastalıklar nedeniyle ölümler gözlenmeye başlamıştır. 1874-75 yıllarında gözlenen kuraklığın etkisi daha da büyük olmuştur. 1585-1640 tarihlerinde Anadolu’da yaşanan Celali isyanlarının sebebi de kuraklık olduğunu belirtilmektedir. Hicri 906, miladi 1501 yılında Anadolu’da büyük bir kuraklık sonucu kıtlık yaşandığı belirtilmektedir. Anadolu’da milattan önce 1800, 1300 ve 800’lü yıllarda yaşanan kuraklıklar da halkı zor durumda bırakmıştır. Hititler döneminde suya öyle önem veriliyordu ki temiz su kaynağını kirleten kişinin suçu ölümdü. Bu durum, Hititler ve bu topraklarda tarih boyunca yaşamış medeniyetlerin karşılaştığı en büyük problemin kuraklık olduğunu açıkça saptanmıştır (Ceylan ve ark., 2009;Ucak ve ark., 2024).

4. Sonuç

Su geçmişte olduğu gibi bugün de tüm canlıların hayatta kalması için vazgeçilmez bir doğal kaynaktır. Bu kaynağın yerine geçebilecek yapay bir madde yapmak mevcut bilimsel ilkeler çerçevesinde mümkün görülmemektedir. İşte bu nedenle de sınırlı olan su kaynaklarının kullanımı stratejik bir önem arz etmektedir. Teorik olarak su miktarı ne kadar azalırsa, kıymeti de o derece katlanarak artar. Su miktarında güncel çevresel faktörlerin etkisi dolayısı ile azalmalar ortaya çıkmaktadır. Bunlar arasında çevre kirlenmesi, su kaynaklarına kimyasal atıkların karışması, tuzlanma, tarım sonrası yeraltı sularının kirlenerek kullanım sahalarının azalması, bazı yörelerde iklim değişikliği sonucunda daha kurak zamanların hüküm sürmeye başlaması vb. sebeplerin etkisi ile de mevcut olan su kaynaklarında azalmalar vardır. Ayrıca tarımsal üretimde sulama açısından da riskler bulunmaktadır. İdeal koşullarda, iyi tasarlanmış bir sulama uygulaması her bir bitkiye neredeyse eşit miktarda su uygulayarak hem su gereksinimlerini karşılar hem de eş dağılım sağlar (Baydar ve ark., 2025b). Bunun için yeterli su kaynaklarına sahip olan alanlar bile entegre su yönetimi ilkelerine uygun olmayan planlama, projelendirme ve bakım faaliyetleri doğrultusunda hareket ettirildiğinde, orta vadede su kıtlığı riski ile karşı karşıya kalabilirler (Ceylan ve ark. 2009).

Kaynaklar

- Anonim (2025). Erişim Linki ve Tarihi (https://www.ideauniversal.org/empatiyuruyusu/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=grant&utm_content=su%20k%C4%B1tl%C4%B1%C4%9F%C4%B1&gad_source=1&gad_campaignid=7860349430&gbraid=0AAAAACmW14vWtpyH3zEQ1dujVGJ83qsl1&gclid=Cj0KCQiA6Y7KBhCkARIsAOxhqtOGfxXEPl6SVOEKxJUuakpXNoT5mrvpEuKfkpn1MYhvwLMKtaJq_saAliKEALw_wcB). (18. 12 .2025).
- Aydın, O., Ünalı, Ü. E., Duman, N., Çiçek, İ., & Türkoğlu, N. (2017a). Türkiye’de su kıtlığının mekânsal ölçekte değerlendirilmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (68), 11-18.
- Aydın, A. (2017b). Avrupa Birliği Üyesi Olarak Güney Kıbrıs’ta Su Kıtlığı İle Mücadele. *Erzincan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 25-34.
- Batan, M. (2021). Kuraklıkla mücadele eden Şanlıurfa ilinde su kullanımının planlanması: Su ayak izi analizleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(4), 2135-2150.
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., Özfidaner, M. 2025a. Simulating the Effects of Climatic Changes on Tomato Using Regional Climate Model and DSSAT Crop Simulation Model. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 9(2), 484–499. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15038117>.
- Baydar, A., Bozkurt Çolak, Y., Küçükyumuk, C., Dalkılıç, B., 2025b. Evaluation of Hydraulic and Irrigation Performances of Drip Systems in Nectarine Orchards (*Prunus persica* var. *nucipersica*) in The Mediterranean Region. *Water*. 17(5):758. Doi: <https://10.3390/w17050758>.
- Dalkılıç, B., Bozkurt Çolak, Y., Baydar, A. 2024. Su Ayak İzi. *Tarımda Güncel Araştırma Konuları II. Bölüm 1*. Ed.V. Saruhan., B. Ayhan. İksad Yayınevi S. No: 3-21. ISBN: 978-625-367-776-3.
- Dalkılıç, B., Bozkurt Çolak, Y., Baydar, A.2025. Kayısı Üretiminde Modern Sulama Stratejileri ve Su Kaynaklarının Etkin Kullanımı. *Stratejik Tarım ve Yenilikçi Çözümler*. E.D. A.B.Uçak., Y. Bozkurt Çolak. Duvar Yayınları, 43-64. ISBN: 978-625-5885-76-0.
- Duman, E., Aktel, M. 2024 . Kuraklık Ve Su Kıtlığının Eğirdir Gölü’ne Yönetmel Yansımaları . *Uluslararası İşletme, Ekonomi ve Yönetim Perspektifleri Dergisi* .DOI:10.29228/ijbemp.78826
- Ceylan, A., Turgu, E., İnal, İ., Mollamahmutoğlu, A., & Aydoğan, A. (2009). Türkiye’de son yıllarda gözlenen kuraklık hadiselerinin değerlendirilmesi. *Su kaynakları*, 2(1), 1-11.

