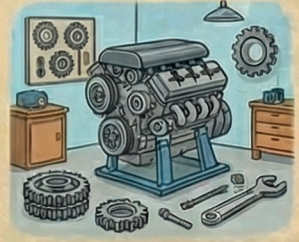
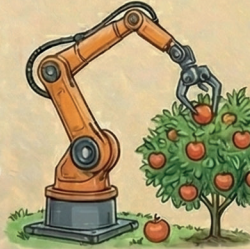


Tarım Makinaları Alanında

Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar

EDİTÖR: PROF. DR. HASAN HÜSEYİN SİLLELİ



Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Ankara 2025

ISBN • 978-625-8559-96-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

TARIM MAKİNALARI
ALANINDA
ULUSLARARASI
DERLEME, ARAŞTIRMA
VE ÇALIŞMALAR

EDİTÖR

PROF. DR. HASAN HÜSEYİN SİLLELİ

İÇİNDEKİLER

MİKROALG TABANLI UYGULAMALAR: ENERJİ, TARIM VE ÇEVRE SİSTEMLERİ PERSPEKTİFİ.....	7
<i>F. Özge UYSAL.....</i>	<i>7</i>
<i>Önder UYSAL</i>	<i>7</i>
 TARIMDA NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) TABANLI DİJİTAL SU YÖNETİMİ SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI	25
<i>Tahsin Uygun.....</i>	<i>25</i>
<i>Mesut Çoşlu</i>	<i>25</i>
 KABUKLU YERFISTIĞININ BOYUT ESASINA GÖRE SINIFLANDIRILMASINDA KULLANILAN MAKİNELERE GENEL BİR BAKIŞ	47
<i>Selçuk UĞURLUAY</i>	<i>47</i>
 TARIMSAL ROBOTLARDA ENERJİ YÖNETİMİ VE GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİ	61
<i>Osman ECEOĞLU.....</i>	<i>61</i>
<i>İlker ÜNAL</i>	<i>61</i>
 TÜRKİYE KOŞULLARINDA FINDIK HASAT YÖNTEMLERİNİN (ELLE-PNÖMATİK-MEKANİK) TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN KARŞILAŞTIRILMASI.....	77
<i>Hüseyin SAUK</i>	<i>77</i>
 77 MİKROALGAL BİYOKÜTLEDEN BİYOHİDROJEN ÜRETİMİ: MEKANİZMALAR, TEKNOLOJİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ	93
<i>F. Özge UYSAL.....</i>	<i>93</i>
<i>Önder UYSAL</i>	<i>93</i>



MİKROALG TABANLI UYGULAMALAR: ENERJİ, TARIM VE ÇEVRE SİSTEMLERİ PERSPEKTİFİ

“ ”

F. Özge UYSAL¹

Önder UYSAL²

¹ Dr. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye. zm.ozgeuysal@gmail.com ORCID iD: 0000-0001-7764-7580

² Doç. Dr. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye. onderuysal@isparta.edu.tr ORCID iD: 0000-0002-8019-5260

1. GİRİŞ: MİKROALGLERİN BİYOTEKNOLOJİK UYGULAMALARDAKİ YÜKSELEN ÖNEMİ

Son yirmi yılda mikroalgler, biyoteknoloji alanında artan biçimde ilgi gören organizmalar hâline gelmiştir. Bu ilginin temelinde, mikroalglerin yalnızca belirli bir ürünün hammaddesi olarak değil; enerji, tarım ve çevre sistemlerini aynı biyolojik platformda birleştirebilen çok işlevli canlı sistemler olmaları yer almaktadır. Artan enerji talebi, fosil yakıt kaynaklı sera gazı emisyonları, tarımsal girdilerin sürdürülebilirliği ve su kaynaklarının korunmasına yönelik küresel baskılar, mikroalgleri bütüncül çözümler sunabilen biyoteknolojik adaylar arasına taşımıştır (Chisti, 2007; Brennan ve Owende, 2010).

Mikroalglerin biyoteknolojik öneminin erken dönem vurgularından biri, kara bitkilerine kıyasla daha yüksek fotosentetik verim ve birim alan başına daha fazla biyokütle üretebilme potansiyelidir. Özellikle bazı türlerin yüksek lipid içeriğine ulaşabilmesi, mikroalgleri biyoyakıt araştırmalarında ön plana çıkarmıştır (Chisti, 2007; Mata, Martins, ve Caetano, 2010). Bununla birlikte, güncel literatürde mikroalglerin yalnızca biyodizel üretimi perspektifiyle ele alınmasının yetersiz kaldığı; aksine bu organizmaların mikrobiyal biyorefineri yaklaşımı içinde değerlendirilmesi gerektiği yaygın biçimde kabul görmektedir (Markou ve Nerantzis, 2013).

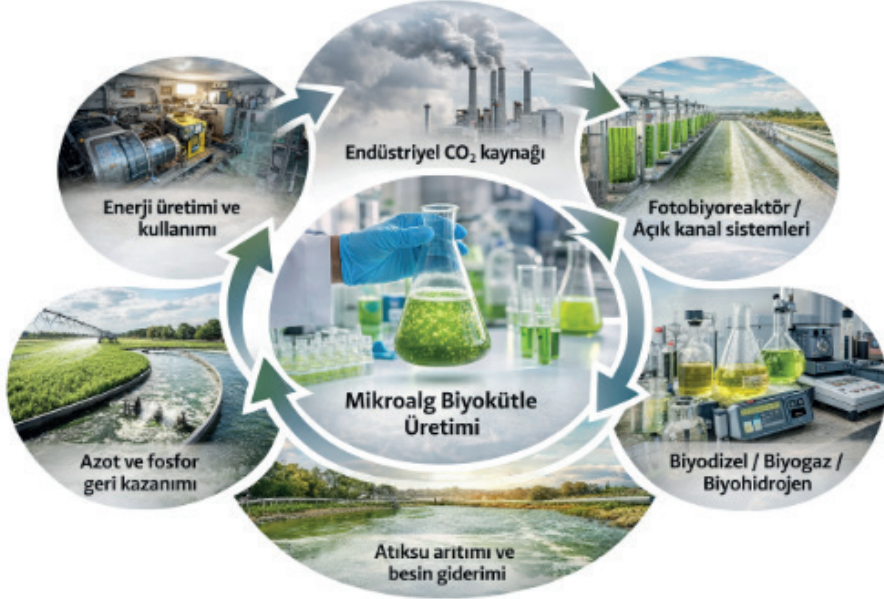
Biyorafineri yaklaşımı, mikroalg biyokütlesinin tek bir ürüne yönlendirilmesi yerine, aynı üretim süreci içerisinde enerji taşıyıcıları (biyodizel, biyogaz, biyohidrojen) ile birlikte yüksek katma değerli bileşiklerin (pigmentler, antioksidanlar, polisakkaritler ve proteinler) eş zamanlı olarak elde edilmesini hedeflemektedir (Cherubini, 2010). Bu yaklaşım, mikroalg tabanlı sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliğini artırmak açısından kritik bir avantaj sağlamaktadır. Nitekim tek ürünlü biyoyakıt süreçlerinin yüksek maliyetleri, mikroalg biyokütlesinin çoklu ürün zincirlerinde değerlendirilmesiyle kısmen dengelenebilmektedir (Wijffels ve Barbosa, 2010).

Mikroalglerin biyoteknolojik uygulamadaki yükselişini destekleyen bir diğer önemli unsur, çevre teknolojileriyle kurdukları güçlü ilişkidir. Mikroalgler, atıksularda bulunan azot ve fosfor gibi besin elementlerini büyüme için kullanarak bu elementleri biyokütleyle dönüştürebilmekte; böylece hem su kalitesinin iyileştirilmesi hem de değerli bir biyolojik ürünün elde edilmesi mümkün olmaktadır (Craggs, Park, ve Heubeck, 2014; Rawat, Kumar, Mutanda, ve Bux, 2011). Bu özellik, mikroalg tabanlı sistemleri klasik arıtım teknolojilerinden ayırmakta ve onları kaynak geri kazanımına dayalı döngüsel sistemler hâline getirmektedir.

Atıksu arıtımıyla entegre mikroalg üretimi, yalnızca besin elementi giderimi değil; aynı zamanda karbon dioksit asimilasyonu ve oksijen üretimi gibi ek çevresel faydalar da sunmaktadır (Pittman, Dean, ve Osundeko, 2011).

Bu nedenle mikroalgler, döngüsel biyoekonomi ve sürdürülebilir kalkınma çerçevelerinde stratejik bir biyolojik araç olarak değerlendirilmektedir (Cherubini ve Ulgiati, 2010).

Tarım sektörü açısından bakıldığında ise mikroalglerin biyoteknolojik önemi, biyogübre ve biyostimülant potansiyelleri ile daha da belirginleşmektedir. Mikroalg biyokütlesi ve ekstraktları, bitki gelişimini destekleyen besin elementleri, büyüme düzenleyici bileşikler ve organik maddeler içermekte; bu sayede yalnızca verimi değil, aynı zamanda toprak sağlığını ve bitkilerin stres toleransını da etkileyebilmektedir (Khan vd., 2009; Plaza, Herrero, Cifuentes, ve Ibáñez, 2009). Bu yönüyle mikroalgler, enerji–tarım–çevre sistemlerinin entegrasyonunda biyolojik bir bağlayıcı rol üstlenmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Mikroalg tabanlı entegre biyokütle üretim yaklaşımı

Sonuç olarak mikroalglerin biyoteknolojik uygulamalardaki yükselen önemi, tek bir sektörün gereksinimleriyle açıklanamaz. Mikroalgler; yüksek fotosentetik verim, metabolik esneklik, atık akımlarını değerlendirme yeteneği ve çoklu ürün üretim potansiyelleri sayesinde enerji, tarım ve çevre sistemlerini ortak bir biyolojik çerçevede buluşturmaktadır. Bu özellikler, mikroalgleri alternatif bir biyokütle kaynağından ziyade, sürdürülebilir üretim sistemlerinin tasarımında stratejik bir biyoteknolojik platform hâline getirmektedir.

2. MİKROALGLERİN TEMEL BİYOLOJİK VE TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Çok Amaçlı Kullanımı Mümkün Kılan Yapısal Avantajlar

Mikroalglerin biyoteknolojik uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmasının temelinde, bu organizmaların sahip olduğu özgün biyolojik özellikler ile bu özelliklerin mühendislik sistemlerine entegre edilebilmesini sağlayan teknolojik uyumlulukları yer almaktadır. Mikroalgler; fotosentetik verimlilikleri, hızlı büyüme hızları, metabolik çeşitlilikleri ve çevresel koşullara yüksek adaptasyon yetenekleri sayesinde tek bir ürüne değil, çoklu ürün ve süreçlere hizmet edebilen canlı sistemler olarak tanımlanmaktadır (Borowitzka, 2013; Wijffels, Kruse, ve Hellingwerf, 2013).

2.1. Fotosentetik Verim ve Karbon Asimilasyon Kapasitesi

Mikroalgler, güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürme konusunda kara bitkilerine kıyasla daha yüksek teorik fotosentetik verimlere sahiptir. Bunun temel nedeni, mikroalg hücrelerinin yapısal olarak fotosenteze daha fazla kaynak ayırabilmesi ve lignin gibi yapısal bileşenlere ihtiyaç duymamasıdır (Melis, 2009). Ayrıca mikroalgler, yüksek CO₂ konsantrasyonlarına tolerans gösterebilmekte ve bu özelliği sayesinde endüstriyel baca gazları gibi karbon kaynaklarının biyolojik olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Benemann, 2013).

Bu özellik, mikroalgleri yalnızca biyokütle üreticisi değil, aynı zamanda biyolojik karbon yakalama ve dönüştürme aracı hâline getirmektedir. Karbon asimilasyonunun doğrudan biyokütle artışına dönüşmesi, mikroalg tabanlı sistemlerin enerji ve çevre uygulamalarında birlikte değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır (Singh ve Olsen, 2011).

2.2. Hızlı Büyüme ve Yüksek Biyokütle Verimi

Mikroalglerin bir diğer kritik avantajı, kısa jenerasyon süreleri ve yüksek büyüme hızlarıdır. Uygun koşullar altında bazı mikroalg türleri günde birden fazla bölünme gerçekleştirebilmekte, bu da birim zamanda yüksek miktarda biyokütle üretimini mümkün kılmaktadır (Chisti, 2007). Bu özellik, mikroalglerin hem sürekli üretim sistemlerine hem de endüstriyel ölçekli biyoproseslere uyarlanabilmesini kolaylaştırmaktadır.

Hızlı biyokütle artışı, mikroalglerin atıksu arıtımı gibi besin elementlerinin bol olduğu sistemlerde etkin biçimde kullanılmasına olanak tanırken; kontrollü kültürasyon koşullarında ise belirli metabolitlerin (lipidler, pigmentler, proteinler) hedefli olarak artırılmasına imkân sağlamaktadır (Markou ve Nerantzis, 2013).

2.3. Metabolik Esneklik ve Ürün Çeşitliliği

Mikroalglerin çok amaçlı kullanım potansiyelinin merkezinde, sahip

oldukları metabolik esneklik yer almaktadır. Birçok mikroalg türü; ototrofik, mikсотrofik ve heterotrofik metabolizma yollarını kullanabilmekte, bu da farklı besin ve enerji kaynaklarına uyum sağlayabilmelerini mümkün kılmaktadır (Chen, Zhang, ve Lee, 2011).

Bu metabolik çeşitlilik sayesinde mikroalgler:

Lipidler (biyoyakıt hammaddesi),

Proteinler (gıda ve yem),

Pigmentler (ör. karotenoidler, klorofiller),

Polisakkaritler ve biyoaktif bileşikler gibi farklı ürünleri aynı biyokütle içerisinde sentezleyebilmektedir (Borowitzka, 2013).

Bu durum mikroalgleri, tek çıktılı biyoproseslerden ziyade çok ürünlü biyorefineri sistemleri için uygun bir biyolojik platform hâline getirmektedir (Cherubini, 2010).

2.4. Çevresel Koşullara Uyum ve Dayanıklılık

Mikroalgler; sıcaklık, ışık şiddeti, tuzluluk ve besin konsantrasyonu gibi çevresel değişkenlere karşı geniş tolerans aralıklarına sahiptir. Bu özellik, mikroalglerin farklı iklim ve coğrafi koşullarda yetiştirilebilmesini mümkün kılmakta ve açık havuzlardan kapalı fotobiyoreaktörlere kadar farklı üretim sistemlerinde kullanılabilmelerini sağlamaktadır (Ugwu, Aoyagi, ve Uchiyama, 2008).

Ayrıca mikroalgler, stres koşulları altında metabolik yönlendirme göstererek belirli ürünleri daha yüksek oranda biriktirebilmektedir. Örneğin azot kısıtı altında lipid birikiminin artması, biyoyakıt üretimi açısından sıkça kullanılan bir stratejidir (Hu vd., 2008). Bu özellik, mikroalg biyoproseslerinin kontrollü stres yönetimi ile optimize edilebilmesine olanak tanımaktadır.

2.5. Teknolojik Entegrasyona Uygunluk

Mikroalglerin biyolojik avantajları, teknolojik sistemlerle entegrasyon kabiliyetiyle birleştğinde çok daha güçlü bir potansiyel ortaya çıkmaktadır. Mikroalg kültürleri; açık sistemler (yarış kanallı havuzlar) ve kapalı sistemler (tübüler, panel veya torba tipi fotobiyoreaktörler) gibi farklı üretim altyapılarına uyarlanabilmektedir (Wijffels ve Barbosa, 2010).

Bu teknolojik esneklik, mikroalglerin:

Enerji üretim sistemlerine,

Tarımsal üretim zincirlerine,

Atıksu arıtma tesislerine

entegre edilmesini mümkün kılarak enerji-tarım-çevre sistemleri ara-

sında biyolojik bir köprü oluşturmaya olanak tanımaktadır (Rawat vd., 2011).

2.6. Değerlendirme

Mikroalglerin temel biyolojik ve teknolojik özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, bu organizmaların neden çok sayıda sektörde eş zamanlı olarak kullanılabildiği açıkça görülmektedir. Yüksek fotosentetik verim, hızlı büyüme, metabolik çeşitlilik ve mühendislik sistemlerine uyum kabiliyeti, mikroalgleri klasik biyokütle kaynaklarından ayıran temel unsurlardır. Bu özellikler, mikroalgleri yalnızca bir üretim girdisi değil, entegre ve çok amaçlı biyoteknolojik sistemlerin merkezi bileşeni hâline getirmektedir.

3. ENERJİ SİSTEMLERİ PERSPEKTİFİNDE MİKROALGLER

Küresel enerji sistemleri, fosil yakıtlara bağımlılığın çevresel ve ekonomik sonuçları nedeniyle önemli bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşüm sürecinde, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi kadar, bu kaynakların çevreyle uyumlu ve entegre sistemler içinde kullanılabilmesi de kritik öneme sahiptir. Mikroalgler, enerji üretimi sırasında karbondioksit tüketmeleri, yüksek biyokütle üretim potansiyeline sahip olmaları ve farklı enerji taşıyıcılarına dönüştürülebilmeleri nedeniyle bu bağlamda dikkat çeken biyolojik sistemler arasında yer almaktadır (Chisti, 2007; Wijffels ve Barbosa, 2010).

3.1. Mikroalglerden Biyoyakıt Üretimi

Mikroalglerin enerji sistemlerindeki en bilinen kullanım alanı biyoyakıt üretimidir. Özellikle bazı mikroalg türlerinin yüksek lipid içeriği, bu organizmaları biyodizel üretimi açısından cazip hâle getirmiştir. Mikroalg lipidleri, transesterifikasyon yoluyla biyodizele dönüştürülebilmekte ve elde edilen yakıt, mevcut dizel motorlarla uyumlu olabilmektedir (Mata vd., 2010).

Bununla birlikte mikroalg biyokütlesi yalnızca biyodizel üretimi için değil, anaerobik sindirim yoluyla biyogaz üretimi veya fermentatif ve fotosentetik süreçlerle biyohidrojen üretimi için de değerlendirilebilmektedir (Brennan ve Owende, 2010). Bu durum, mikroalgleri tek bir enerji taşıyıcısına bağlı kalmayan çoklu biyoyakıt platformları hâline getirmektedir.

3.2. Enerji Verimliliği ve Karbon Döngüsü

Mikroalg tabanlı enerji sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, enerji üretimi ile karbon yönetiminin eş zamanlı olarak ele alınabilmesidir. Mikroalgler fotosentez yoluyla CO₂'yi biyokütleyle dönüştürerek, enerji üretim süreçlerinin karbon ayak izini azaltma potansiyeli sunmaktadır (Benemann, 2013). Özellikle endüstriyel baca gazlarının mikroalg kültürlerinde karbon kaynağı olarak kullanılması, fosil yakıt temelli enerji sistemleri ile biyolojik üretim süreçleri arasında bir entegrasyon imkânı sağlamaktadır (Singh ve

Olsen, 2011). Bu bağlamda mikroalgler, enerji üretim zincirinde yalnızca bir yakıt hammaddesi değil, aynı zamanda biyolojik karbon dengeleme aracı olarak da değerlendirilmektedir.

3.3. Entegre Enerji Sistemleri ve Biyorefineri Yaklaşımı

Güncel literatürde mikroalg tabanlı enerji sistemlerinin başarısı, çoğu zaman biyorefineri yaklaşımıyla ilişkilendirilmektedir. Bu yaklaşımda mikroalg biyokütlesi, yalnızca enerji üretimi için değil; aynı zamanda gıda, yem, gübre veya yüksek katma değerli kimyasalların üretimi için de kullanılmaktadır (Cherubini, 2010). Enerji üretimi, bu çoklu ürün zincirinin bir parçası olarak konumlandırıldığında, mikroalg tabanlı sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliği önemli ölçüde artmaktadır. Enerji, çevre ve tarım sektörlerinin aynı üretim platformunda buluşması, mikroalgleri klasik yenilenebilir enerji kaynaklarından ayıran temel özelliklerden biridir (Markou ve Nerantzis, 2013).

3.4. Atıksu ve Enerji Entegrasyonu

Mikroalg tabanlı enerji sistemleri, atıksu arıtımı ile entegre edildiğinde ek avantajlar sunmaktadır. Atıksularda bulunan azot ve fosfor gibi besin elementleri mikroalg büyümesini desteklerken, arıtım sürecinin sonunda elde edilen biyokütle enerji üretiminde kullanılabilir (Rawat vd., 2011). Bu yaklaşım, enerji üretimini doğrudan kaynak tüketimine dayalı bir süreç olmaktan çıkararak kaynak geri kazanımı temelli bir modele dönüştürmektedir.

Bu tür entegre sistemler, özellikle döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir enerji politikaları kapsamında mikroalglerin stratejik önemini artırmaktadır (Pittman vd., 2011).

3.5. Enerji Sistemleri Açısından Sınırlamalar ve Teknik Zorluklar

Her ne kadar mikroalgler enerji sistemleri için önemli avantajlar sunsa da, mevcut teknolojik ve ekonomik sınırlamalar göz ardı edilmemelidir. Kültivasyon maliyetleri, hasat ve susuzlaştırma süreçlerinin enerji yoğunluğu ve ölçek büyütme sorunları, mikroalg tabanlı enerji üretiminin ticarileşmesini sınırlandıran başlıca faktörlerdir (Wijffels ve Barbosa, 2010). Bu nedenle mikroalglerin enerji sistemlerindeki rolü, tek başına bir “alternatif yakıt çözümü” olarak değil; entegre ve çok ürünlü sistemlerin bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

3.6. Değerlendirme

Enerji sistemleri perspektifinden bakıldığında mikroalgler, yenilenebilir enerji üretimi ile çevresel sürdürülebilirliği bir araya getirebilen biyolojik platformlar olarak öne çıkmaktadır. Mikroalg tabanlı enerji üretimi, karbon yönetimi, atıksu arıtımı ve biyorefineri yaklaşımlarıyla birlikte ele alındığın-

da, geleceğin enerji sistemlerinde tamamlayıcı ve dönüştürücü bir rol üstlenme potansiyeline sahiptir.

4. TARIMSAL SİSTEMLERDE MİKROALG TABANLI UYGULAMALAR

Tarım sektörü, artan girdi maliyetleri, toprak bozunumu, su kaynaklarının azalması ve kimyasal gübrelerin çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilir alternatiflere yönelmektedir. Bu bağlamda mikroalgler, yalnızca besin elementi sağlayan bir girdi değil; toprak-bitki-mikroorganizma etkileşimlerini birlikte etkileyebilen biyolojik sistemler olarak dikkat çekmektedir. Mikroalg tabanlı uygulamalar, tarımsal üretimi verim artışıyla sınırlı olmayan, ekosistem temelli bir yaklaşıma taşımaktadır (Khan vd., 2009; Renuka vd., 2018).

4.1. Mikroalg Bazlı Biyogübreler

Mikroalglerin tarımda en yaygın kullanım alanlarından biri biyogübre uygulamalarıdır. Mikroalg biyokütlesi; azot, fosfor, potasyum gibi temel besin elementlerinin yanı sıra mikro besinler, amino asitler ve organik maddeler içermektedir. Bu bileşenler, bitki gelişimini doğrudan desteklerken, toprak yapısı ve biyolojik aktivite üzerinde de olumlu etkiler göstermektedir (Kumar ve Prakash, 2019). Kimyasal gübrelerden farklı olarak mikroalg bazlı biyogübreler, besin elementlerini yavaş ve kontrollü biçimde serbest bırakabilmekte; bu durum besin kayıplarını ve çevresel yükleri azaltmaktadır (Renuka vd., 2018). Ayrıca mikroalglerin toprakta mikrobiyal aktiviteyi teşvik etmesi, besin elementlerinin bitkiler tarafından alımını artıran dolaylı bir etki yaratmaktadır.

4.2. Biyostimülant Etkiler ve Bitki Gelişimi

Mikroalg ekstraktları, son yıllarda biyostimülant olarak önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bu ekstraktlar; büyüme düzenleyici bileşikler (auksinler, sitokininler), vitaminler ve antioksidanlar içermeleri sayesinde bitki metabolizmasını doğrudan etkileyebilmektedir (Plaza vd., 2009). Araştırmalar, mikroalg bazlı biyostimülantların bitki kök gelişimini teşvik ettiğini, fotosentetik aktiviteyi artırdığını ve bitkilerin abiyotik stres koşullarına (kuraklık, tuzluluk, sıcaklık) karşı toleransını yükselttiğini göstermektedir (Elarroussi vd., 2016). Bu özellikler, mikroalgleri yalnızca besleyici değil, bitki fizyolojisini düzenleyici biyolojik girdiler hâline getirmektedir.

4.3. Toprak Sağlığı ve Mikrobiyal Etkileşimler

Toprak sağlığı, sürdürülebilir tarımsal üretimin temel bileşenlerinden biridir. Mikroalg uygulamaları, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini eş zamanlı olarak etkileyebilmektedir. Mikroalg biyokütlesinin toprak organik maddesine katkısı, agregat stabilitesini ve su tutma kapasitesini artırarak bitki kök ortamını iyileştirmektedir (Kumar vd., 2020). Buna ek

olarak mikroalgler, rizosferdeki faydalı mikroorganizmalarla etkileşime girerek besin döngülerini destekleyebilmektedir. Bu etkileşimler, azot fiksasyonu ve fosfor çözünürlüğü gibi süreçlerin etkinliğini artırarak kimyasal girdilere olan bağımlılığı azaltma potansiyeli taşımaktadır (Renuka vd., 2018).

4.4. Atıksu Kökenli Mikroalg Biyokütlesinin Tarımda Kullanımı

Mikroalglerin atıksu arıtımı ile entegre olarak üretilmesi, tarımsal uygulamalar açısından özel bir önem taşımaktadır. Atıksularda yetiştirilen mikroalgler, besin elementlerini geri kazanarak biyokütleye dönüştürmekte; bu biyokütle daha sonra biyogübre veya biyostimülant olarak değerlendirilmektedir (Rawat vd., 2011). Bu yaklaşım, tarımda kullanılan girdilerin bir kısmının atık akımlarından sağlanmasına olanak tanıyarak döngüsel tarım sistemleri için güçlü bir model sunmaktadır. Ancak bu tür uygulamalarda ağır metal ve patojen riski gibi hususların dikkatle değerlendirilmesi gerektiği de vurgulanmaktadır (Nanda vd., 2019).

4.5. Tarımsal Sistemler Açısından Sınırlamalar

Mikroalg tabanlı tarımsal uygulamalar önemli avantajlar sunsa da, ölçeklenebilirlik, standart ürün elde edilmesi ve çiftçi düzeyinde uygulanabilirlik gibi konular hâlen araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Üretim maliyetleri, hasat ve kurutma süreçleri ile ürün formülasyonu, mikroalglerin tarımda yaygınlaşmasının önündeki temel teknik zorluklar arasında yer almaktadır (Kumar ve Prakash, 2019). Bu nedenle mikroalglerin tarımsal sistemlerdeki rolü, kimyasal gübrelerin doğrudan ikamesinden ziyade, tamamlayıcı ve sistem güçlendirici bir biyolojik girdi olarak değerlendirilmelidir.

4.6. Değerlendirme

Tarımsal sistemler perspektifinden ele alındığında mikroalgler; bitki besleme, biyostimülasyon, toprak sağlığı ve kaynak geri kazanımı gibi farklı süreçleri aynı biyolojik çerçevede birleştirebilen organizmalar olarak öne çıkmaktadır. Bu çok yönlü etki, mikroalgleri modern tarım sistemlerinde yalnızca alternatif bir girdi değil, sürdürülebilir üretimi destekleyen biyolojik bir ara yüz hâline getirmektedir.

5. Çevre Sistemleri Perspektifinde Mikroalgler

Çevre sistemleri, artan nüfus, endüstriyel faaliyetler ve yoğun tarımsal üretim nedeniyle ciddi baskı altındadır. Özellikle su kaynaklarının kirlenmesi, besin elementi yüklerinin artması ve karbon emisyonları, çevre mühendisliği alanında bütüncül ve sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyacı artırmıştır. Mikroalgler, bu sorunlara biyolojik temelli çözümler sunabilmeleri nedeniyle çevre sistemleri perspektifinde stratejik bir konuma yerleşmiştir (Rawat vd., 2011; Pittman vd., 2011).

5.1. Mikroalg Tabanlı Atıksu Arıtımı

Mikroalglerin çevre sistemlerindeki en önemli uygulama alanlarından biri atıksu arıtımıdır. Mikroalgler, büyümeleri için gerekli olan azot ve fosfor gibi besin elementlerini doğrudan atıksulardan alarak bu kirleticileri biyokütleye dönüştürebilmektedir. Bu süreç, konvansiyonel arıtma sistemlerinden farklı olarak, kirleticilerin uzaklaştırılmasının yanı sıra değerli bir biyolojik ürünün elde edilmesini de mümkün kılmaktadır (Craggs vd., 2014). Mikroalg tabanlı arıtma sistemleri; evsel, endüstriyel ve tarımsal kaynaklı atıksularda başarıyla uygulanabilmekte, özellikle besin elementi giderimi açısından yüksek performans sergilemektedir (González-Fernández vd., 2012). Bu yönüyle mikroalgler, ötrofikasyon riskinin azaltılmasında etkili bir biyolojik araç olarak değerlendirilmektedir.

5.2. Besin Elementi Geri Kazanımı ve Döngüsel Yaklaşımlar

Geleneksel atıksu arıtımında azot ve fosfor çoğunlukla uzaklaştırılması gereken kirleticiler olarak ele alınırken, mikroalg tabanlı sistemlerde bu elementler geri kazanılabilir kaynaklar hâline gelmektedir. Mikroalg biyokütlesi, bünyesinde biriktirdiği besin elementleri sayesinde daha sonra biyogübre veya toprak iyileştirici olarak kullanılabilir (Renuka vd., 2018).

Bu yaklaşım, çevre sistemlerini doğrusal bir “arıt-deşarj” modelinden çıkararak, kaynak geri kazanımına dayalı döngüsel çevre yönetimi anlayışına yaklaştırmaktadır (Cherubini ve Ulgiati, 2010).

5.3. Karbon Yakalama ve İklim Değişikliği Bağlamı

Mikroalglerin çevre sistemleri açısından bir diğer önemli katkısı, karbondioksit asimilasyonu yoluyla karbon döngüsüne olan etkileridir. Fotosentez sırasında atmosferden veya endüstriyel baca gazlarından alınan CO₂, mikroalg biyokütlesine dönüştürülmektedir. Bu özellik, mikroalgleri biyolojik karbon yakalama ve kullanım (bio-CCU) sistemlerinin önemli bir bileşeni hâline getirmektedir (Benemann, 2013). Enerji üretim tesisleriyle entegre mikroalg sistemleri, fosil yakıt kaynaklı emisyonların biyolojik olarak dengelenmesine katkı sağlayabilmekte; bu yönüyle iklim değişikliğiyle mücadelede tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir (Singh ve Olsen, 2011).

5.4. Ağır Metaller ve İz Kirleticilerin Giderimi

Mikroalgler, yalnızca besin elementlerini değil, aynı zamanda ağır metaller ve bazı iz kirleticileri de ortamdan uzaklaştırabilme yeteneğine sahiptir. Hücre yüzeylerindeki fonksiyonel gruplar sayesinde metal iyonlarını bağlayabilen mikroalgler, biyosorpsiyon mekanizmaları yoluyla su ortamlarının temizlenmesine katkı sunmaktadır (Wilde ve Benemann, 1993). Bu özellik, mikroalgleri özellikle endüstriyel atıksuların arıtımında ve ekosistem restorasyon çalışmalarında potansiyel bir biyolojik araç hâline getirmektedir. An-

cak bu tür uygulamalarda, kirletici birikimi olan biyokütlenin güvenli şekilde yönetilmesi kritik öneme sahiptir (Wang ve Chen, 2009).

5.5. Çevresel Uygulamalarda Sınırlamalar

Mikroalg tabanlı çevre uygulamaları önemli avantajlar sunmakla birlikte, bazı teknik ve operasyonel sınırlamalara da sahiptir. Işık gereksinimi, mevsimsel değişkenlik, kültür stabilitesi ve hasat süreçlerinin maliyeti, mikroalg sistemlerinin çevre mühendisliği uygulamalarında yaygınlaşmasını etkileyen faktörler arasında yer almaktadır (Craggs vd., 2014). Bu nedenle mikroalglerin çevre sistemlerindeki kullanımı, tek başına bir arıtma çözümü olarak değil; mevcut teknolojileri tamamlayan biyolojik bir bileşen olarak ele alınmalıdır.

5.6. Değerlendirme

Çevre sistemleri perspektifinden değerlendirildiğinde mikroalgler; atık-su arıtımı, besin elementi geri kazanımı, karbon yönetimi ve ekosistem iyileştirme gibi süreçleri aynı biyolojik çerçevede birleştirebilen organizmalar olarak öne çıkmaktadır. Bu çok yönlü işlevsellik, mikroalgleri sürdürülebilir çevre yönetimi yaklaşımlarında yalnızca bir arıtma aracı değil, döngüsel çevre sistemlerinin biyolojik omurgası hâline getirmektedir.

6. ENERJİ-TARIM-ÇEVRE ENTEGRASYONU: MİKROALG TABANLI SİSTEMLERİN BÜTÜNCÜL DEĞERLENDİRİLMESİ

Günümüz sürdürülebilirlik tartışmalarında enerji, tarım ve çevre sistemleri çoğu zaman ayrı disiplinler olarak ele alınsa da, bu alanların pratikte birbirinden bağımsız işlemesi mümkün değildir. Enerji üretimi su ve arazi kullanımıyla doğrudan ilişkilidir; tarımsal faaliyetler hem enerji girdilerine hem de çevresel koşullara bağımlıdır; çevre sistemleri ise bu iki sektörün çıktılarından doğrudan etkilenmektedir. Mikroalgler, bu üç alanı aynı biyolojik süreçler üzerinden birleştirebilen nadir sistemler arasında yer almaktadır (Cherubini, 2010; Wijffels ve Barbosa, 2010).

6.1. Entegre Sistem Yaklaşımının Kavramsal Temeli

Mikroalg tabanlı entegre sistemlerde temel yaklaşım, bir sektörde “atık” olarak tanımlanan girdilerin başka bir sektörde “kaynak” olarak değerlendirilmesidir. Atıksulardaki azot ve fosfor mikroalg büyümesi için besin kaynağı olurken, bu süreçte arıtılan su yeniden kullanıma kazandırılabilir. Aynı sistemde üretilen mikroalg biyokütlesi ise enerji üretimi veya tarımsal girdiler için değerlendirilebilmektedir (Rawat vd., 2011). Bu yaklaşım, doğrusal üretim modellerinden farklı olarak döngüsel kaynak kullanımına dayalı bir sistem mantığı sunmaktadır. Mikroalgler bu döngünün merkezinde yer alarak enerji, tarım ve çevre sistemleri arasında biyolojik bir bağlayıcı işlev görmektedir.