- Kapluhan, E. (2013). Türkiye’de kuraklık ve kuraklığın tarıma etkisi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (27), 487-510.
- Gümüş, V., Yıldız, M. S., & Şimşek, O. (2018). Hidrolojik Kuraklık Değerlendirmesi: Murat Nehri-Palu Örneği. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 297-301.
- Gürer, İ., & Yıldız, F. E. (2008). Türkiye’nin sulak alan politikalarına genel bir bakış: Sultansazlığı Sulak Alanı örneği. *TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi*, 335-344.
- Karakılçık, Y., & Özcan, A. (2009). Türkiye’de sulak alanların korunmasında planlamanın önemi ve yerel katılımın gerekliliği. *Çağdaş Yerel Yönetimler Dergisi*, 18(2), 45-69.
- Önder, D. (2008). Türkiye’de işlevini yitiren ve yitirmekte olan sulak alanlar. *MKU Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(1-2), 1-12.
- Karakoç, D. Y. (2017). Türkiye’de sulak alanlar. 5. Çevre Günleri Uluslararası Sempozyumu- İnsanların Doğayla Kenetlenmesi, Kentte ve Doğal Alanda, Kutuplardan Ekvatora, Ankara, Turkey.
- Güngör, S. (2013). Yitirilmiş bir sulak alan: Kahramanmaraş Gâvur Gölü’nün öyküsü. *Türk İdare Dergisi*, 477, 303-320.
- Ucak, A.B., Kociğcka, J., Liberacki, D., Saltuk, B., Atilgan, A., Stachowski, P., Rolbiecki, R. (2024). The effects of high temperature and low humidity on crop water stress index of seed pumpkin plants (*Cucurbita pepo* L.) in semi-arid climate conditions. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, 23(1), 63–73. <https://doi.org/10.24326/asphc.2024.5287>

9. Bölüm

Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Myo Çatı Alanında Toplanabilir Yağmur Suyu Potansiyelinin Peyzaj Sulamasında Kullanım Olanaklarının Belirlenmesi

Yoldaş EKTİREN¹
Sedat BOYACI²

1. Giriş

Su; insanların, hayvanların ve bitkilerin hayat fonksiyonlarının yerine getirilmesinde, vücut ısılarının dengelenmesinde, besin maddelerinin taşınmasında, metabolik faaliyetlerin gerçekleşmesinde (Postel, 2000) ve ekosistemlerin devamlılığını sürdürülmesinde son derece büyük bir öneme sahiptir (Gleick, 1993). Bitkilerde fotosentez sürecinin temel girdilerinden biri su olduğundan, suyun yetersizliği fotosentetik etkinliği olumsuz yönde etkileyerek bitkisel üretimde önemli verim kayıplarına neden olmaktadır (Taiz ve Zeiger, 2010). Bu nedenle suyun korunması ve sürdürülebilir kullanımı hem doğal yaşam hem de insan toplumları için zorunlu bir önlemdir.