6.2. Enerji–Tarım Entegrasyonu

Enerji ve tarım sistemleri arasındaki entegrasyon, mikroalgler aracılığıyla iki yönlü olarak gerçekleştirilmektedir. Bir yandan tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atık sular ve CO₂ emisyonları mikroalg üretiminde kullanılabilirken, diğer yandan mikroalg biyokütlesi tarımda biyogübre veya biyostimülant olarak değerlendirilebilmektedir (Renuka vd., 2018). Bu karşılıklı etkileşim, tarımsal üretimde dış girdilere olan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda enerji üretimi için tarım alanlarının kullanımına yönelik eleştirilerin bir kısmını da geçersiz kılmaktadır; zira mikroalg üretimi çoğunlukla tarıma elverişli olmayan alanlarda ve atık akımları kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir (Chisti, 2007).

6.3. Enerji–Çevre Entegrasyonu

Enerji–çevre entegrasyonu açısından mikroalglerin en önemli katkısı, enerji üretimi ile karbon ve besin yönetiminin eş zamanlı olarak ele alınabilmesidir. Mikroalgler fotosentez yoluyla CO₂'yi biyokütleye dönüştürürken, aynı zamanda atıksulardaki kirleticilerin giderilmesine katkı sunmaktadır (Pittman vd., 2011). Bu özellik, mikroalg tabanlı sistemleri yalnızca “daha temiz enerji” üretiminden öteye taşıyarak, enerji üretim süreçlerinin çevresel etkilerini azaltan biyolojik tamponlar hâline getirmektedir. Özellikle enerji santralleriyle entegre mikroalg sistemleri, endüstriyel ekoloji yaklaşımının somut örnekleri arasında gösterilmektedir (Benemann, 2013).

6.4. Tarım–Çevre Entegrasyonu

Tarım ve çevre sistemleri arasındaki ilişki, çoğu zaman besin elementi kayıpları ve su kirliliği bağlamında problematik bir çerçevede ele alınmaktadır. Mikroalgler, bu ilişkinin yeniden yapılandırılmasına katkı sağlayabilecek biyolojik araçlar sunmaktadır. Tarımsal drenaj sularında bulunan azot ve fosforun mikroalgler tarafından tutulması, hem su kirliliğini azaltmakta hem de bu besinlerin tekrar tarımsal üretime kazandırılmasını mümkün kılmaktadır (Craggs vd., 2014). Bu yönüyle mikroalg tabanlı sistemler, tarımsal üretimin çevresel etkilerini azaltırken, aynı zamanda çevre sistemlerini destekleyen geri besleme mekanizmaları oluşturmaktadır.

6.5. Sistem Düzeyinde Değerlendirme ve Sürdürülebilirlik

Mikroalg tabanlı entegre sistemlerin gerçek potansiyeli, tekil performans göstergeleriyle değil, sistem düzeyinde yapılan değerlendirmelerle ortaya konulabilmektedir. Yaşam döngüsü analizi (LCA), enerji dengesi ve kaynak verimliliği çalışmaları, mikroalglerin entegre sistemlerdeki rolünü değerlendirmek için sıklıkla kullanılan araçlar arasında yer almaktadır (Singh ve Olsen, 2011). Bu analizler, mikroalg tabanlı sistemlerin başarısının; proses entegrasyonu, ölçek seçimi ve yerel koşullara uyum gibi faktörlere büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla mikroalgler, evrensel bir çözümünden zi-

yade, bağlama duyarlı entegre sistem bileşenleri olarak değerlendirilmelidir.

6.6. Değerlendirme

Enerji, tarım ve çevre sistemleri perspektifinden ele alındığında mikroalgler; kaynak geri kazanımı, karbon yönetimi ve çoklu ürün üretimini aynı biyolojik platformda birleştirebilen stratejik organizmalar olarak öne çıkmaktadır. Mikroalg tabanlı entegre sistemler, sürdürülebilir üretimin yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda sistem tasarımı meselesi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda mikroalgler, disiplinler arası sürdürülebilirlik yaklaşımlarının biyolojik merkezlerinden biri hâline gelmektedir.

7. UYGULAMA POTANSİYELİ, SINIRLAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Mikroalg tabanlı sistemler, enerji, tarım ve çevre alanlarında sundukları çok yönlü kullanım olanakları sayesinde sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının merkezinde yer alma potansiyeline sahiptir. Ancak bu potansiyelin pratik uygulamalara ve endüstriyel ölçeğe taşınabilmesi, yalnızca biyolojik avantajlara değil; aynı zamanda teknolojik, ekonomik ve yönetsel faktörlerin birlikte ele alınmasına bağlıdır. Bu bölümde mikroalg tabanlı sistemlerin uygulama potansiyeli, mevcut sınırlamaları ve gelecekteki gelişim yönleri bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmektedir.

7.1. Uygulama Potansiyeli ve Mevcut Başarı Alanları

Mikroalglerin uygulama potansiyeli, özellikle entegre sistemlerde daha belirgin hâle gelmektedir. Atıksu arıtımı ile biyokütle üretiminin birlikte yürütüldüğü sistemler, hem çevresel fayda hem de ekonomik katma değer sağlayabilmektedir. Benzer şekilde mikroalg biyokütlesinin enerji üretimi, biyogübre ve biyostimülant uygulamalarıyla birlikte değerlendirilmesi, sistem verimliliğini artırmaktadır (Rawat vd., 2011; Renuka vd., 2018). Pilot ve yarı endüstriyel ölçekte gerçekleştirilen uygulamalar, mikroalglerin özellikle yerel ve bölgesel ölçekte sürdürülebilir çözümler sunabileceğini göstermektedir. Bu durum, mikroalg tabanlı sistemlerin tekil bir “küresel çözüm” olmaktan ziyade, yerel koşullara uyarlanabilir modüler sistemler olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Wijffels ve Barbosa, 2010).

7.2. Teknolojik ve Operasyonel Sınırlamalar

Mikroalg tabanlı sistemlerin yaygınlaşmasının önündeki temel engellerden biri, üretim ve hasat süreçlerinin yüksek maliyetleridir. Özellikle biyokütlenin sudan ayrılması ve kurutulması, toplam enerji tüketimi içinde önemli bir paya sahiptir. Bu durum, enerji üretimi odaklı mikroalg uygulamalarının net enerji kazancını sınırlayabilmektedir (Singh ve Olsen, 2011). Buna ek olarak, açık sistemlerde kültür stabilitesinin korunması, kontaminasyon riski ve mevsimsel değişkenlik gibi faktörler; kapalı sistemlerde ise yüksek yatırım

maliyetleri önemli teknik zorluklar olarak öne çıkmaktadır (Ugwu vd., 2008). Bu sınırlamalar, mikroalglerin uygulama alanlarının dikkatli bir sistem tasarımıyla belirlenmesini zorunlu kılmaktadır.

7.3. Ekonomik ve Ölçeklendirme Sorunları

Mikroalg tabanlı sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliği, ölçeklendirme stratejileriyle doğrudan ilişkilidir. Laboratuvar ve pilot ölçekte elde edilen yüksek verimler, endüstriyel ölçekte her zaman tekrarlanamamaktadır. Bu durum, biyolojik süreçlerin mühendislik sistemlerine entegrasyonunda karşılaşılan temel zorluklardan biridir (Chisti, 2007). Bu nedenle mikroalg uygulamalarında, tek ürünlü ekonomik modeller yerine çoklu ürün ve hizmet sunan entegre değer zincirleri ön plana çıkmaktadır. Enerji üretimi, çevre hizmetleri ve tarımsal girdilerin birlikte değerlendirildiği modeller, mikroalg tabanlı sistemlerin ekonomik uygulanabilirliğini artıran başlıca yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Cherubini, 2010).

7.4. Gelecek Perspektifleri: Teknoloji ve Sistem Tasarımı

Gelecekte mikroalg tabanlı sistemlerin gelişimi, biyoteknoloji ile dijital teknolojilerin daha güçlü entegrasyonuna bağlı olacaktır. Yapay zekâ destekli süreç kontrolü, sensör tabanlı izleme sistemleri ve modelleme yaklaşımları; mikroalg kültürasyonunun daha öngörülebilir ve verimli hâle gelmesini sağlayacaktır (Wijffels vd., 2013). Ayrıca genetik ve metabolik mühendislik alanındaki ilerlemeler, mikroalglerin belirli ürünlere yönlendirilmesini mümkün kılarak biyorefineri yaklaşımlarını güçlendirecektir. Ancak bu tür uygulamaların çevresel ve etik boyutlarının da dikkatle değerlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

7.5. Değerlendirme ve Genel Sonuç

Mikroalg tabanlı sistemler, enerji, tarım ve çevre alanlarında sürdürülebilir çözümler sunabilen güçlü biyoteknolojik araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin başarısı tek başına biyolojik potansiyele değil; uygun ölçek seçimi, entegre sistem tasarımı ve yerel koşullara uyum gibi faktörlere bağlıdır. Bu bağlamda mikroalgler, tekil bir teknoloji olarak değil; sürdürülebilir üretim ve kaynak yönetimi stratejilerinin biyolojik bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir. Gelecekte mikroalg tabanlı uygulamaların yaygınlaşması, disiplinler arası iş birlikleri ve sistem odaklı yaklaşımlarla mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Benemann, J. R. (2013). Microalgae for biofuels and animal feeds. *Energies*, 6(11), 5869–5886. <https://doi.org/10.3390/en6115869>
- Borowitzka, M. A. (2013). High-value products from microalgae—Their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology*, 25(3), 743–756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>
- Brennan, L., ve Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., ve Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159>
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- Cherubini, F., ve Ulgiati, S. (2010). Crop residues as raw materials for biorefinery systems—A LCA case study. *Applied Energy*, 87(1), 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.024>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Craggs, R. J., Park, J. B. K., ve Heubeck, S. (2014). Nutrient removal and biomass production from anaerobically treated dairy and municipal wastewaters using high rate algal ponds. *Water Science and Technology*, 70(3), 371–377. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.245>
- Elarroussi, H., Benhima, R., Elbaouchi, A., ve Sijilmassi, B. (2016). Microalgae polysaccharides: A promising plant growth biostimulant. *Journal of Algal Biomass Utilization*, 7(2), 55–63.
- González-Fernández, C., Sialve, B., Bernet, N., ve Steyer, J. P. (2012). Thermal pretreatment to improve methane production of *Scenedesmus* biomass. *Bioresource Technology*, 110, 610–615. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.134>
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., ve Darzins, A. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: Perspectives and advances. *The Plant Journal*, 54(4), 621–639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03492.x>
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., ... Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28(4), 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Kumar, M., ve Prakash, S. (2019). Algal biofertilizers and biostimulants: Sustainable

- agriculture perspective. *Journal of Applied Phycology*, 31(6), 3495–3511. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01842-5>
- Kumar, R., Ghosh, A. K., ve Pal, P. (2020). Synergy of biofertilizer and biostimulant for sustainable agriculture. *Environmental Sustainability*, 3(3), 243–255. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00110-1>
- Markou, G., ve Nerantzis, E. (2013). Microalgae for high-value compounds and bio-fuels production: A review with focus on cultivation under stress conditions. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1532–1542. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.07.011>
- Mata, T. M., Martins, A. A., ve Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Melis, A. (2009). Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. *Plant Science*, 177(4), 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.06.005>
- Nanda, S., Azargohar, R., Dalai, A. K., ve Kozinski, J. A. (2019). An assessment on the sustainability of microalgae based bioenergy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 380–398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.037>
- Pittman, J. K., Dean, A. P., ve Osundeko, O. (2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*, 102(1), 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.035>
- Plaza, M., Herrero, M., Cifuentes, A., ve Ibáñez, E. (2009). Innovative natural functional ingredients from microalgae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(16), 7159–7170. <https://doi.org/10.1021/jf901070g>
- Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T., ve Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411–3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Renuka, N., Prasanna, R., Sood, A., Ahluwalia, A. S., Bansal, R., Babu, S., ... Nain, L. (2018). Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(5), 4718–4729. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0821-9>
- Singh, J., ve Olsen, S. I. (2011). A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. *Applied Energy*, 88(10), 3548–3555. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.012>
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H., ve Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, 99(10), 4021–4028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046>
- Wang, J., ve Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, 27(2), 195–226. <https://doi.org/10.1016/j.biotech>

[hadv.2008.11.002](#)

- Wilde, E. W., ve Benemann, J. R. (1993). Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae. *Biotechnology Advances*, 11(4), 781–812. [https://doi.org/10.1016/0734-9750\(93\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0734-9750(93)90003-6)
- Wijffels, R. H., ve Barbosa, M. J. (2010). An outlook on microalgal biofuels. *Science*, 329(5993), 796–799. <https://doi.org/10.1126/science.1189003>
- Wijffels, R. H., Kruse, O., ve Hellingwerf, K. J. (2013). Potential of industrial biotechnology with cyanobacteria and eukaryotic microalgae. *Current Opinion in Biotechnology*, 24(3), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.04.004>



TARIMDA NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) TABANLI DİJİTAL SU YÖNETİMİ SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI

“ ”

Tahsin Uygun¹

Mesut Çoşlu²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Burdur, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9625-9513

² Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Burdur, Türkiye, ORCID: 0000-0003-3952-6563

1. GİRİŞ

Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) projeksiyonlarına göre, 2050 yılına kadar dünya nüfusu 9.1 milyar civarında olacak ve bu da zaten yüksek olan küresel gıda talebini önemli ölçüde artıracaktır (Vallejo-Gómez ve ark., 2023). Dünya nüfusunun yaklaşık yarısı yılın en az bir bölümünde ciddi su kıtlığı yaşamaktadır. Bu kapsamda kişi başına yenilenebilir su mevcudiyeti son on yılda yüzde 7 daha azalırken, birkaç bölgede zaten kıt olan tatlı su kaynakları üzerindeki baskı önemli ölçüde artmaktadır. Küresel ölçekte artan su talebi ve özellikle tatlı su kaynaklarının sınırlı olması günümüzde tarımsal üretimde suyun etkin ve sürdürülebilir yönetimini zorunlu hale getirmektedir. Dünya genelinde toplam tatlı su tüketiminin yaklaşık %70'inin tarımsal sulama amaçlı kullanılması, tarım sektörünü su yönetimi politikalarının merkezine yerleştirmektedir (UNESCO, 2024; FAO, 2025). Tarımda hassas sulama için tatlı suyun akıllı yönetimi, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunurken mahsul verimini artırmak ve maliyetleri düşürmek için de gereken önemli bir faktördür (Kamienski, 2019).

Tarımsal uygulamalarda kritik bir öneme sahip olan verimli su yönetimi, sulama zamanlamasıyla doğrudan ilişkilidir; doğru sulama zamanlaması, bitkilerin uygun, yeterli ve dengeli su almasını sağlayarak hem verim hem de kaynak kullanım etkinliğini etkiler. Ancak geleneksel sulama yöntemleri ve sulama suyunun kötü yönetimi, sıkça karşılaşılan sorunlar arasında yer almakta, su israfına yol açmakta ve optimal olmayan mahsul verimine neden olmaktadır (Teshome ve ark., 2018; Ayodele, 2025). Küresel gıda güvenliğinin temelini oluşturan tarımda, su kıtlığı ve verimsiz sulama uygulamaları sürdürülebilir üretim hedefleri açısından önemli zorluklar yaratmaktadır (Zhu, 2025). Bu bağlamda, geleneksel sulama yöntemlerinin günümüzün sürdürülebilir tarım hedeflerini karşılamada yetersiz kaldığı görülmektedir; bu da modern, veri odaklı ve IoT tabanlı sulama teknolojilerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır.

Son yıllarda artan küresel su krizleriyle başa çıkmak için çok sayıda yöntem ve çözüm kullanılmaktadır. İklim değişikliği altında tarımda verimli su yönetimi için hassas sulama sistemlerinin kullanılması bunlardan biridir (Lakhiar ve ark., 2024). Dijital tarım uygulamalarının gelişimiyle birlikte, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT) tabanlı sistemler, tarım sektörünü modernize eden yenilikçi çözümler sunarak, özellikle tarımsal su yönetiminde de önemli bir dönüşüm sağlamaktadır (Farooq ve ark., 2020). Toprak nem sensörleri, meteorolojik istasyonlar, bitki sensörleri ve uzaktan algılama verileriyle entegre çalışan IoT sistemleri, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz imkânı sunarak sulama kararlarının daha hassas ve veriye dayalı biçimde alınmasını mümkün kılmaktadır (Fuentes-Peñailillo ve ark., 2025). Bu sistemler sayesinde bitkinin gerçek su ihtiyacına göre sulama yapılabilmekte, su kullanım etkinliği artırılmakta ve çevresel etkiler azaltılabilmektedir. Nite-

kim Fuentes-Peñailillo ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen bulgular, uzaktan algılama, kablosuz sensör ağları ve agro-meteorolojik girişlerin birleştirilmesinin, verim kaybı olmadan su kullanımını %30'a kadar azaltabileceğini göstermiştir. Bir çalışmada akıllı sulama yönetimi koşullarında bitkinin hassas fenolojik aşamalarının daha erken gerçekleştiği, alanın yaklaşık bir ay önce hasat edilmeye hazır olduğu ve sulama suyu tüketiminin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir (Sharifnasab ve ark., 2023). Bir başka çalışmada ise marul bitkisinde IoT tabanlı sistemin daha az su kullandığı ve bu sayede sulama verimliliğini artırdığı tespit edilmiştir (Abdelmoneim ve ark., 2025a). Bu uygulamalar verimli su yönetiminin özellikle tarım için çok önemli olduğunu ve IoT teknolojilerinin sulama sistemlerine entegrasyonu ile kaynak kullanımını optimize etmek için yenilikçi çözümler sunacağını göstermektedir. Ayrıca, küresel anlamda su kıtlığı, gıda güvenliği ve iklim değişikliği zorlukları arttıkça, IoT tabanlı akıllı sulama sistemleri tarımsal esneklik ve sürdürülebilirliği artırmada önemli bir rol oynamakta, aynı zamanda tarımın iklim değişikliği ve su kıtlığına karşı adaptasyon kapasitesini güçlendirmektedir (Abdelmoneim ve ark., 2025b). Bu sistemler sayesinde tarımsal faaliyetlerin çevresel etkileri azalmakta, su kaynakları daha etkin kullanılmakta ve ekosistem üzerindeki baskı hafifletilmektedir. Çiftçi perspektifinden değerlendirildiğinde ise, sistemler gerçek zamanlı veri ve analiz sağlayarak karar alma süreçlerini desteklemekte ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha hassas sulama yönetimi imkânı sunmaktadır.

Bu kitap bölümünde, artan su kıtlığı ve tarımsal üretimde su verimliliği gereksinimi çerçevesinde, IoT tabanlı dijital su yönetimi yaklaşımlarının akıllı sulama bağlamındaki rolünü bütüncül bir çerçevede ele almaktadır. Temel amaç; tarımsal sulamada sensör verisi, haberleşme altyapısı, veri yönetimi ve otomasyon bileşenlerinin nasıl bir araya gelerek veriye dayalı sulama kararlarını mümkün kıldığını açıklamak ve bu ekosistemin tasarımında dikkate alınması gereken teknik unsurları sistematik biçimde ortaya koymaktır. Bu kapsamda dijital su yönetimi kavramı ve ilişkili teknolojik bileşenler tanımlandıktan sonra IoT ekosistemi katmanlı mimari üzerinden açıklanmakta; IoT tabanlı akıllı sulama mimarisi, ölçüm/izleme altyapısı, kablosuz haberleşme teknolojileri ve protokoller ile veri yönetimi–IoT platformları bileşenleri akış odaklı biçimde incelenmektedir. Ardından karar verme ve otomasyon yaklaşımları, karar mantığı ve kontrol döngüsü ekseninde sınıflandırılarak akıllı sulama sistemlerinin işleyişiyle ilişkilendirilmektedir. Son olarak literatürdeki uygulama örnekleri üzerinden saha kullanımı, ölçeklenebilirlik ve sürdürülebilirlik açısından öne çıkan yönler tartışılarak bölümün ana çıkarımları sonuç bölümünde derlenmektedir.

2. DİJİTAL SU YÖNETİMİ

Dijital teknolojiler su kıtlığı, kirlilik, verimsiz kullanım ve iklim değişikliği etkileri de dahil olmak üzere tarımla ilgili büyük zorlukları ele almak

için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu kapsamda özellikle uzaktan algılama, yapay zekâ, nesnelerin interneti, büyük veriler, robotik, akıllı sensörler ve blok zinciri daha verimli ve sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarına katkıda bulunan teknolojilerdir. Her ne kadar bu teknolojiler tek başına da kullanılsa birden fazla dijital teknolojinin entegrasyonu, daha kapsamlı ve etkili su yönetimi mleri geliştirmek için büyük umut vaat etmektedir. Örneğın, uzaktan algılamayı nesnelerin interneti sensörleri ve yapay zekâ ile birleştirmek daha doğru ve zamanında sulama kararları almayı sağlayacaktır (Parra-Lpez ve ark., 2025).

Dijital su yönetimi, tarımsal sulama süreçlerinde su kullanım etkinliğini artırmak ve kaynak israfını azaltmak amacıyla giderek daha fazla benimsenmektedir. Bu kapsamda uzaktan algılama ile sulama zamanlaması ve toprak nemi izlemenin optimizasyonu (Zappa ve ark., 2024), yapay zekâ ile gerçek zamanlı su kalitesi bilgileri (Kapoor ve ark., 2024), IoT tabanlı hassas sulama sistemleri (Monteleone ve ark., 2020), büyük veri tabanlı uygulamalar (Giray ve Catal, 2021), robotik ile hava tahminlerini kullanarak mahsul, toprak izleme ve otomatik sulama (Dechemi ve ark., 2023), akıllı sensörler ile hassas tarımda geliştirilmiş su kullanımı verimliliği için akıllı sulama, izleme ve kontrol (Bwambale ve ark., 2022) ve blok zinciri ile su yönetimi verimliliğinin iyileştirilmesi (Satılmisoglu ve ark., 2024) alışmaları örnek olarak verilebilir. Bu alışmalar, dijital su yönetiminin tarımsal üretimde hem verimliliği artıran hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen çok yönlü bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Bu dijital su yönetimi uygulamaları, sulama süreçlerinde su kullanım etkinliğini önemli ölçüde artırmakta ve bitki su ihtiyaına uygun hassas sulama ile mahsul verimliliğini optimize etmektedir. Gerçek zamanlı veri takibi, sensör ağları ve IoT tabanlı otomasyon sayesinde çiftçiler, sulama kararlarını veri odaklı olarak alabilmekte ve geleneksel yöntemlere kıyasla su kayıplarını azaltmaktadır (Abdelmoneim ve ark., 2025; Mohiuddin ve ark., 2024). Ayrıca, yapay zekâ ve büyük veri tabanlı analizler, uzun vadeli planlamada su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımına katkı sağlamakta, ekosistem üzerindeki baskıyı azaltmakta ve tarımsal üretimde çevresel etkileri minimize etmektedir (Vallejo-Gmez ve ark., 2023). Bu bütünleşik yaklaşım hem tarımsal üretimde ekonomik verimliliği hem de su kaynaklarının korunmasını sağlayarak, dijital su yönetiminin sürdürülebilir tarım hedefleri için vazgeçilmez bir araç olduğunu göstermektedir.

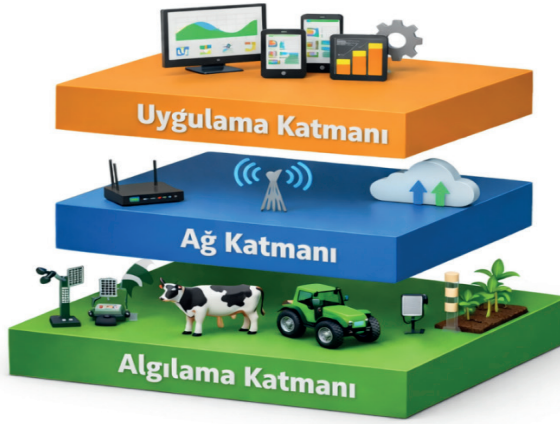
Dijital teknolojilerin tarımsal su kullanımı ve yönetimindeki bu önemli potansiyeline rağmen, yaygın olarak benimsenmesini ve uygulanmasını kısıtlayan bazı engeller de bulunmaktadır. Örneğın IoT teknolojisinin tarım ve dijital su yönetimi gibi alanlarda sağladığı faydalara rağmen, ele alınması gereken çeşitli zorluklar ve sorunlar bulunmaktadır. Öncelikle gizlilik ve güvenlik endişeleri önemli bir konudur; IoT cihazları günlük yaşamımıza ve

tarımsal operasyonlara giderek daha fazla entegre oldukça, veri yaşam döngüsü boyunca gizlilik ve güvenliğin sağlanması kritik hale gelmektedir. Sensörlerden toplanan verilerin iletimi ve analizi sırasında izinsiz erişim ve siber tehditler riski bulunmaktadır. Bu nedenle IoT tabanlı sistemlerin tasarımında ve işletilmesinde, veri güvenliği ve mahremiyetin korunmasına yönelik önlemler alınması büyük önem taşımaktadır (Parra-López ve ark., 2025).

3. IOT EKOSİSTEMİ

İnternetin ilk dönemlerinde sistemler daha çok kullanıcının doğrudan etkileşimine bağlıyken, akıllı iletişim teknolojilerinin gelişmesiyle kablolu ve kablosuz ağlar üzerinden cihazların kendi aralarında veri alışverişi yapabildiği makineden makineye (M2M) yaklaşımı yaygınlaşmıştır (Adame ve ark. 2014). M2M; sensör ve ağ bileşenleri kurularak sahadan veri toplanması, bu verinin iletişim kanalları üzerinden aktarılması ve sonuçların kullanıcıya iletilmesi gibi daha çok “izleme ve raporlama” odaklı bir yapı olarak değerlendirilebilir. IoT ise M2M’den evrilerek; farklı nesnelerin insan müdahalesi olmadan iletişim kurduğu, veriyi yalnızca taşımakla kalmayıp hizmet üretmek üzere işlediği ve uygulamalara dönük çıktılar oluşturduğu bir ekosistem haline gelmiştir. Bu bağlamda IoT’nin temel işlevleri; veri toplama ve işleme, planlama ve karar verme ile reçete/servis sunumu şeklinde özetlenmektedir (Zhou ve ark. 2012; Zhang ve ark. 2017).

IoT ekosistemi Şekil 1’de gösterildiği gibi genellikle algılama (perception) katmanı, ağ (network) katmanı ve uygulama (application) katmanı olmak üzere üç katman üzerinden açıklanır (Shi ve ark. 2019). Algılama katmanında tarla, sera, hayvancılık işletmeleri ve tarımsal makineler gibi farklı ortamlara yerleştirilen sensör düğümleri, çeşitli parametreleri gerçek zamanlı olarak ölçer. Ölçülen veriler çoğunlukla yerel bir ağ geçidine (gateway) iletilir; ağ katmanı ise bu verileri kablosuz algılayıcı ağlar (WSNs) üzerinden toplayarak bulut ortamına aktarır (Shi ve ark. 2019). Son aşamada uygulama katmanı, bulutta toplanan verileri tarımsal süreçlere uyarlayarak izleme, yönetim ve kontrol gibi işlevleri destekler; ayrıca insansız/otonom uygulamalara da temel oluşturur (Moon ve ark. 2018; Wang ve ark. 2020). Bu nedenle IoT ekosistemi, tarımda yalnızca veri toplamayı değil, veriye dayalı karar üretmeyi ve sahada uygulanabilir hizmetlere dönüştürmeyi mümkün kılan bütünleşik bir yapı olarak değerlendirilmektedir (Zhou ve ark. 2012; Zhang ve ark. 2017).



Şekil 1. Genel IoT ekosistemi

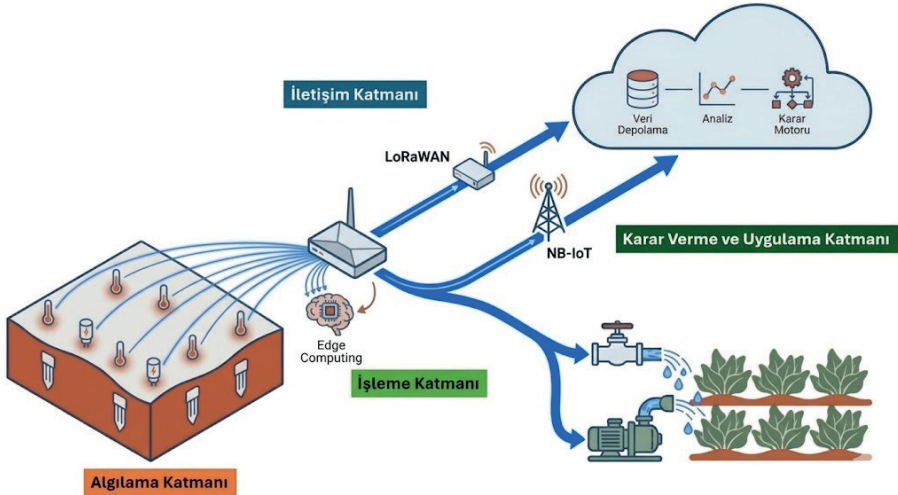
Son yıllarda kablosuz algılayıcı ağlardaki (WSN) ilerlemeler; farklı veri türlerinin daha kolay, daha düşük maliyetle ve daha yaygın ölçülmesini mümkün kılmıştır (Glaroudis ve ark. 2020). Bu gelişmeler sayesinde IoT, tarımsal üretimde çeşitli problemlere çözüm sunarak sürdürülebilir ve verimli üretim yaklaşımlarını destekleyen bir teknoloji altyapısına dönüşmüştür (Antony ve ark. 2020). Tarım uygulamalarında IoT temelli çözümler yönetim sistemleri, izleme sistemleri, kontrol sistemleri ve insansız/otonom makineler gibi başlıklar altında ele alınmaktadır (Aqeel-ur-Rehman ve ark. 2014; Talavera ve ark. 2017). Bu sınıflandırma içinde özellikle izleme ve kontrol sistemleri, toprak-bitki-atmosfer etkileşiminin anlık izlenmesi ve sulama uygulamasının otomasyonla yönetilebilmesi nedeniyle akıllı sulama senaryolarının temelini oluşturur (Kim ve ark., 2020). Bu yönüyle akıllı sulama sistemleri, sensör verisi, haberleşme altyapısı ve karar mekanizmalarıyla suyun doğru zamanda ve doğru miktarda uygulanmasını hedefleyen dijital su yönetimi yaklaşımlarının tarımdaki en yaygın ve doğrudan uygulamalarından biri olarak değerlendirilmektedir.

4. IOT TABANLI AKILLI SULAMA SİSTEM MİMARİSİ

IoT tabanlı akıllı sulama sistemleri, hassas tarım yaklaşımı kapsamında suyun doğru zamanda ve doğru miktarda uygulanmasını destekleyerek su kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkı sağlar (Goap ve ark. 2018). Toprağın ihtiyaç duyduğu optimum suyun belirlenmesi ve sahaya uygulanması amacıyla, sensör verisine dayalı çok sayıda IoT tabanlı sulama yaklaşımı geliştirilmiştir (Muhammad ve ark. 2016). Bu yaklaşımlarda temel fikir; sulama kararının kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan, sahadan elde edilen

ölçümler ve bağlamsal bilgiler (örn. çevresel koşullar) üzerinden otomatik üretilmesidir. Örneğin gerçek zamanlı toprak su/nem içeriğini temel alan ve bu veriye göre yağmurlama sistemini otonom biçimde çalıştırarak hedef nem seviyesini koruyan uygulamalar rapor edilmiştir (Chowdhury ve Raghukiran 2017). Benzer şekilde, hava tahmini gibi ek verilerin sisteme dâhil edilmesiyle uzaktan erişim/uzaktan kontrol yetenekleri güçlendirilmekte; aşırı sulama riskinin azaltılması ve bitki stresinin önlenmesi hedeflenmektedir (Chowdhury ve Raghukiran 2017).

Bu bölümde ele alınan genel mimari, Şekil 2 üzerinde katmanlı biçimde özetlenmiştir. Buna göre Algılama Katmanı, tarla/sera gibi üretim alanına yerleştirilen sensör düğümleriyle (ör. toprak nemi vb.) ölçüm yapar; veriler yerel birimlere iletilerek İşleme Katmanında ön işleme/filtreleme gibi adımlardan geçirilebilir. Ardından İletişim Katmanı, veriyi LoRaWAN veya NB-IoT gibi teknolojiler üzerinden ağa/servislere taşır. Bulut tarafında veri depolama, analiz ve karar motoru bileşenleriyle işlenerek “sulama başlat/durdur, süre/debi ayarla” gibi çıktılar üretilir ve bu çıktılar vana-pompa gibi eyleyiciler aracılığıyla Karar Verme ve Uygulama Katmanında sahaya uygulanır. IoT’nin tarımdaki kullanım alanı yalnızca sulama kontrolüyle sınırlı değildir; örneğin pH temelli izleme ve kontrol yaklaşımıyla belediye atık sularının arıtılıp tarımsal amaçla yeniden kullanımını destekleyen IoT çözümleri de geliştirilmiştir (Khatrı ve ark. 2018).



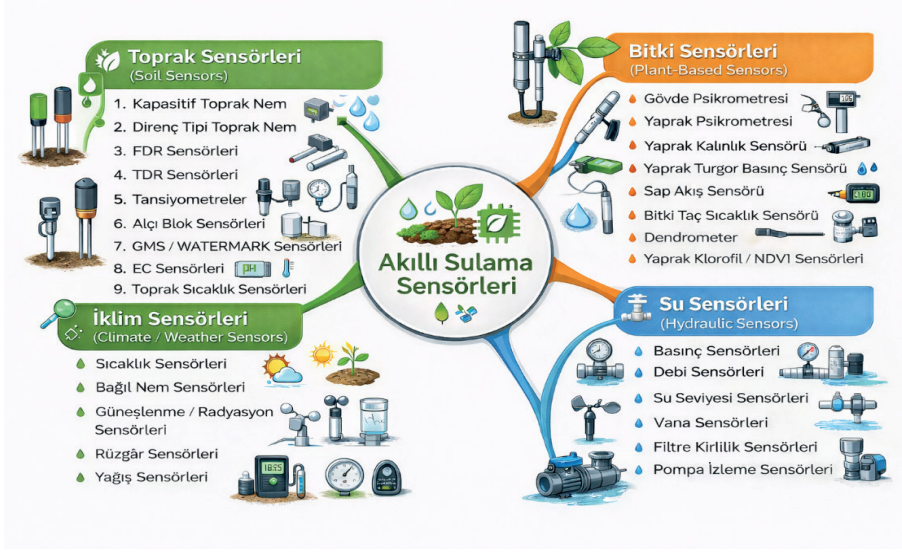
Şekil 2. IoT tabanlı akıllı sulama sistemi genel mimarisi

5. ÖLÇÜM VE İZLEME ALTYAPISI

IoT tabanlı akıllı sulama sistemlerinin etkinliği, sahadan elde edilen verinin doğruluğu, sürekliliği ve temsil gücü ile doğrudan ilişkilidir. Bu neden-

le ölçüm ve izleme altyapısı, sistem mimarisinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilir. Akıllı sulama uygulamalarında ölçüm altyapısı; toprak, bitki, iklim ve su/hidrolik bileşenlerine ait sensörlerden oluşan çok katmanlı bir yapı şeklinde kurgulanır. Bu yapı, sulama kararlarının yalnızca tek bir parametreye değil, toprak-bitki-atmosfer-su sistemi etkileşimine dayalı olarak verilmesini mümkün kılar. Şekil 3, akıllı sulama sistemlerinde kullanılan ölçüm ve izleme altyapısının genel bir görünümünü sunmaktadır. Buna göre toprak sensörleri, kök bölgesindeki nem durumu, sıcaklık, tuzluluk ve pH gibi parametreleri izleyerek toprağın su tutma kapasitesi ve bitkiye sunulan suyun durumu hakkında doğrudan bilgi sağlar. Bu sensörler, sulamanın ne zaman başlatılacağı ve ne kadar süre devam edeceği gibi temel kararların oluşturulmasında kritik rol oynar. Özellikle nem ve su potansiyeline dayalı ölçümler, aşırı veya yetersiz sulamanın önlenmesine katkı sunar.