İklim değişikliği dünyanın birçok bölgesinde çevresel, ekonomik ve toplumsal sistemleri olumsuz etkileyen küresel bir sorundur. İklim değişikliğinin bir sonucu olarak yükselen sıcaklık değerleri, buharlaşma süreçlerini hızlandırmakta ve yağış rejimlerindeki düzensizliklerle birlikte, küresel ölçekte kullanılabilir tatlı su kaynaklarının miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır (IPCC, 2022). Kullanılabilir tatlı su potansiyelindeki azalma ve su kaynaklarının hatalı kullanımı, su kalitesinin bozulmasına; bunun sonucunda ise yeraltı su rezervlerinin tükenmesine ve su ekosistemlerinin yapısal bütünlüğünün zedelenmesine yol açmaktadır (WWAP, 2023). Bu durum özellikle kurak ve yarı kurak iklim özelliklerinin hüküm sürdüğü bölgelerde su kaynakları üzerindeki baskının daha da artmasına yol açmaktadır (UNEP, 2021). Dünyadaki mevcut tatlı su kaynaklarının yalnızca %2.5'i kullanılabilir nitelikte olup bu miktarın büyük bir bölümü buzullar ve yeraltı su rezervleri

¹ Öğr. Gör., Bingöl Üniversitesi, Gıda Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, yektiren@bingol.edu.tr, 0000-0002-6571-6806

² Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye, sedat.boiyaci@ahievran.edu.tr ORCID: 0000-0001-9356-1736

şeklinde bulunmaktadır (UNESCO, 2023). İklim değişikliği sonucunda küresel su kaynaklarındaki azalma; çevresel, ekonomik ve sosyal krizlerin yaşanmasına yol açmaktadır. Su kaynaklarına erişimin olanaklarının azalması, gıda güvenliğini tehdit etmekte, enerji üretimini sınırlamakta ve bölgeler arası göç hareketlerinin yaşanmasına yol açmaktadır (UNESCO, 2023). Bu nedenle iklim değişikliği ile mücadelede rasyonel adımların atılması ve sürdürülebilir su politikalarının geliştirilmesi günümüzde hayati bir öneme sahiptir. Bu amaç doğrultusunda yenilenebilir su kaynaklarının korunması, su kullanım etkinliğini artıran teknolojilerin geliştirilmesi ve entegre su yönetimi yaklaşımlarının hayata geçirilmesi iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine baskısını azaltmak için atılması gereken stratejik adımlardır (IPCC, 2022; FAO, 2022).

Türkiye sahip olduğu coğrafi konum nedeniyle birçok iklim özelliğinin bir arada görüldüğü bir ülke konumundadır. Türkiye'nin yıllık ortalama yağış miktarı (574 mm) dikkate alındığında ülkenin yıllık yenilenebilir tatlı su potansiyeli yaklaşık 112 milyar m³ olarak hesaplanmaktadır. (DSİ, 2024). Ülkede tatlı su kaynaklarının kullanım alanları (tarım, sanayi vb.) ve artan nüfusu dikkate alındığında kişi başına düşen su miktarının her geçen gün daha da azalması nedeniyle su stresi yaşayan ülkeler arasında değerlendirilmesine neden olmuştur (WWF, 2024). Bu durum ülkede, iklim değişikliğiyle birlikte su kaynaklarının mekânsal ve zamansal dağılımındaki dengesizlikleri daha da belirgin hâle getirmekte; sürdürülebilir su yönetimi politikalarının önemini artırmaktadır. Türkiye'de iklim değişikliği nedeniyle artan su stresi, kentsel alanlarda yeşil alanların korunması ve peyzaj sulamasının sürdürülebilirliği açısından geleneksel yeraltı ve yüzey suyu kaynaklarına olan bağımlılığın azaltılmasını ve alternatif, çevre dostu su kaynaklarına yönelme gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu amaç doğrultusunda yağmur suyu hasadı uygulamaları, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine olan olumsuz etkilerini azaltmak ve suyun yeniden kullanılmasına olanak sağlayan yenilikçi bir çözüm önerisi olarak ön plana çıkmaktadır. Yağmur suyu hasadı; çatı, zemin veya diğer yüzeylere düşen yağmur sularının toplanarak depolanması ve ihtiyaç halinde sulama, temizlik, peyzaj vb. alanlarında ihtiyaç duyulan suyun temin edilmesine olanak sağlayan bir su yönetim stratejisidir. Yağmur suyu hasadı uygulamaları bir yandan su tasarrufu sağlarken bir yandan da şehir içi drenaj sistemleri üzerindeki yükü azaltması bakımından büyük önem taşımaktadır (UNEP, 2023). Dolayısıyla, Türkiye'nin mevcut iklim koşulları ve su potansiyeli dikkate alındığında, yağmur suyu hasadı uygulamaları su yönetimi stratejilerinin ayrılmaz bir bileşeni hâline getirilmesi önemli olacaktır.

Bu çalışmada, Bingöl ili uzun yıllık yağış verileri dikkate alınarak, Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu çatı alanında toplanabilir

yağmur suyu potansiyeli analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu çatı alanından toplanabilecek yağmur suyu miktarının peyzaj sulama ihtiyaçlarını karşılama potansiyeli ve bu suyun kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, iklim değişikliğine bağlı olarak artan su kaynakları üzerindeki baskıların azaltılması ve sürdürülebilir su yönetimi yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanının Konumu ve İklim Özellikleri

Çalışma, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat bölümünde yer alan ve karasal iklim özelliklerinin hüküm sürdüğü Bingöl ilinde yürütülmüş olup, araştırma alanı olarak Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu binasının (Şekil 2.1) çatı alanı yağmur sularının hasad edileceği alan olarak seçilmiştir.



Şekil 2.1. Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu

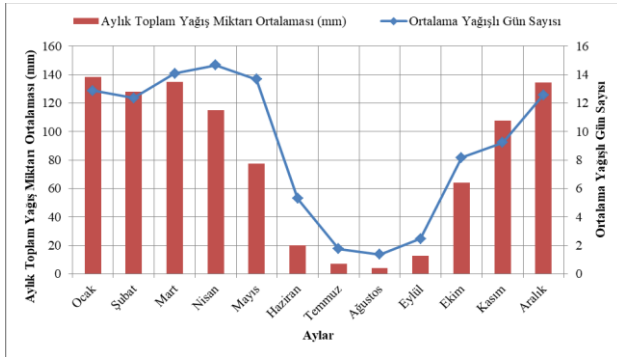
Araştırmada, 1961-2024 yıllarına ilişkin uzun yıllık yağış verileri Bingöl Meteoroloji Müdürlüğü'nden temin edilmiş ve aylık bazda analiz edilmiştir. Bingöl ilinde kışlar soğuk ve yağışlı; yazlar ise sıcak ve kurak geçmektedir. Bingöl iline ilişkin uzun yıllık temel iklim parametre değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 2.1 incelendiğinde Bingöl ilinde uzun yıllık ortalama yağış miktarının yaklaşık 945 mm, yağışların aylara göre dağılımının ise oldukça düzensiz olduğu görülmektedir. Bingöl ilinde uzun yıllık ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde, en düşük değerlerin Ocak ayında -2.2°C , en yüksek

değerlerin ise Temmuz ayında 26.7°C olduğu ve yıllık ortalama sıcaklığın 12.2°C civarında gerçekleştiği gözlemlenmektedir (MGM, 2025).

Tablo 2.1. Bingöl ilinin 1961-2024 yıllarına ilişkin iklim verileri.

Aylar	Ort. sıcaklık (°C)	Ort. mak. sıcaklık (°C)	Ort. min. sıcaklık (°C)	Ort. güneşlenme (saat)	Ort. yağışlı gün (gün)	Aylık ort. top. yağış (mm)
Ocak	-2.2	2.4	-5.7	3.4	12.88	138.5
Şubat	-1.0	4.0	-4.8	4.5	12.36	128.1
Mart	4.3	9.6	0.0	4.8	14.08	134.8
Nisan	10.9	16.9	5.8	5.6	14.67	115.2
Mayıs	16.2	22.9	10.2	7.1	13.67	77.7
Haziran	22.1	29.5	14.8	9.1	5.31	20.3
Temmuz	26.7	34.6	19.1	9.4	1.77	7.1
Ağustos	26.5	34.8	18.7	9.0	1.38	4.3
Eylül	21.3	29.8	13.7	8.1	2.47	12.8
Ekim	14.3	21.7	8.3	6.1	8.16	64.0
Kasım	6.8	12.7	2.3	4.5	9.23	107.9
Aralık	0.8	5.3	-2.6	3.3	12.58	134.3
Yıllık	12.2	18.7	6.7	6.2	108.6	945.0

Bingöl ilinin uzun yıllık aylara göre yağış dağılımı ve ortalama yağışlı gün sayısı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekil 2.2 incelendiğinde Bingöl ilinde yağışların büyük bir kısmının kış ve ilkbahar aylarında düştüğü; yaz aylarında ise azalan yağış miktarına bağlı olarak kuraklıkların yaşandığı görülmektedir. Bu durum yılın belirli aylarında (Haziran-Eylül) ihtiyaç duyulan suyun temin edilmesinde yağmur suyu hasadının önemini artırmaktadır.



Şekil 2.2. Bingöl ilinin aylara göre yağış dağılımı ve ortalama yağışlı gün sayısı

2.2. Yağmur Suyunu Toplama Alanlarının Belirlenmesi

Yağmur suyu hasadı, çalışma alanında yer alan yer alan tüm yapıların çatı yüzeylerinden gerçekleştirilecektir. Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu, 32000 m²'lik bir alan üzerine konumlanmış olup; bu alandaki yapıların toplam çatı yüzey alanı yaklaşık 5600 m², yeşil alan varlığı ise yaklaşık 15500 m²'dir.