Bitki sensörleri, ölçüm altyapısının doğrudan bitkinin fizyolojik tepkilerini izleyen bileşenleridir. Yaprak, gövde veya ta seviyesinde gerçekleştirilen ölçümler; bitkinin su stresini, büyüme durumunu ve transpirasyon davranışını ortaya koyar. Bu sayede sulama yönetimi yalnızca toprağın durumuna değil, bitkinin gerçek su ihtiyacına göre şekillendirilebilir. Bu yaklaşım, bitki temelli sulama stratejilerinin temelini oluşturur ve özellikle hassas tarım uygulamalarında öne çıkar. İklim sensörleri, bitki su tüketimini etkileyen atmosferik koşulların izlenmesini sağlar. Hava sıcaklığı, bağıl nem, güneş radyasyonu, rüzgâr ve yağış gibi parametreler; evapotranspirasyon süreçlerinin belirlenmesinde ve sulama planlamasının çevresel koşullara uyulanmasında kullanılır. Bu sensörlerden elde edilen veriler hem gerçek zamanlı izleme hem de tahmine dayalı sulama modelleri için girdi niteliği taşıır. Su sensörleri (hidrolik sensörler) ise sulama sisteminin işletme performansını izlemeye yöneliktir. Basınç, debi ve su seviyesi gibi ölçümler; sistemdeki kaçakların, tıkanmaların, vana ve pompa arızalarının erken tespit edilmesine olanak tanır. Bu yönüyle ölçüm altyapısı yalnızca sulama kararını değil, aynı zamanda sistem güvenliğini ve sürdürülebilirliğini de destekler.



Şekil 3. *IoT tabanlı akıllı sulamada sensör sınıflandırması ve izleme bileşenleri*

6. HABERLEŞME TEKNOLOJİLERİ VE PROTOKOLLER

6.1. Kablosuz Haberleşme Teknolojileri

Ağ (network) katmanı, algılama katmanında sensörler aracılığıyla elde edilen gerçek zamanlı verilerin telekomünikasyon altyapıları, yerel alan ağları (LAN) ve İnternet üzerinden uygulama katmanına iletilmesini sağlamakta; aynı zamanda uygulama katmanında üretilen kontrol komutlarının sahadaki sensör ve eyleyicilere geri gönderilmesine olanak tanımaktadır (Xiaojun ve ark. 2015; Foughali ve ark. 2018; Shi ve ark. 2019). Bu katmanda yer alan mikrodnetleyici veya mikroişlemci tabanlı birimler, algılama katmanından gelen verileri uygun bir haberleşme modülü aracılığıyla taşıyıcı ortama aktarır (Narendran ve ark. 2017). IoT tabanlı sistemlerde veri iletimi için 3G/4G/5G, Wi-Fi, Bluetooth, IEEE-802.11, NFC, GSM, GPRS ve ZigBee gibi farklı kablosuz teknolojiler kullanılabilir. Birlikte, tarımsal uygulamalarda geniş kapsama alanı, düşük veri hızı gereksinimi ve enerji verimliliği ön plana çıkmaktadır (Shi ve ark. 2019). Bu kapsamda NB-IoT, lisanslı hücreli altyapı üzerinde çalışan, düşük güç tüketimi ve yüksek cihaz kapasitesi sunan bir LPWAN teknolojisi olarak, geniş tarım alanlarında konumlandırılan sensör düğümlerinden toprak, bitki ve suya ilişkin ölçümlerin uzun süreli ve güvenilir biçimde iletilmesine imkân sağlamaktadır (Xiaojun ve ark. 2015; Foughali ve ark. 2018). Bu seçim mantığı Tablo 1’de yer alan kablosuz haberleşme teknolojileri karşılaştırmasıyla da uyumludur: ZigBee kısa menzil ve düşük güç tüketimiyle daha çok sınırlı alanlı ağlar için uygunken, 5G çok yüksek veri hızı sağlamasına rağmen güç/altyapı gereksinimleri nedeniyle her tarımsal sensör senaryosunda avantajlı olmayabilmektedir; buna karşılık LoRa ve

NB-IoT, kilometre ölçeğinde kapsama ile düşük güç tüketimini bir arada sunarak akıllı sulamada yaygın olan düşük bant genişlikli sensör verilerinin taşınmasında daha dengeli seçenekler olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle akıllı sulama mimarisinde haberleşme teknolojisi belirlenirken hızdan çok kapsama, enerji verimliliği ve ölçeklenebilirlik ölçütlerinin dikkate alınması kritik görülmektedir.

Tablo 1. Akıllı sulama için bazı kablosuz haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması (Ahad ve ark., 2019)

IoT Kablosuz Teknolojisi	Veri Hızı	Menzil	Cihaz Sayısı	Güç Tüketimi (Ağ Geçidi / Baz İstasyonu)	Güç Tüketimi (Sensör)
Zigbee	250 Kbps	10-100 m	240 cihaz	1 Watt	0.1 Watt
LoRa	50 Kbps	10 km	10.000 cihaz	30 Watt	0.44 Watt
NB-IoT	250 Kbps	35 km	55.000 cihaz	6877 Watt	0.55 Watt
5G	10 Gbps	28 km	1 km ² başına 1 milyon cihaz	11.500 Watt	0.4 Watt

6.2. Protokoller

IoT ekosisteminde standartlar ve protokoller, uygulama geliştiricilerin ve servis sağlayıcıların işini kolaylaştırmak amacıyla farklı kurum ve çalışma grupları tarafından önerilmiştir. IoT'ye yönelik protokol ve standart geliştirme çalışmalarında World Wide Web Consortium (W3C), Internet Engineering Task Force (IETF), EPC global, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ve European Telecommunications Standards Institute (ETSI) gibi yapılar öne çıkmaktadır (Al-Fuqaha ve ark., 2015). Bununla birlikte, IoT'de "tek bir protokol her yerde kullanılır" yaklaşımı geçerli değildir; protokol seçimi çoğunlukla uygulama alanının gereksinimlerine göre yapılır. Özellikle kablosuz algılayıcı ağlarda (WSN), temel hedef çoğu zaman enerji verimli veri iletimi ve sensör düğümleri arasında güvenilir haberleşme olduğundan, tüm protokoller bu tür kısıtlı ortamlarda yaygın olarak kullanılmaz. Protokoller, IoT mimarisinde hangi katmanda konumlandıklarına göre farklı görevler üstlenir ve OSI katmanlarının her biri farklı amaçlara hizmet eden iletişim mekanizmaları barındırır. Uygulama katmanı tarafında; Constrained Application Protocol (CoAP), Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) ve HTTP tabanlı REST yaklaşımları, cihazlar arası iletişimi daha hafif/etkin hale getirmek için sıklıkla tercih edilen seçenekler arasındadır. Kısa mesafeli veri aktarımı gereken senaryolarda ise Bluetooth Low Energy (BLE) öne çıkan çözümlerden biridir (Al-Sarawi ve ark., 2017). Bu protokoller farklı iletişim modellerine dayanır ve genellikle enerji/bant genişliği kısıtlarının belirgin olduğu WSN senaryolarında veya kullanıcı odaklı uygulamalarda (ör. ev otomasyonu) kullanılabilir. IoT ağlarında önemli başlıklardan biri,

mesajlaşma (messaging) odaklı protokollerin seçimi ve yönetimidir (Naik, 2017). WSN içinde sensör düğümleri arasında ya da cihazlar arasında mesaj gönderme/alma ihtiyacı yaygın olmasına rağmen, bugüne kadar geliştirilen yaklaşımlar içinde tek bir protokolün tüm IoT gereksinimlerini eksiksiz karşılamadığı görülmektedir. Örneğin MQTT ve CoAP, düşük güç tüketimi hedeflenen ağlarda yaygın kullanılsa da, avantaj-dezavantaj dengeleri uygulamaya göre değişir ve standart farklılıkları nedeniyle bu protokollerin tek bir çatı altında “kolayca birleştirilmesi” pratikte her zaman mümkün değildir (Naik, 2017). Buna rağmen düşük güç ve sınırlı bant genişliğine sahip cihazlarda mesajlaşma için en sık karşılaşılan seçenekler arasında MQTT, CoAP ve 6LoWPAN yer almaktadır (Kumar ve ark., 2017). Bağlı cihaz sayısı arttıkça, IoT sistemlerinin bu cihazlar arasındaki iletişimi ölçeklenebilir biçimde yönetmesi daha kritik hale gelmektedir (Sanchez-Iborra ve Cano., 2016). Ayrıca endüstriyel IoT ve Endüstri 4.0 bağlamında, otomasyonla bütünleşik IoT altyapılarının üretim süreçlerinde daha belirleyici olacağı vurgulanmaktadır (Xu ve ark., 2018). Tüm bu gelişmelere karşın, IoT protokollerinde en önemli risk alanlarından biri güvenlidir; bu nedenle protokol seçimi yapılırken güvenlik gereksinimleri de temel bir ölçüt olarak ele alınmalıdır (Balaji ve ark., 2019).

IoT tabanlı akıllı sulama sistemleri açısından bakıldığında, protokol seçimi; sahadaki sensörlerin enerji bütçesi, kapsama ihtiyacı, veri iletim sıklığı ve gecikme toleransı gibi kriterlerle doğrudan ilişkilidir. Tarla/sera gibi ortamlarda çalışan WSN düğümleri için enerji verimliliği öncelikliken, ağ geçidi-bulut arasındaki iletimde ölçeklenebilir mesajlaşma ve güvenilir veri aktarımı daha belirgin hale gelir. Bu nedenle akıllı sulama mimarisinde protokoller, “her yerde aynı çözüm” yerine katmana ve senaryoya uygun biçimde konumlandırılarak seçilmektedir.

7. VERİ YÖNETİMİ VE IOT PLATFORMLARI

IoT tabanlı akıllı sulama sistemlerinde veri yönetimi, sensör ağlarından elde edilen ham ölçümlerin güvenilir biçimde toplanması, iletilmesi, işlenmesi, saklanması ve karar süreçlerinde kullanılabilecek eyleme dönük bilgiye dönüştürülmesini kapsayan temel bir bileşendir. Akıllı sulama bağlamında veri; toprak (nem, sıcaklık, EC, pH), bitki (su stresi göstergeleri, taç sıcaklığı, sap akışı), iklim (hava sıcaklığı, bağıl nem, radyasyon, rüzgâr, yağış) ve hidrolik altyapıdan (basınç, debi, seviye, vana/pompa durumu) üretilen heterojen ve çoğunlukla zaman serisi karakterindeki ölçümlerden oluşur. Bu heterojenliğin yönetilebilmesi için verinin standart bir yapıda temsil edilmesi (sensör kimliği, konum bilgisi, zaman damgası, ölçüm birimi, kalite etiketi gibi üst verilerle birlikte) ve veri akışının uçtan uca izlenebilirliğinin sağlanması kritik önem taşır. Veri yaşam döngüsü çoğunlukla uç (edge)-ağ geçidi (gateway)-bulut ekseninde kurgulanır; uç tarafta gürültü azaltma, örnekleme oranını uyarlama, veri bütünlüğü kontrolü, eksik veri işaretleme ve olay

tabanlı tetikleme gibi ön işleme adımlarıyla veri kalitesi yükseltilirken haberleşme yükü azaltılır. Ağ geçidi katmanında ise farklı kaynaklardan gelen verilerin birleştirilmesi, protokol dönüşümü ve yerel tamponlama/önbellekleme gibi işlemlerle buluta aktarım daha kararlı hale getirilir; bu durum özellikle kırsal alanlarda bağlantı süreksizliklerinin etkisini azaltmak açısından önemlidir.

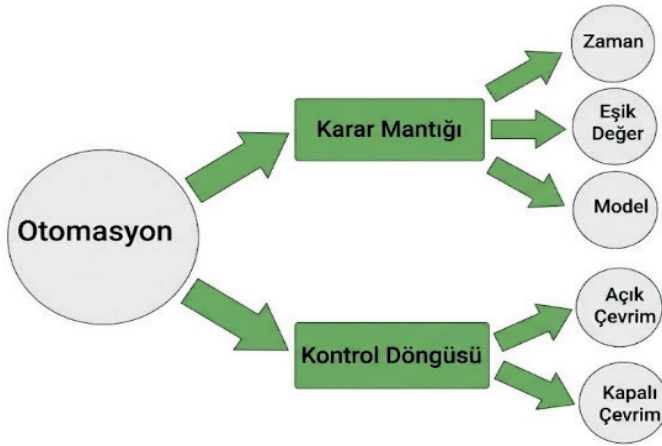
Bulut tabanlı IoT platformları, veri yönetiminin merkezi bileşenini oluşturarak büyük ölçekli veri depolamayı, zaman serisi verilerinin etkin biçimde sorgulanmasını, gerçek zamanlı izleme ve analitik süreçlerinin yürütülmesini mümkün kılar. Bu platformlar aynı zamanda sahadaki sensör ve eyleyicilerin uzaktan yönetimi, sistem durumunun gösterge panelleriyle izlenmesi, anomali ve arıza durumlarında uyarı üretimi ile farklı yazılım servisleriyle bütünleşme gibi işlevleri destekler. Böylece kısa vadede operasyonel izleme sağlanırken, uzun vadede biriken veriler üzerinden eğilim analizi ve performans değerlendirmesi yapılabilir; sulama uygulamalarının su, enerji ve iş gücü boyutlarında optimize edilmesine yönelik karar destek kapasitesi güçlenir. Veri yönetiminde güvenlik ve yönetim boyutu da belirleyicidir; çünkü akıllı sulama sistemleri yalnızca ölçüm üretmekle kalmaz, aynı zamanda vana ve pompa gibi fiziksel altyapıyı etkileyen kontrol çıktıları üretir. Bu nedenle kimlik doğrulama, yetkilendirme, güvenli veri iletimi, veri bütünlüğü ve kayıt (log) mekanizmaları sistem güvenilirliği ve işletim sürekliliği açısından zorunlu gereksinimlerdir. Ek olarak veri kalitesi yönetimi; kalibrasyon takibi, aykırı değerlerin belirlenmesi, sensör sürüklenmesinin izlenmesi ve eksik veri ile başa çıkma yöntemleri gibi süreçleri içerir ve doğrudan sulama kararlarının doğruluğunu etkilediği için platform düzeyinde sistematik biçimde ele alınmalıdır.

8. KARAR VERME VE OTOMASYON

IoT tabanlı akıllı sulama sistemlerinde karar verme ve otomasyon, toprak-bitki-iklim-hidrolik bileşenlerinden elde edilen çok kaynaklı verinin işlenerek sulama uygulamasına ilişkin zaman, miktar ve işletim koşullarının belirlenmesi ve bu kararların vana, pompa ve dozaj üniteleri gibi eyleyiciler aracılığıyla sahada uygulanması süreçlerini kapsamaktadır. Mühendislik açısından süreç; ölçüm verisinin ön işlenmesi ve durum kestirimi, karar kuralı veya karar modeli ile sulama komutunun üretilmesi, komutun kontrol elemanlarına aktarılması ve uygulama sonrası sistem durumunun yeniden ölçülmesi adımlarından oluşur. Bu çerçevede karar verme, sulama komutunun hangi bilgi ve yöntemle üretildiğini; otomasyon ise üretilen komutun sahada hangi kontrol yapısıyla yürütüldüğünü tanımlar.

Akıllı sulamada otomasyon, Şekil 4'te gösterildiği gibi karar mantığı ve kontrol döngüsü olmak üzere iki eksende sınıflandırılabilir. Karar mantığına göre sulama; zaman tabanlı (önceden belirlenmiş programlara dayalı), eşik

değer tabanlı (sensör ölçümlerinin belirli sınırları aşmasıyla tetiklenen kural tabanlı) ve model tabanlı (toprak-bitki-atmosfer süreçlerini temsil eden fiziksel/ampirik modeller veya hesaplama yaklaşımlarıyla sulama gereksiniminin belirlenmesi) biçimlerinde kurgulanır. Zaman tabanlı yaklaşım uygulaması kolay bir çerçeve sunmakla birlikte, çevresel değişkenliği sınırlı ölçüde dikkate alır. Eşik değer ve model tabanlı yaklaşımlar ise sahadan gelen güncel ölçümlerle daha duruma duyarlı bir sulama yönetimi sağlar. Kontrol döngüsüne göre sistemler açık çevrim ve kapalı çevrim (geri beslemeli) olarak ayrılır. Açık çevrim yapıda sulama komutu uygulanır ve uygulama sonrası ölçümler karar mekanizmasını güncellemek için kullanılmaz. Kapalı çevrim yapıda ise sulama uygulamasından sonra alınan yeni sensör ölçümleri (örneğin toprak nemi, basınç ve debi) sisteme geri beslenir ve bir sonraki sulama kararı bu güncel duruma göre yeniden hesaplanır. Tarımsal sahada toprak heterojenliği, iklim koşullarının değişkenliği, hidrolik kayıplar ve sensör belirsizliği gibi etmenler bulunduğu için, kapalı çevrim kontrol yapıları hedeflenen nem aralığını koruma ve aşırı/yetersiz sulama riskini azaltma açısından daha uygun bir kontrol çerçevesi sunar.