2.3. Hasad Edilebilecek Yağmur Suyu Miktarı ve Depolama Kapasitesinin Belirlenmesi

Çalışmada araştırma alanı içerisinde yer alan yapıların çatı yüzeylerinden yağmur suyu hasadı ile toplanabilecek su miktarı (TEMA, 2017; Yalılı Kılıç ve Abuş, 2018; Temizkan ve Kayılı, 2021; Çakar, 2022; Kılıç ve ark. 2023) tarafından önerilen Eşitlik 1 ile belirlenmiştir.

$$YSH = A \times P \times RC \times FEC \quad (1)$$

Eşitlikte:

YSH: Yağmur suyu hasadı miktarı (m³), A: Hasad yapılacak yüzey alanları (m²) P: Yağış (L/m²), RC: Çatıdan hasad edilebilecek yağmur suyu oranı veya çatı katsayısı DIN (1989)'a göre 0.8, FEC: Yağmur suyunun geçirildiği filtrenin verim katsayısı DIN (1989)'a göre 0.9 olarak tanımlanmıştır.

Araştırmada karşılama oranı (KO), alan içindeki yapıların çatı yüzeylerinden hasat edilebilecek toplam yağmur suyunun, yeşil alan sulama ihtiyacını karşılama oranı olarak kabul edilmektedir. Karşılama oranı Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır.

$$KO (\%) = \frac{\text{Mevcut su miktarı}}{\text{İhtiyaç duyulan su miktarı}} \times (100) \quad (2)$$

Araştırmada sulama sıklığına bağlı olarak ihtiyaç duyulan yıllık su miktarının hacmi Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır.

$$Q_{yıl} = \frac{Q_{gün} \times 365 \times n}{7} \quad (3)$$

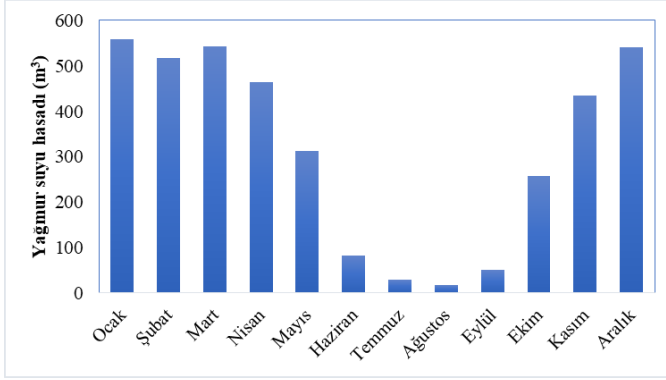
Eşitlikte:

Q_{yıl}= Yıllık su hacmi (m³/yıl), Q_{gün}= Günlük su hacmi (m³/gün) ve n= Haftada sulama sayısı olarak tanımlanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yağmur suyu potansiyeli ve su karşılama oranı

Çalışmada Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu'na ait toplam çatı alanı miktarı 5600 m²'dir. Bingöl ilinde 1961-2024 yıllarına ilişkin uzun yıllık yağış verileri ortalaması 945 mm (945 L/m²) olarak belirlenmiştir (Tablo 2.1). Araştırma alanında bulunan yapıların toplam çatı alanı, Bingöl ili uzun yıllık yağış ortalama değerleri, çatı katsayısı (RC= 0.8) ve filtre verim katsayısı (FEC= 0.9) değerleri dikkate alınarak hesaplanan aylık hasat edilebilir yağmur suyu miktarı değerleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.1 incelendiğinde hasat edilebilir yağmur suyu miktarlarının 17.3-558.4 m³ değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Aylık yağış verilerine göre hasat edilebilir yağmur suyu potansiyeli Ağustos ayında minimum, Ocak ayında ise maksimum düzeydedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Sosyal Bilimler MYO çatısından hasat edilebilen su miktarının aylık dağılımı

Mevsimplere göre çatıdan toplanan yağmur suyu miktarı (m³), sulama için gereken toplam su miktarı (m³/mevsim) ve yağmur suyu hasadı (YSH) ile karşılama oranı (%) değerleri Tablo 3.1'de sunulmuştur. Tablo 3.1 incelendiğinde toplam çatı yüzey alanlarından hasat edilebilir yağmur suyu miktarının 127.8-1616.4 m³ değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Çalışmada öngörülen 15.500 m²'lik yeşil alanın sulanması için ihtiyaç duyulan sulama suyu miktarının 28287.5 m³/yıl; toplam yapı alanından toplanabilecek yağmur suyu miktarının ise 3810.2 m³/yıl olduğu belirlenmiştir. Yağmur suyu hasadı ile sonbahar, kış, ilkbahar, yaz aylarında ihtiyaç duyulan sulama suyu miktarının karşılama oranları sırasıyla; %10.6, %23.2, %18.5 ve %1.8 bulunmuştur.

Tablo 3.1. Mevsimsel yağmur suyu hasadının sulama suyu karşılanma oranları

Mevsimler	Çatıdan toplanan yağmur suyu miktarı (m ³)	Toplam su tüketimi (m ³ /mevsim)	KO (%)
Sonbahar	744.7	7052.5	10.6
Kış	1616.4	6975.0	23.2
İlkbahar	1321.3	7130.0	18.5
Yaz	127.8	7130.0	1.8
Toplam	3810.2	28287.5	13.5

Çalışmada yeşil alanların sulanmasında ihtiyaç duyulan sulama suyu miktarı 5 L/m² olarak kabul edildiğinde (Eren ve ark., 2016), 15500 m²'lik yeşil alanın sulanması için ihtiyaç duyulan sulama suyu miktarı 77.5 m³/gün hesaplanmıştır.

Bitkilerin su gereksinimi, iklimsel koşullar, sıcaklık, bağıl nem ve yağış dağılımına bağlı olarak aylık ve mevsimlik düzeyde değişkenlik göstermesi sulama programlarının esnek ve ihtiyaca yönelik olarak tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Sulama uygulamalarının bitkilerin dönemsel su ihtiyacındaki değişimlere uygun şekilde düzenlenmesi bir yandan suyun daha etkin kullanılmasına olanak sağlar iken bir yandan da mevcut kaynakların korunmasına katkı sağlamaktadır. Örneğin kış aylarında yağışlar genellikle bitkilerin su ihtiyacını karşıladığından sulama uygulamalarına nadiren veya hiç ihtiyaç duyulmazken; İlkbahar döneminde kar erimeleri ve artan yağışlar, toprak nemini destekleyerek sulamanın yalnızca ihtiyaç duyulduğunda sınırlı biçimde uygulanmasını gerektirebilir. Yaz aylarında sıcaklık ve buharlaşma oranlarının artması nedeniyle bitkilerin su tüketimi yükselir ve sulama uygulamaları daha sık ve düzenli olarak gerçekleştirilmelidir. Sonbahar döneminde ise yağışların artışı ve sıcaklıkların düşmesi su ihtiyacını kısmen karşılar; bu nedenle sulama yalnızca bitki su eksikliğinin gözlemlendiği durumlarda yapılmalıdır. Bu mevsimsel su yönetim stratejisi, bir yandan su kaynaklarının etkin kullanımını sağlar iken; bir yanda da bitkilerin optimal büyüme ve gelişim koşullarının korunmasına katkı sunacaktır. Bu amaç doğrultusunda çatıdan toplanan yağmur suyu miktarı (3810.2 m³/yıl) ve ihtiyaç duyulan günlük sulama suyu miktarı (77.5 m³/gün) dikkate alınarak her sulama aralığı için farklı senaryolar yapılmıştır.

$$15500 \text{ m}^2 \times 5 \text{ L/m}^2 = 77500 \text{ L} = 77.5 \text{ m}^3/\text{gün}$$

$$\text{Her gün sulama yapılırsa; } (77.5 \text{ m}^3/\text{gün} \times 365 \text{ gün}) = 28287 \text{ m}^3/\text{yıl},$$

$$\text{Haftada 1 kez sulama yapılırsa; } (77.5 \text{ m}^3/\text{gün} \times 365 \text{ gün}) / (1/7) = 4041 \text{ m}^3/\text{yıl},$$

$$\text{Haftada 2 kez sulama yapılırsa; } (77.5 \text{ m}^3/\text{gün} \times 365 \text{ gün}) / (2/7) = 8082 \text{ m}^3/\text{yıl},$$

Haftada 3 kez sulama yapılırsa; $(77.5 \text{ m}^3/\text{gün} \times 365 \text{ gün}) / (3/7) = 12123 \text{ m}^3/\text{yıl}$,

Haftada 4 kez sulama yapılırsa; $(77.5 \text{ m}^3/\text{gün} \times 365 \text{ gün}) / (4/7) = 16164 \text{ m}^3/\text{yıl}$ sulama suyuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Elde edilen tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde sulama uygulamaları; günlük yapıldığında $28287 \text{ m}^3/\text{yıl}$, haftada bir kez yapıldığında $4041 \text{ m}^3/\text{yıl}$, haftada iki kez yapıldığında $8082 \text{ m}^3/\text{yıl}$, haftada üç kez yapıldığında $12123 \text{ m}^3/\text{yıl}$ ve haftada dört kez yapıldığında ise $16164 \text{ m}^3/\text{yıl}$ sulama suyuna ihtiyaç duyulacağını göstermektedir.