Şekil 4. Akıllı Sulamada Karar Mantığı ve Kontrol Döngüsüne Göre Otomasyon Sınıflandırması

9. UYGULAMALAR

Nesnelerin interneti, aşırı sulamanın önlenmesini sağlayarak akıllı su yönetimi ve hassas tarım uygulamalarının etkin bir şekilde yürütülmesi için ideal bir çözüm sunmaktadır (Parra-López ve ark., 2025). Bu bölümde IoT tabanlı dijital su yönetimi sistemlerine ait uygulamalara yer verilmiştir. Özellikle tarımsal sulama süreçlerinde sensörler, veri toplama cihazları ve otomasyon sistemleri aracılığıyla su kullanımının optimize edilmesi ve verimliliğin artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, karar destek sistemleri, yapay zekâ ve büyük veri analizleri gibi teknolojilerin entegrasyonu ile sulama planlaması

ve su kaynaklarının yönetimi daha hassas ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu çerçevede, uygulama örnekleri hem teknolojik yaklaşımları hem de sürdürülebilir tarım hedeflerine katkılarını göstermektedir. Örneğin, tarımda sulamayı yönetmek için otomatik bir karar destek sisteminin tasarlanması ve geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmada bitkilerin haftalık sulama ihtiyaçları hem toprak ölçümlerine hem de sahada konuşlandırılan birkaç otonom düğüm tarafından toplanan iklimsel değişkenler temelinde tahmin edilmiştir (Navarro-Hellín ve ark., 2016). Geleneksel sulama sistemleri kötü yönetim ve yapılandırma gibi nedenlerle kullanılan suyun önemli bir bölümünü boşa harcayabilmektedir. Sürdürülebilir sulama sistemi, son kullanıcı için tasarrufa yol açabilecek sulama sürecinde, sadece parasal değil, aynı zamanda su ve enerji gibi doğal kaynaklarda da daha sürdürülebilir bir ortama yol açabilecek daha iyi bir verimlilik sağlamaktadır. IoT tabanlı geliştirilen sistemler gerçek zamanlı verileri alabilmekte ve bir bahçede kullanılacak doğru miktarda suyu belirlemek için kullanabilmektedir (Glória ve ark., 2020). Zia (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, IoT ve kablosuz sensör ağları kullanılarak tarımsal drenaj ve besin kayıplarının yönetimi için WQMCM (Water Quality Management using Collaborative Monitoring) çerçevesi geliştirilmiştir. Bu sistem, yerinde sensör ölçümleri ve tahmin modelleri aracılığıyla çiftlik ölçeğinde proaktif ve otonom bir su yönetimi sağlamaktadır. Sulama amaçlı kullanılan suyun bir bölümü depo edilen su kaynaklıdır. Depolanan suyun kullanımında su pompası yönetimini otomatikleştirmek ve insan etkileşimi olmadan güneş ışığı, sıcaklık ve nem seviyelerini izlemek için IoT kullanan akıllı bir sulama ve izleme sistemi geliştirilmiştir (Mohiuddin ve ark., 2024). Araştırmacılar tarafından su pompası yönetimi otomatikleştirilerek önemli bir emek ve kaynak yönetimi sağlandığı belirtilmiştir. Bir başka çalışmada Morchid ve ark. (2025), IoT ve gömülü teknolojiyi kullanarak, verimli su yönetimini sağlayan ve sürdürülebilir tarımı destekleyen gerçek zamanlı bir akıllı sulama sistemi geliştirilmiştir. İklim koşullarının ve mahsul gereksinimlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayarak sulama yönetimi geliştirmeyi amaçlayan araştırmacılar, çalışmanın sulama verimliliğinde önemli bir iyileşme gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Bu uygulamaların ötesinde, literatürde IoT tabanlı sulama sistemlerini daha bütüncül bir yaklaşımla ele alan ve platform mimarisi ile karar destek mekanizmalarına odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır. Son yıllarda akıllı tarım uygulamaları hızla gelişmekte ve IoT, tarım alanlarında giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tarımsal verimliliği ve ürün kalitesini artırmak, aynı zamanda nüfus artışına bağlı olarak artan gıda talebini karşılayabilmek amacıyla hassas sulama sistemlerine dayalı akıllı tarımsal yönetim platformları geliştirilmektedir. Bu kapsamda, tarımsal akıllı su kaynakları yönetim platformlarının tasarımında; alandaki bitkilere ait büyüme özellikleri ile sıcaklık, nem ve diğer çevresel parametreler, hassas sulama uy-

gulamalarının etkinliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Haiyan ve Yanhui, 2025). Haiyan ve Yanhui (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bu tür bir platformun gereksinimleri analiz edilmiş; veri algılama, iletişim iletimi, merkezi işleme ve mekanik kontrol modüllerinden oluşan fonksiyonel bir yapı tasarlanmış ve platformun donanım ile yazılım bileşenleri ayrıntılı olarak tanıtılmıştır. Çalışmanın sonunda ise sıcaklık ve nem sensörlerinin yanıt süreleri test edilerek analiz edilmiştir.

Bu alandaki çalışmalar, yalnızca platform mimarisinin tasarımıyla sınırlı kalmayıp, veri analitiği ve yapay zekâ temelli karar destek mekanizmalarının entegrasyonuna doğru evrilmektedir. Tarımsal sürdürülebilirlik kapsamında su yönetimini sistematik olarak ele almak için IoT, büyük veri analitiği ve yapay zekadan yararlanan Ishtaiwi ve ark. (2025), gerçek zamanlı sensör ağlarını, gelişmiş makine öğrenimi algoritmalarını ve otomatik sulama kontrol sistemlerini birleşik bir mimari çerçeve içinde entegre ettikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar tarafından 50 hektarlık bir pamuk çiftliğinde yapılan çalışmadan elde edilen bulgular % 25 su tasarrufu, % 50 daha yüksek su kullanımı verimliliği ve geleneksel sulama yöntemlerine kıyasla ürün veriminde % 12.5'lik artış olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Zhang ve ark. (2025), uydu ve İHA tabanlı uzaktan algılama verilerini IoT teknolojileriyle birleştirerek üç boyutlu bir izleme sistemi üzerine kurulu dinamik bir sulama karar modeli geliştirmişlerdir. Elde edilen bulgular, sensör ve uzaktan algılama verilerinin entegrasyonu sayesinde su kullanım etkinliğinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, veri temelli ve akıllı sulama yaklaşımlarının su kaynaklarının etkin kullanımının yanı sıra tarımsal üretimde verimlilik ve sürdürülebilirliğin artırılmasında da önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

10. SONUÇ

Bu kitap bölümünde, tarımda IoT tabanlı dijital su yönetimi yaklaşımı akıllı sulama odağında ele alınmış; sulama kararlarının sahadan elde edilen veriye dayalı biçimde üretilmesi ve otomasyon yoluyla uygulanması için gerekli bileşenler katmanlı bir çerçevede açıklanmıştır. Bölüm boyunca ortaya konan ana sonuç, akıllı sulamanın tek bir teknolojiyle değil; ölçüm ve izleme altyapısı, haberleşme, veri yönetimi ve karar verme/otomasyon bileşenlerinin birlikte çalıştığı bütünsel bir sistem olarak değerlendirilmesi gerektiğidir. Bu bütünsel yaklaşım, suyun doğru zamanda ve doğru miktarda uygulanmasına yönelik kararların daha şeffaf ve izlenebilir biçimde üretilmesini mümkün kılar. IoT ekosistemi ve akıllı sulama mimarisi incelendiğinde, sistem performansını belirleyen ilk halkayı ölçüm ve izleme altyapısının oluşturduğu görülmektedir. Toprak, bitki, iklim ve hidrolik sensörlerinden gelen verinin doğruluğu ve sürekliliği; hem kısa dönemli sulama kararlarının tutarlılığını hem de uzun dönemli analiz ve optimizasyonun güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle sensör seçimi, sahaya yerleşim stratejisi, kalib-

rasyon ve veri kalite kontrol adımları yalnızca “donanım tercihi” olarak değil, karar sisteminin doğruluğunu belirleyen metodolojik gereksinimler olarak ele alınmalıdır. Haberleşme katmanı ve protokoller açısından değerlendirildiğinde, tarımsal alanların genişliği, enerji kısıtları ve düşük bant genişlikli sensör verisinin sürekliliği nedeniyle teknoloji seçimi çoğu zaman “en yüksek hız” üzerinden değil; kapsama, enerji verimliliği, ölçeklenebilirlik ve işletilebilirlik ölçütleri üzerinden yapılmaktadır. Bu bağlamda LPWAN çözümlerinin ve uygun mesajlaşma protokollerinin, uç-ağ geçidi-bulut hattında veri kaybını azaltacak ve sistemin operasyonel sürekliliğini destekleyecek şekilde konumlandırılması akıllı sulama sistemlerinin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Veri yönetimi ve IoT platformları boyutunda ise, akıllı sulama sistemlerinin sürdürülebilir biçimde işletilebilmesi için veri yaşam döngüsünün uçtan uca yönetilmesi gerekmektedir. Uçta ön işleme ve olay tabanlı tetikleme ile gereksiz veri iletiminin azaltılması, ağ geçidinde protokol dönüşümü ve tamponlama ile bağlantı süreksizliklerine dayanıklılığın artırılması, bulutta ise zaman serisi verilerinin depolanması ve analitik süreçlerin yürütülmesi sistemin karar kalitesini doğrudan güçlendirir. Bununla birlikte güvenlik, kimlik doğrulama-yetkilendirme ve kayıt mekanizmaları, akıllı sulama sistemlerinin fiziksel altyapıyı uzaktan etkileyebilmesi nedeniyle tasarımın ayrılmaz parçasıdır. Karar verme ve otomasyon başlığı altında değerlendirildiğinde, akıllı sulama uygulamalarında karar üretim mantığının ve kontrol döngüsünün seçimi; saha koşulları, veri kalitesi, gecikme toleransı ve hedeflenen işletme düzeyi ile birlikte ele alınmalıdır. Özellikle geri beslemeli kontrol yapıları, tarımsal sahadaki değişkenliklerin yüksek olduğu koşullarda sulama uygulamasının güncel duruma göre güncellenmesini sağlayarak aşırı/yetersiz sulama riskini azaltma potansiyeli taşır. Bu çerçevede akıllı sulama, yalnızca otomatik sulama değil; veriye dayalı karar üretimi, kontrol uygulanması ve izleme verisiyle sistemin yeniden değerlendirilmesini içeren döngüsel bir süreç olarak konumlanmaktadır.

Bu değerlendirmeler ışığında IoT tabanlı dijital su yönetimi, akıllı sulama uygulamalarında su kaynaklarının daha rasyonel kullanılmasına yönelik güçlü bir teknik zemin sunmaktadır. Ancak sahada yaygınlaştırma açısından maliyet, bakım/kalibrasyon gereksinimi, bağlantı sürekliliği, veri kalitesi, birlikte çalışabilirlik ve siber güvenlik gibi konuların tasarımın erken aşamalarında ele alınması gerekir. İleriye dönük çalışmalarda, sensör verisi ile uzaktan algılama ve tahmin modellerinin daha sıkı entegrasyonu, uçta karar verme yaklaşımlarının güçlendirilmesi ve veri yönetimi-güvenlik çerçevelerinin standardizasyonu; akıllı sulama sistemlerinin güvenilirlik ve ölçeklenebilirliğini artıracak başlıca araştırma ve uygulama alanları olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Dragonetti, G., Derardja, B., & Khadra, R. (2025a). 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. <https://doi.org/10.3390/s25051568>
- Abdelmoneim, A. A., Kimaita, H. N., Al Kalaany, C. M., Derardja, B., Dragonetti, G., & Khadra, R. (2025b). IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects. *Sensors*, 25(7), 2291. <https://doi.org/10.3390/s25072291>
- Adame, T., Bel, A., Bellalta, B., Barcelo, J., & Oliver, M. (2014). IEEE 802.11 ah: the WiFi approach for M2M communications. *IEEE Wireless Communications*, 21(6), 144–152. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.7000982>.
- Ahad, A., Tahir, M., & Yau, K. A. (2019). 5G-Based Smart Healthcare Network: architecture, taxonomy, challenges and future research directions. *IEEE Access*, 7, 100747–100762. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2930628>.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376
- Al-Sarawi, S., Anbar, M., Alieyan, K., & Alzubaidi, M. (2017). Internet of Things (IoT) communication protocols. In 2017 8th International conference on information technology (ICIT), IEEE, pp. 685–690.
- Antony, A. P., Leith, K., Jolley, C., Lu, J., & Sweeney, D. J. (2020). A review of practice and implementation of the Internet of Things (IoT) for smallholder agriculture. *Sustainability*, 12(9), 3750. <https://doi.org/10.3390/su12093750>.
- Aqeel-ur-Rehman, A., Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2), 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004>.
- Ayodele, A., Ogidan, O., & Ayeni, A. (2025). Review of Knowledge-Based Management System for Irrigation Scheduling Modeled Upon Reduced Parametric Estimates. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(1), 74-88. <https://doi.org/10.46592/turkager.1528853>.
- Balaji, S., Nathani, K., & Santhakumar, R. (2019). IoT Technology, Applications and Challenges: A Contemporary survey. *Wireless Personal Communications*, 108(1), 363–388. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06407-w>.
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>.
- Chowdhury, B. S., & Raghukiran, N. (2017). Autonomous sprinkler system with Internet of Things. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(16), 5430–5432.

- Dechemi, A., Chatziparaschis, D., Chen, J., Campbell, M., Shamshirgaran, A., Mucciani, C., ... & Karydis, K. (2023). Robotic assessment of a crop's need for watering: Automating a time-consuming task to support sustainable agriculture. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 30(4), 52-67.
- FAO. (2025). Renewable water availability per person plunges as global scarcity deepens. Rome, Italy: FAO. Erişim tarihi: 20 Aralık 2025, <https://www.fao.org/newsroom/detail/renewable-water-availability-per-person-plunges-7-percent-in-a-decade-as-global-scarcity-deepens--fao-data-shows>
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. B. (2020). Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Electronics*, 9(2), 319. <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>.
- Foughali, K., Fathallah, K., & Frihida, A. (2018). Using cloud IOT for disease prevention in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 130, 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.106>.
- Fuentes-Peñailillo, F., del Campo-Hitschfeld, M. L., Gutter, K., & Torres-Quezada, E. (2025). Data-Driven Integration of Remote Sensing, Agro-Meteorology, and Wireless Sensor Networks for Crop Water Demand Estimation: Tools Towards Sustainable Irrigation in High-Value Fruit Crops. *Agronomy*, 15(9), 2122. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092122>.
- Giray, G., & Catal, C. (2021). Design of a data management reference architecture for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(13), 7309. <https://doi.org/10.3390/su13137309>.
- Glória, A., Dionisio, C., Simões, G., Cardoso, J., & Sebastião, P. (2020). Water Management for Sustainable Irrigation Systems Using Internet-of-Things. *Sensors*, 20(5), 1402. <https://doi.org/10.3390/s20051402>.
- Glaroudis, D., Iossifides, A., & Chatzimisios, P. (2020). Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming. *Computer Networks*, 168, 107037. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107037>.
- Goap, A., Sharma, D., Shukla, A., & Krishna, C. R. (2018). An IoT based smart irrigation management system using machine learning and open source technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>.
- Haiyan, Z., & Yanhui, C. (2025). Intelligent water resources management platform for precision irrigation agriculture based on Internet of things. *Neural Computing and Applications*, 37(13), 8051-8060. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07902-1>
- Ishtaiwi, A., Suárez-Barón, M. J., Elhilo, A. A., & Rajab, M. A. (2025, April). Framework for Addressing Agricultural Water Scarcity Using Big Data and IoT. In 2025 1st International Conference on Computational Intelligence Approaches and Applications (ICCIAA) (pp. 01-06). IEEE.
- Kamienski, C., Soininen, J.-P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Salmon Cinnotti, T., Filev Maia, R., & Torre Neto, A. (2019). Smart Water Management

- Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture. *Sensors*, 19(2), 276. <https://doi.org/10.3390/s19020276>
- Kapoor, A., Bhatia, D., Kumar, A., & Gupta, S. (2024, February). Water treatment and crop recommendation model using artificial intelligence. In 2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (IC2PCT) (Vol. 5, pp. 164-169). IEEE.
- Khatri, N., Sharma, A., Khatri, K. K., & Sharma, G. D. (2018). An IoTbased innovative real-time pH monitoring and control of municipal wastewater for agriculture and gardening. In A. K. Somani, S. Srivastava, A. Mundra, & S. Rawat (Eds.), *Proceedings of first international conference on smart system, innovations and computing* (pp. 353–362). Singapore: Springer Singapore.
- Kim, W., Lee, W., & Kim, Y. (2020). A review of the applications of the internet of things (IoT) for agricultural automation. *Journal of Biosystems Engineering*, 45(4), 385–400. <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00078-3>.
- Kumar, S., Poddar, S., Marimuthu, R., Balamurugan, S., & Balaji, S. (2017). A review on communication protocols using internet of things. In 2017 International conference on microelectronic devices, circuits and systems (ICMDCS), IEEE, pp. 1–6.
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Wang, B., Bao, R., Syed, T. N., Chauhdary, J. N., & Rakibuzzaman, M. (2024). A Review of Precision Irrigation Water-Saving
- Mohiuddin, M., Islam, M. S., & Shanjida, S. (2024). Internet of Things (IoT)-Based Smart Agriculture Irrigation and Monitoring System Using Ubidots Server. *Engineering Proceedings*, 82(1), 99. <https://doi.org/10.3390/ecs11-20528>
- Monteleone, S., Moraes, E. A. D., Tondato de Faria, B., Aquino Junior, P. T., Maia, R. F., Neto, A. T., & Toscano, A. (2020). Exploring the adoption of precision agriculture for irrigation in the context of agriculture 4.0: the key role of internet of things. *Sensors*, 20(24), 7091. <https://doi.org/10.3390/s20247091>
- Moon, A., Kim, J., Zhang, J., & Son, S. W. (2018). Evaluating fidelity of lossy compression on spatiotemporal data from an IoT enabled smart farm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 304– 313. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.045>.
- Morchid, A., Et-taibi, B., Oughannou, Z., El Alami, R., Qjidaa, H., Jamil, M. O., ... & Abid, M. R. (2025). IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events. *Scientific African*, 27, e02527.
- Naik, N. (2017). Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. In 2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE), IEEE, pp. 1–7.
- Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., & Torres-Sánchez, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 121-131. <https://>

doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003

- Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Trollman, H., Jagtap, S., ... & Carmona-Torres, C. (2025). Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook. *Agricultural Water Management*, 309, 109347. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109347>
- Sanchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors*, 16(5), 708.
- Satilmisoglu, T. K., Sermet, Y., Kurt, M., & Demir, I. (2024). Blockchain opportunities for water resources management: a comprehensive review. *Sustainability*, 16(6), 2403. <https://doi.org/10.3390/su16062403>
- Sharifnasab, H., Mahrokh, A., Dehghanisanij, H., Łazuka, E., Łagód, G., & Karami, H. (2023). Evaluating the Use of Intelligent Irrigation Systems Based on the IoT in Grain Corn Irrigation. *Water*, 15(7), 1394. <https://doi.org/10.3390/w15071394>
- Shi, X., An, X., Zhao, Q., Liu, H., Xia, L., Sun, X., & Guo, Y. (2019). State-of-the-art internet of things in protected agriculture. *Sensors*, 19(8), 1833. <https://doi.org/10.3390/s19081833>.
- Talavera, J. M., Tobón, L. E., Gómez, J. A., Culman, M. A., Aranda, J. M., Parra, D. T., Quiroz, L. A., Hoyos, A., & Garreta, L. E. (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>.
- Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*, 14(7), 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
- Teshome, Y., Biazin, B., Wolka, K., & Burka, A. (2018). Evaluating performance of traditional surface irrigation techniques in Cheleleka watershed in Central Rift Valley, Ethiopia. *Applied Water Science*, 8(8), 219.
- UNESCO. (2024). UN World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace (Facts on water demand and use). Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Erişim tarihi: 20 Aralık 2025, <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/s>
- Vallejo-Gómez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (2023). Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review. *Agronomy*, 13(2), 342. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020342>
- Wang, E., Attard, S., Linton, A., McGlinchey, M., Xiang, W., Philippa, B., & Everingham, Y. (2020). Development of a closed-loop irrigation system for sugarcane farms using the Internet of Things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105376. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105376>.
- Xiaojun, C., Xianpeng, L., & Peng, X. (2015). IOT-based air pollution monitoring and forecasting system. In: 2015 International Conference on Computer and Computational Sciences (ICCCS), pp. 257–260, Noida, India: IEEE.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends.

International Journal of Production Research, 56(8), 2941–2962

- Zappa, L., Dari, J., Modanesi, S., Quast, R., Brocca, L., De Lannoy, G., ... & Dorigo, W. (2024). Benefits and pitfalls of irrigation timing and water amounts derived from satellite soil moisture. *Agricultural Water Management*, 295, 108773. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108773>
- Zhang, R., Hao, F., & Sun, X. (2017). The design of agricultural machinery service management system based on Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 107(1), 53–57. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.03.055>.
- Zhang, H., Xu, H., Zhu, M., Zeng, M., Zhao, X., & Wu, H. (2025). Research on Precision Paddy Field Irrigation Control Technology Based on Multi-Source Sensing Hybrid Model. *Digital Intelligence in Agriculture*, 1(1), 14-23. <https://doi.org/10.62762/DIA.2025.680966>
- Zhou, L., Song, L., Xie, C., & Zhang, J. (2012). Applications of Internet of Things in the facility agriculture. In D. Li & Y. Chen (Eds.), *Computer and computing Technologies in Agriculture VI* (pp. 297–303). Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- Zhu, X. (2025). Advances in Agricultural Irrigation Management and Technology. *Water*, 17(17), 2591. <https://doi.org/10.3390/w17172591>
- Zia, H. (2022). Water Sustainability through Drainage Reuse in Agriculture–A Case for Collaborative Wireless Sensor Networks. In *Irrigation and Drainage-Recent Advances*. IntechOpen.



**'KABUKLU YERFISTIĞININ BOYUT
ESASINA GÖRE SINIFLANDIRILMASINDA
KULLANILAN MAKİNELERE GENEL BİR
BAKİŞ**

“

”

Selçuk UĞURLUAY

¹ , Doç. Dr., Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Müh. Böl.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4880-545X>

1. Giriş

Granüler malzemenin ölçülebilir fiziksel özelliklerine göre bir veya daha fazla fraksiyona ayrılması olan sınıflandırma, gıda hazırlama da dahil olmak üzere birçok endüstriyel işlemdedir (Feistritz ve ark., 1981; Fellows, 2000; Grandison, 2006). Yerfıstığı, farklı çeşitlerin (Runner, Virginia, Spanish, vb.) fiziksel büyüklük ve kabuk yapısı bakımından önemli farklılık göstermesi nedeniyle sınıflandırmaya ihtiyaç duyan yağlı tohumlu bir üründür. İşleme sürecine gelen yerfıstıkları; kabuklu halde değişken uzunluk, genişlik, kabuk kalınlığı, kütle ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler taşımaktadır (Uğurluay ve ark., 2010). İşletmelerde sınıflandırma:

- Kırma makinelerinin düzgün çalışması,
- Kavurma sırasında ısı transferinin homojen dağılması,
- Paketleme makinelerinin standart gramaj çıkarması,
- Optik ayırıcılarda tekil ürün beslemesi,
- Ticari standartlara uygun sınıf çıkarması açısından zorunlu bir adımdır.

Pek çok çalışma, yerfıstığının fiziksel boyut dağılımının proses verimini %15–40 arasında etkileyebildiğini göstermiştir (Öztekin ve ark., 2009; Abbas ve ark., 2019).

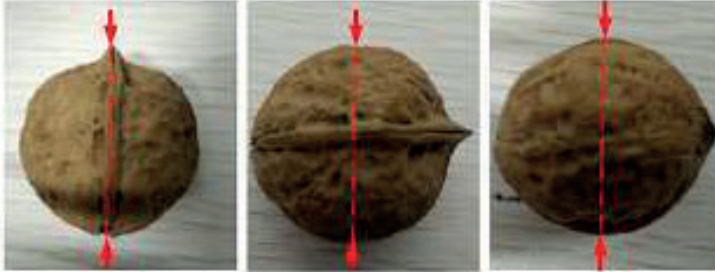
2. Kabuklu Yerfıstıklarının Boyut Esasına Göre Sınıflandırılmasının Önemi

1.1. Geometrik Özellikler

Yerfıstığının makineyle işlenmesinde en önemli tasarım girdileri; uzunluk (L), genişlik (W), kalınlık (T), geometrik ortalama çap (D_g) ve küresellik (ϕ). Tarımsal ürünler için geometrik ortalama çap ve küresellik tanımları aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilmektedir (Mohsenin (1986).

$$D_g = (L \times W \times T)^{1/3} \quad (2.1)$$

$$\phi = \frac{D_g}{L} \times 100 \quad (2.1)$$



Düşey çap Yatay çap Yanal çap

Şekil 1. Ceviz meyvesinin 3 farklı eksenindeki çapları (Mingzheng ve ark., 2021)

Yerfıstığı çeşitlerinde boyutların dağılımı ve küresellik değerleri farklılık göstermekte; bu da eleme delik boyutları, elek delik geometrisi ve eğim açısı gibi parametrelerin çeşitlere göre uyarlanmasını zorunlu kılmaktadır (Akçalı ve ark., 2014).

1.2. Yığılma, Sürtünme ve Akış Özellikleri

Yerfıstığının yığılma açısı (angle of repose), serbest akış ve bunker/hazne tasarımında; statik ve dinamik sürtünme katsayıları ise ürünün bant, sac yüzeyi, elek teli/makine bileşenleri üzerindeki hareket tipinde belirleyicidir. Yığılma açısı genellikle 28–34° aralığında olup, bunker taban açısının bu değerden daha büyük seçilmesi tıkanmayı önlemek için gereklidir (Mohsenin, 1986). Nem oranı akış karakteri üzerinde etkilidir. Nem artışı; sürtünme katsayılarını artırarak sınıflandırma verimini düşürebilir (Uğurluay ve ark., 2010).

2.1 İşleme Verimliliği

Yerfıstığı kırıcı ve soyucu makineleri belirli bir tane aralığına göre ayarlanır. Büyük tanelerin kırılma direnci yüksek olduğundan aynı kırıcı ayarında parçalanmama, küçüklerin ise aşırı kırılma riski vardır. Boyut homojenliği, işleme sırasında:

- Kırılma oranını azaltır,
- Güç tüketimini düşürür,
- Makine ayarlarının stabil kalmasını sağlar.

Adetola ve ark. (2022), sınıflandırma yapılmayan partilerde kırılma oranının %18'e kadar çıktığını, sınıflandırılmış partilerde bunun %6–8'e düştüğünü bildirmiştir.

2.2 Kalite Standartları

Yerfıstığı ihracatında kullanılan boyut sınıfları (Jumbo, No.1, Medium

vb.) tamamen elek boyutlarına dayanır. Boyut farkı, tüketici algısını da etkiler; büyük boy yarfıstıkları daha yüksek raf değeri taşıır.

2.3 Otomasyon Uyumluluğu

Optik ayırıcılar, kabuk kırıcılar ve paketleme hatları, akışta tanelerin tekil ilerlemesini ister. Büyük-küçük karışık ürün beslemesi, tıkanma, sensör hatası ve dozajlama tutarsızlıklarına yol açabilmektedir (Sedara ve Adenigba, 2021).

3. Boyut Esasına Göre Sınıflandırmada Kullanılan Makineler

3.1 Elek Sistemleri

3.1.1 Düz Elekler (Flat Screen Graders)

Düz elekler, farklı açıklıktaki tel ya da delikli plakalardan oluşan, ürünün yatay düzleminde ilerlediği sınıflandırıcılarđır. Çalışma prensibi tanelerin yerçekimi ve ilerleme kuvveti ile elekten geçmesine dayanır.

Teknik tasarım parametreleri:

- Elek açıklığı toleransı: ± 0.1 mm
- Elek malzemesi: galvaniz çelik veya paslanmaz
- İlerleme açısı: $0-5^\circ$
- Elek titreşim modülü opsiyonel

Düz elekler, özellikle ihracat amaçlı Virginia tipi iri taneli fıstıkların sınıflandırılmasında tercih edilir.



Şekil 2. Düz elekli sistem

3.1.2 Çok Katlı Elekler (Multi-Deck Screens)

Bu sistemlerde 2, 3 veya 4 elek katmanı bulunur.

Genellikle 4 fraksiyon elde edilir:

- Oversize (büyük)
- Main grade (ana sınıf)
- Undergrade (küçük)
- Fines (kırık ve çok küçükler)

Çok katlı sistemlerde verimi belirleyen temel faktör **elek yüklemesidir**. Optimal yükleme için 1 m² elek alanı başına 0.8–1.2 ton/h ürün önerilir (Mohsenin, 1986).



Şekil 3. Çok Katlı Elek

3.2 Titreşimli Elekler (Vibratory Graders)

Titreşimli makineler, yüksek frekanslı salınım hareketi ile ürünün daha hızlı, daha ince ayırım yaparak ilerlemesini sağlar.

Teknik özellikler:

- Frekans: 850–1500 rpm
- Genlik: 3–8 mm
- Elek eğimi: 4–12°
- Kapasite: 3–12 ton/h

Avantajları:

- Tıkanma riskinin düşük olması
- Tanelerin üniform dağılımı
- Küçük tanelerin daha doğru ayrılması

Sınırlılıkları:

- Titreşim motorlarının yüksek bakım ihtiyacı
- İnce kabuklu tanelerde titreşim nedeniyle yüzey zedelenmesi riski

Yu ve ark. (2022) titreşimli sınıflandırıcılarda verimin klasik eleklerle göre %12 daha yüksek olduğunu göstermiştir.



Şekil 4. Titreşimli Elek

3.3 Döner Tambur Eleklere (Rotary Drum / Cylinder Graders)

Silindirik bir tambur içinde artan delik çaplarına sahip bölmeler bulunur. Tambur döndükçe tane deliklere denk gelirse geçer ve sınıflandırma gerçekleşir (Uğurluay ve Akcalı, 2021).

Teknik parametreler:

- Tambur çapı: 60–120 cm
- Tambur uzunluğu: 2–6 m
- Devir: 10–30 rpm
- Delik çapı: genellikle 18–32 mm arası

Avantajlar:

- Çok yüksek kapasite
- Mekanik basitlik

- Enerji tüketiminin düşük olması

Sınırlılıklar:

- İnce tane ayırımında hassasiyet düşebilir
- Tambur iç yüzey aşınması zamanla delik toleransını bozar

Costin ve ark. (2002) tambur sistemlerinin 6 ton/h üzeri uygulanabilirlikte en stabil yapılar olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5. Döner Tambur Elekler

3.4 Aspirasyon Destekli Eleme Sistemleri

Aspirasyon, yalnızca boyut değil kütle farkını da ayırım sürecine dahil eder. Hafif taneler (boş, çürük, düşük yoğunluklu) hava akımı ile yukarı çekilir veya yatay yönde taşınır.

Aspirasyon parametreleri:

- Hava hızı: 6–12 m/s
- Kanal geometrisi: V, L veya düz tip
- Ayarlanabilir damper sistemi

Sedara ve Adenigba (2021) aspirasyonun kırık ve boş taneleri ayırmada %85'e kadar başarı sağladığını raporlamaktadır.



Şekil 6. Aspirasyon destekli eleme sistemleri

3.5 Ayrışan Bantlar (Diverging Belts / Stepped Belts)

Ürünlerin *genişlik, kalınlık veya genel hacim farkına* göre birbirinden uzaklaştırılarak sınıflandırılmasını sağlayan konveyör sistemleridir. Genelde iki bant yan yana çalışır ve bantlar çıkışa doğru hafifçe birbirinden uzaklaşır. Böylece bantların arasından geçen ürünler (Örneğin, yarfıstığı, ceviz, patates gibi tarım ürünleri) fiziksel boyutlarına göre farklı noktalardan aşağı düşer ya da yön değiştirmiş olur.

Kısaca çalışma mantığı şu şekildedir:

- Başta bantlar birbirine çok yakındır, ürünler birlikte ilerler.
- Bantlar ilerledikçe aralarındaki mesafe kademeli olarak artar (o yüzden “stepped” veya “diverging”).
- Küçük ürünler ilk açıklıklardan aşağı düşerken, daha büyük olanlar sona kadar ilerler.
- Böylece **boyut esaslı bir ayırma/sınıflandırma** gerçekteşir.

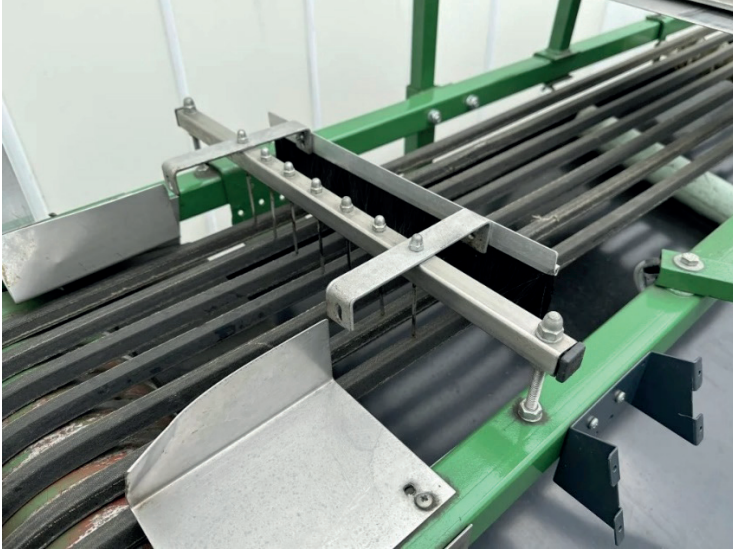
Artıları:

- Mekanik olarak basit, bakım masrafı düşük.
- Ürönlere zarar vermeden sınıflandırma yapar.

- Yüksek kapasiteye uygun.

Eksileri:

- Sadece boyut farkına göre ayırır; şekil veya yoğunluk gibi parametrelerde hassas değildir.
- Çok düzensiz şekilli ürünlerde bazen kaçaklar olabilir.



Şekil 7. Ayırışan bantlar sınıflandırma sistemi

3.6 Silindirli Sınıflayıcılar (Roller Graders / Roller-Gap Graders)

Ürünleri boyutlarına göre ayırmak için paralel yerleştirilmiş döner silindirlerden oluşan bir sistemdir. Bu silindirlerin arasındaki boşluk, makine boyunca kademeli olarak artar. Ürünler silindirlerin üzerinde ilerlerken boyutlarına göre bu boşluklardan aşağı düşer ve böylece sınıflandırılmış olur (Akçalı ve ark., 2014).