Bingöl ili uzun yıllık yağış verileri dikkate alınarak, Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu çatı alanında toplanabilir yağmur suyu potansiyelinin analiz edildiği bu çalışmada elde edilen veriler ile farklı bölgede yürütülen çalışmaların sonuçları benzerlik göstermektedir. Son yıllarda artan su kıtlığı bağlamında yapılan araştırmalar, yağmur suyu hasadı (YSH) sistemlerinin entegre su yönetiminde sürdürülebilir ve etkili bir alternatif kaynak olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye’deki uygulama örnekleri, bu potansiyeli doğrulamaktadır ve çatı yüzeylerinden toplanan yağmur sularının yangın söndürme, sera sulama suyu ihtiyacı, evaporatif serinletme sistemleri, bahçe ve yeşil alan sulaması ile tuvalet kullanımında etkin bir şekilde değerlendirilebildiğini göstermektedir (Yaman, 2009; Görgün, 2010; Altensis, 2021; Kalıpcı ve ark., 2021; Eser Yeşil Bina, 2021; Çaylı, 2021; Bursagaz, 2021; Kılıç ve Rukiah, 2022; Boyacı ve Arslan, 2023; Uysal ve Çeliktaş, 2023; Selimoğlu ve Yamaçlı, 2023; Günaydın ve Cengiz, 2023; Boyacı ve ark., 2024; Kılıç ve ark., 2024; Dağ ve Ay, 2024; Mısırlı ve Şişman, 2024; Müftüoğlu ve Oral, 2025; Hamidi, 2025). Söz konusu sistemlerin verimlilik, su tasarrufu ve ekonomik katkı sağladığı ve farklı ölçeklerde (kampüs, havaalanı, ofis, alışveriş merkezi) uygulanabilirliği ile sürdürülebilir su yönetimine önemli ölçüde destek verdiği görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu çatı alanlarında toplanabilecek yağmur suyu potansiyeli analiz edilmiştir. Araştırmada, toplam 5600 m^2 çatı alanı ve uzun yıllık ortalama 945 mm yağış dikkate alınarak, çatıdan yılda yaklaşık 3810 m^3 yağmur suyu hasat edilebileceği belirlenmiştir. Yeşil alanların sulama ihtiyacı ise 15500 m^2 için $28287 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır. Mevsimsel analizler göstermiştir ki, yağmur suyu hasadı; sonbahar (%10.6), kış (%23.2), ilkbahar (%18.5) ve yaz (%1.8) dönemlerinde sulama ihtiyacını kısmen karşılayabilmektedir. Çatı yüzeylerinden hasat edilebilen yıllık toplam yağmur suyu miktarı 3810.2 m^3

olup, bu değer yeşil alanların yıllık sulama suyu ihtiyaçı olan 28287.5 m³'ün yaklaşık %13.5'ini karşılayabilmektedir. Sulama sıklığına göre ihtiyaç duyulan su miktarı ise: günlük sulamada 28287 m³, haftada bir 4041 m³, haftada iki 8082 m³, haftada üç 12123 m³ ve haftada dört 16164 m³ olarak hesaplanmıştır.

Yağmur suyu hasadı, su kaynaklarının etkin kullanımına ve sürdürülebilir sulama yönetimine katkı sağlayabilen bir uygulama olarak; özellikle mevsimsel yağışların düşük olduğu dönemlerde su tasarrufu sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, mevcut çatı alanlarından toplanabilen su miktarı, toplam yeşil alan sulama ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmakta, bu nedenle yağmur suyu hasadının diğer su kaynaklarıyla desteklenmesi gerekmektedir. Çalışmada elde edilen veriler, sulama planlamasının bitkilerin mevsimsel su ihtiyacına göre esnek bir şekilde yapılmasının önemini vurgulamakta ve sürdürülebilir peyzaj yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

KAYNAKLAR

- Boyacı, S., & Arslan, K. (2023). Kurak ve yarı kurak iklim koşullarında sera çatısından sulama amaçlı yağmur suyu hasadı. *Alatarım*, 22(1), 44-54.
- Boyacı, S., Atılğan, A., Kociğcka, J., Liberacki, D., & Rolbiecki, R. (2024). Use of rainwater harvesting from roofs for irrigation purposes in hydroponic greenhouse enterprises. *Atmosphere*, 15(8), 884. <https://doi.org/10.3390/atmos15080884>
- Bursagaz'a yeşil bina sertifikası. <https://www.bursagaz.com/leed-sertifikasi>, Erişim Tarihi: 27.10 2025.
- Çakar, H. (2022). İzmir ili koşullarında bahçeli bir sitenin yağmur suyu hasadı potansiyelinin değerlendirilmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 9, 446-452. <https://doi.org/10.30910/turkjans.1084095>.
- Çaylı, A. (2021). KÜMESLERİN SU GEREKSİNİMİNİN YAĞMUR SUYU HASADINDAN KARŞILANMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA: KAHRAMANMARAŞ ÖRNEĞİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 24(5), 1048-1058. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.838619>
- Dağ, M., & Ay, M. (2024). Yağmur suyu hasadı hesabı: Çorum ili örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(2), 334-343. <https://doi.org/10.21324/dacd.1394549>
- DIN 1989. Regenwassernutzungsanlagen. Deutsches Institut Normung DIN: 1989, German.
- Eser Yeşil Bina. <https://www.altensis.com/proje/eser-holding-merkez-ofisi-ilk-leed-platin-sertifikali-bina/> Erişim Tarihi: 27.10 2025.
- FAO. (2022). The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gleick, P. H. (1993). Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources. New York: Oxford University Press.
- Görgün, G. (2010) Binalarda yağmur suyu ve gri suyun kombine kullanılmasına ait iki örnek proje. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*; Eylül-Ekim: 37-45.
- Günaydın, N., & Cengiz, T. (2023). Üniversite yerleşkelerinde sürdürülebilir yağmur suyu yönetim uygulamalarının belirlenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 11(2), 306-319.
- Hamidi, M. N. (2025). Rainwater harvesting for lawn irrigation: A case study in Diyarbakır province. *Dicle Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 16(1), 207-215.
- IPCC. (2022). Impacts, adaptation and vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Kalıpcı, E., Başer, V., & Genç, N. (2021). Coğrafi bilgi sistemi kullanarak yağmur suyu hasadının değerlendirilmesi: Giresun Üniversitesi kampüs örneği. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 10(1), 49-58.
- Kılıç, M.Y., & Rukiah, K. (2022). İstanbul havalimanı'nda yağmur suyu hasadı. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2): 495-504.
- Kılıç, U., Yaylı, B., & Kılıç, İ. (2023). Rainwater harvesting and system design in livestock farms. *International Journal of Agriculture and Wildlife Science*, 9(2): 218-228.
- Kılıç, U., Yaylı, B., & Kılıç, İ. (2024). Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi bünyesinde bulunan seralarda yağmur suyu hasadı potansiyelinin belirlenmesi ve ekonomik analizi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38(2): 313- 324.
- Mısırlı, N., & Şişman, E. E. (2024). Evaluation of the relationship between rainwater harvesting and landscape plant water consumption. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(5), 1351-1362. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1554580>
- Müftüoğlu, T. D., & Oral, H. V. (2025). Implementing rainwater harvesting in blocks for a sustainable university campus. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 543-565. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1519458>
- Postel, S. (2000). Entering an era of water scarcity: The Challenges Ahead. *Ecological Applications*, 10(4), 941-948.
- Selimoğlu, P., & Yamaçlı, R. (2023). Sürdürülebilirlik sürecinde yağmur suyu hasadı: Sinop Üniversitesi kuzey yerleşkesi örneği. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 10(4), 854-864. <https://doi.org/10.30910/turkjans.1290890>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- TEMA. (2017). <http://sutema.org>. (Access date: 25.10.2025).
- Temizkan, S., & Kayılı, M. T. (2021). Yağmur suyu toplama sistemlerinde optimum depolama yönteminin belirlenmesi: Karabük Üniversitesi sosyal yaşam merkezi örneği. *El-Cezeri*, 8, 102-116. <https://doi.org/10.31202/ecjse.778973>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Global environmental outlook 6*. Nairobi: United Nations Environment Programme.

- United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Rainwater harvesting: Sustainable solutions for urban water management. Retrieved from <https://www.unep.org>
- Altensis (2025). Türkiye'nin ilk LEED alan projesi. <https://www.altensis.com/proje/unilever-turkiye-merkez-ofisi-turkiyenin-ilk-leed-sertifikali-projesi/> Erişim Tarihi: 30.10 2025.
- Uysal, S., & Çeliktaş, M. S. (2023). Güneş enerjisi santrallerinde yağmur suyu hasadı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 334-342. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1124588>
- Yalılı Kılıç, M., & Abuş, M.N. (2018). Bahçeli bir konut örneğinde yağmur suyu hasadı. Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi, 4(2): 209-215.
- Yaman, C. (2009). Siemens Gebze tesisleri yeşil bina. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 6-9 Mayıs 2009, İzmir.
- WWAP (2023). The United Nations World Water Development Report 2023. Paris: UNESCO.