Kısaca mantığı şöyle:

- Birden fazla silindir paralel dizilir ve birlikte döner.
- Silindirler arasındaki boşluk girişte dar, çıkışa doğru giderek genişir.
- Küçük ürünler ilk dar aralıklardan geçerek alt kanallara düşer.
- Daha büyük ürünler sonlara kadar ilerleyerek daha geniş aralıklardan geçer ya da en sona kadar ulaşır.
- Böylece ürünler boyut gruplarına ayrılmış olur.

Artı yönleri:

- Yüksek kapasite için çok uygundur.

- Ürünün yüzeyine zarar verme ihtimali düşüktür.
- Silindirik yüzey desenleri sayesinde ürünü hafifçe döndürerek daha doğru bir sınıflama sağlar.

Eksi yönleri:

- Şekil olarak çok düzensiz ürünlerde hassasiyet biraz düşebilir.
- Doğru ayar yapılmazsa küçük ürünler kaçak verebilir.



Şekil 8. Silindirikli Sınıflayıcılar

3.7 Optik ve Renk Ayırıcılar (Color Sorters)

Modern sınıflandırma hatlarında son kalite kontrol adımıdır. Ürün taneleri tek tek yüksek hızlı kameraların önünden geçer.

Kullanılan sensör tipleri:

- CCD/CMOS kameralar
- NIR (yakın kızılötesi) sensörler
- UV ışık altında yüzey kusur tespiti
- Yapay zeka/derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcılar

Optik ayırıcılar doğrudan boyut sınıflandırması yapmaz; ancak boyut sınıflandırmasından sonra kaliteyi stabil halde tutabilmektedir. Renk kusuru, küf, çürük veya yabancı maddeleri de ayırabilmektedir (Abbas ve ark., 2019).



Şekil 9. Optik ve Renk Ayırıcılar

4. Endüstriyel Uygulama Örnekleri

4.1 Kavurma Endüstrisi

Kavurma süreci sıcak havanın tane içine homojen nüfuz etmesine bağlıdır. Boyut çeşitliliği %10'dan yüksek olduğunda kavurma eşitliği bozulur, içi çiğ kalan ürün oranı artar (Kaçmaz ve İnce, 2007). Bu nedenle çok katlı veya titreşimli elekler standarttır.

4.2 Kırma-Kabuk Soyma Tesisleri

Tambur + aspirasyon kombinasyonu özellikle Spanish tipi fıstıklarda yaygındır. Büyük taneler daha fazla kırılma kuvveti gerektirdiğinden sınıflandırma zorunludur.

4.3 Paketleme ve İhracat Hatları

İhracat sınıflarında optik ayırıcılar kullanılmadan ürün piyasaya çıkmaz. Boyut + renk + kusur ayrımı birlikte yapılır.

5. Tartışma

Literatür karşılaştırmaları, tek bir makinenin tüm boyut ayrımı gereksinimini karşılayamayacağını göstermektedir. En iyi performans çok aşamalı hatlarda elde edilebilmektedir:

- Ön temizlik: kaba elek
- Ana sınıflandırma: titreşimli veya çok katlı elek
- Yoğunluk ayrımı: aspirasyon

- Kalite sınıflandırması: optik ayırıcı

Ayrıca tane neminin sınıflandırma verimi üzerinde önemli etkisi vardır. 7–10% nem aralığı optimum olarak raporlanmıştır (Tahir ve ark., 2007).

6. Sonuç

Kabuklu yarfıstığının boyutlandırılmasında kullanılan mekanik ve optik sistemler, modern işleme hatlarında ürün kalitesini belirleyen temel unsurlardır. Elek sistemleri ilk ve en yaygın aşamayı oluştururken, ileri teknolojiler (titreşimli, tambur, aspirasyon, optik) daha hassas ayırım sağlar. En yüksek kalite çıktısı, tüm teknolojilerin kombine edildiği hatlarda elde edilmektedir. Ayrışan bant sistemleri, ürünlerin bantlar arasındaki artan açıklık sayesinde doğal düşüş noktalarına göre ayrılmasına imkân tanırken; silindirik sınıflayıcılar, döner silindirler arasındaki kademeli boşluk değişimiyle yüksek kapasitede ve nispeten hassas bir boyut ayırma sağlar. Elek tabanlı sistemler ise farklı elek açıklıkları yardımıyla daha geleneksel fakat hâlâ yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım sunmaktadır. Optik sınıflayıcılar ise kamera ve sensör teknolojileri ile boyutun yanı sıra şekil ve yüzey özelliklerini de algılayarak daha bütüncül bir sınıflandırma yapabilmektedir. En uygun sınıflandırma sisteminin belirlenebilmesi için ürün özelliklerinin çeşitliliği, hattın işlem kapasitesi, yatırım için ayrılan bütçe ve sağlanması gereken kalite gerekliliklerinin birlikte ele alınması zorunludur.

Kaynaklar

- Abbas, H. M. T., Shakoor, U., Khan, M. J., Ahmed M. and Khurshid, K. (2019). "Automated Sorting and Grading of Agricultural Products based on Image Processing," *2019 8th International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)*, Karachi, Pakistan, 2019, pp. 78-81, doi: 10.1109/ICICT47744.2019.9001971.
- Adetola, O., Akinniyi, O. and Olukunle, E. (2022). Development and Performance Evaluation of a Groundnut Shelling Machine. *International Journal of Engineering Science and Application*, 6(3), 85-94.
- Akçalı, İ.D., İnce, A. ve Güzel, E., 2014. *Bazı Taneli Ürünler için Sınıflandırma Makinesi Geliştirilmesi*. Çukurova Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri, Sonuç Raporu. Proje No: MACTİMARUM2011BAP1.
- Costin, M., Alexandru, I., Iulian, D., Alina-Daiana, I. (2023). Considerations regarding the types of flat and cylindrical sieves intended for seed separation. *International Symposium on Agricultural and Mechanical Engineering*, Bucharest, Romania, 5-6 October 2023. Proceedings, (92–97),
- Fellows, P. (2000). *Food Processing Technology* (2nd ed.). Cambridge. England. 575 pp.
- Feistritzer, W. P., Vock, H. and Reiter, H. (1981). *Cereal and grain-legume seed processing*. Plant Production and Protection Series No.21. Rome. Italy. 77 pp.
- Grandison, A. S. (2006). *Postharvest handling and preparation of foods for processing*. (Brennan J G. Ed.). Food Processing Handbook. Weinheim. Germany. 30 pp.
- Kaçmaz, A. ve İnce A. (2007). Yerfıstığı İşleme Teknolojisi ve Bu Amaçla Kullanılan Makinaların İş Başarılarının Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma. *Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Yıl:2007 Cilt:16-2*.
- Mingzheng, L., Changhe, L., Chengmao, C., Liqiang, W., Xinping, L., Ji, C., Huimin, Y., Xiaowei, Z., Huayang, Z., Guangzan, H. ve Xiangdong, L. (2021). Walnut fruit processing equipment: Academic insights and perspectives. *Food Engineering Reviews*, 13, 822-857. doi:10.1007/s12393-020-09273-6
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publishers.
- Öztekin, S., Bereket Barut, Z., Bozdoğan A.M., Bayat, A., Özcan M.T., Güzel, E. ve Yıldız Y. (2009). *Tarımsal Mekanizasyon 1*. <https://tarimmakinalari.cu.edu.tr/cu/ogrenci/ders-notlari/prof-dr-serdar-oztekin> (Erişim tarihi: 01.10.2025)
- Sedara, A., and Adenigba, A. (2021). Design, Fabrication and Performance Evaluation of Groundnut Dehulling and Separating Machine. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(1), 104-123.
- Tahir, A.R., Neethirajan, S., Jayas, D.S., Shahin, M.A., Symons, S.J., White, N.D.G. (2007). Evaluation of the effect of moisture content on cereal grains by digital image analysis, *Food Research International*, Volume 40, Issue 9, Pages 1140-1145, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.06.009>.
- Ugurluay, S., Akcali, I.D. (2021). Development of a vibrationless sorting system. *Spa-*

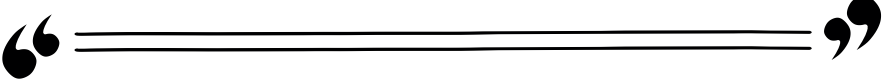
nish Journal of Agricultural Research, Volume 19, Issue 1, e0204. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021191-15884>

Uğurluay, S., İnce, A., Sessiz, A., Kayışoğlu, B., Güzel, E. ve Özcan, M.T., 2010. *Hasat Harman Makinaları ve İlkeleri*. Nobel Kitabevi. ISBN: 978-605-397-111-5.

Yu, C., Pu, K., Geng, R., Qiao, D., Lin, D., Xu, N., Wang, X., Sanpeng Gong, J. L. and Zhou, Q. (2022). Comparison of flip-flow screen and circular vibrating screen vibratory sieving processes for sticky fine particles, *Minerals Engineering*, Volume 187, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107791>.



TARIMSAL ROBOTLARDA ENERJİ YÖNETİMİ VE GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİ



Osman ECEOĞLU¹

İlker ÜNAL²

¹ Öğr. Gör. Dr. ¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Antalya-Türkiye. ORCID: 0000-0001-5778-6655 osmaneceoglu@akdeniz.edu.tr

² Doç. Dr. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Burdur-Türkiye. ORCID: 0000-0002-5188-4438 iunal@mehmetakif.edu.tr

1. Giriş

Tarımsal robotik sistemler, modern tarım endüstrisinde emek yoğun süreçleri azaltmakta, üretim doğruluğunu artırmakta ve kaynak kullanımını optimize etmektedir. Meyve bahçesi yönetimi, hassas ilaçlama, yabancı ot mücadelesi, örneklem, sınıflandırma, verim tahmini ve hasat destek gibi operasyonlarda robotların kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte enerji yönetimi, bu sistemlerin performansını belirleyen temel mühendislik bileşeni hâline gelmektedir. Açık arazi koşullarında enerji tüketimi; toprağın mekanik özellikleri, eğim, yüzey pürüzlülüğü, zemin sertliği, kayma davranışı, sensör yükü, veri işleme maliyeti ve hız profili gibi çok boyutlu değişkenler tarafından eşzamanlı olarak şekillenmektedir.

Tarımsal robotların enerji tüketimi, yalnızca motor gücüne değil, aynı zamanda robot-toprak etkileşimine de bağlıdır. Shen ve arkadaşları (2020), eğimli tarım alanlarında kapsama planlaması sırasında eğim değişimlerinin motor tork gereksinimini doğrusal olmayan şekilde artırdığını ve toplam enerji tüketiminin arazi eğimindeki her %5'lik artışta belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir.

Hameed (2013) ise tarımsal robotlar için geliştirilen kapsama planlama algoritmalarında dönüş sayısı, manevra yoğunluğu ve sıra başı manevralarının enerji tüketiminde kritik rol oynadığını ve yanlış rota seçiminin toplam tüketimi %20'ye kadar artırabildiğini bildirmektedir.

Bunun yanında, robotik algı ve hesaplama modülleri de enerji yükünün önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Rapalski ve Dudzik (2023), farklı navigasyon algoritmalarının enerji performanslarını karşılaştırdığı çalışmada, sensör füzyonu yoğun olan yüksek çözünürlüklü Light Detection and Ranging (LiDAR) tabanlı sistemlerin, düşük çözünürlüklü kamera tabanlı sistemlere kıyasla %28'e kadar daha fazla enerji tükettiğini rapor etmektedir.

Aynı şekilde Jiang ve arkadaşları (2023), Long Short-Term Memory (LSTM) tabanlı enerji tahmin modellerinin endüstriyel robotlarda enerji tüketimini yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini, ancak modelin eğitilmesi için işlemci gücü gereksiniminin batarya ömrünü etkilediğini bildirmektedir.

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde enerji yönetiminin, robotun güç aktarım sistemi, kontrol algoritmaları, sensör seçimi ve rota planlaması gibi birçok sistem bileşeninin eşzamanlı olarak optimize edilmesini gerektiren çok katmanlı bir mühendislik problemi olduğu görülmektedir.

Şekil 1, Promark 500 GPS sistemi ile donatılmış ve Eceoglu ile Ünal (2024) tarafından geliştirilen otonom burgu robotuna ait görseli göstermektedir.



Şekil 1: Otonom burgu robotu (Eceoglu & Ünal, 2024)

2. Güç Aktarım Sistemleri

2.1. Elektrikli Tahrik Sistemleri

Elektrikli tahrik sistemleri, özellikle bahçe robotları ve düşük-orta güç gerektiren tarımsal platformlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Brushless Direct Current (BLDC) ve Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) sınıfı elektrik tahrik birimleri, bu sistemlerin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Szeląg, Dudzik ve Podsiedlik (2023) tekerlekli mobil robotlarda PMSM motorlarının düşük hızlarda daha stabil moment ürettiğini ve enerji dalgalanmasını azalttığını bildirmektedir.

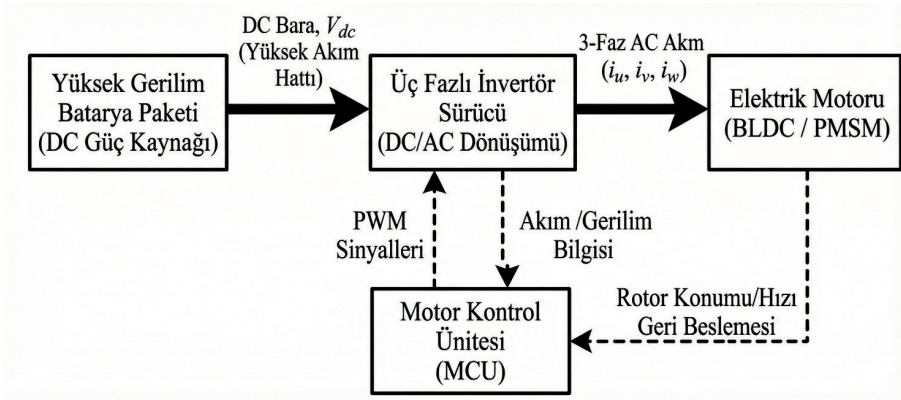
Elektrik motorlarının avantajları:

- Yüksek verimlilik (%85–92 arası),
- Sessiz çalışma,
- Hassas tork kontrolü,

- Düşük bakım ihtiyacı,
- Anlık tork üretimi,
- Emisyonuz çalışır.

Ancak elektrikli tahrik sistemleri, özellikle eğimli arazi ve yumuşak toprak gibi zorlayıcı koşullarda batarya tüketimi nedeniyle menzil sorunları yaşamaktadır. Xie ve arkadaşları (2022), elektrikli traktörlerde yüksek tork gerektiren anlarda batarya akımının kısa süreli olarak nominal seviyenin %170'ine ulaşabildiğini ve bunun termal risk oluşturduğunu rapor etmektedir.

Elektrikli tahrik sisteminin temel bileşenleri arasındaki güç akışı ile batarya–invertör–motor yapısının genel çalışma prensibi Şekil 2’de şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 2: Elektrikli tahrik sisteminin genel yapısı

2.2. Hibrit Tahrik Sistemleri

Hibrit tahrikli tarım araçları, içten yanmalı motorun enerji yoğunluğunu elektrik motorunun tork doğruluğu ile birleştirerek uzun süreli operasyon imkânı sunmaktadır. Yang ve arkadaşları (2025), hibrit tahrik kullanılan traktörlerde enerji tüketiminin %15–28 arasında düşürülebildiğini, özellikle seri-paralel hibrit mimarinin eğimli arazilerde en yüksek verimi sağladığını belirtmektedir.

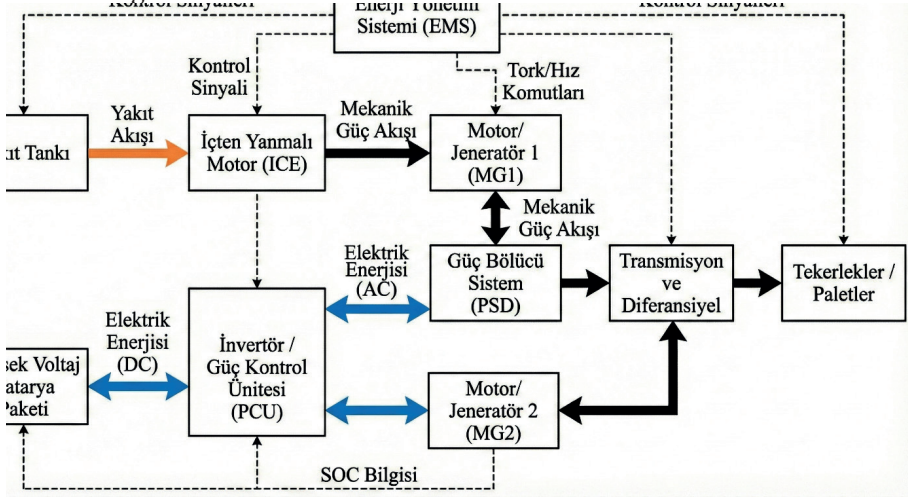
Zhao ve arkadaşları (2024), Model Predictive Control (MPC) tabanlı Energy Management System (EMS) algoritmasının, güç dağılımını arazi koşullarına göre gerçek zamanlı optimize ederek yakıt tüketiminde belirgin iyileşme sağladığını göstermektedir.

Hibrit sistemlerin avantajları:

- Uzun operasyon süresi,
- Eğimli arazide yüksek tork,

- Batarya sağlığının daha stabil korunması,
- Ani tork taleplerinde kararlı güç üretimi.

Tarımsal robotlarda yaygın olarak kullanılan seri-paralel hibrit tahrik mimarisinin bileşenleri arasındaki enerji ve güç akış ilişkisi Şekil 3'te bütüncül olarak gösterilmektedir.

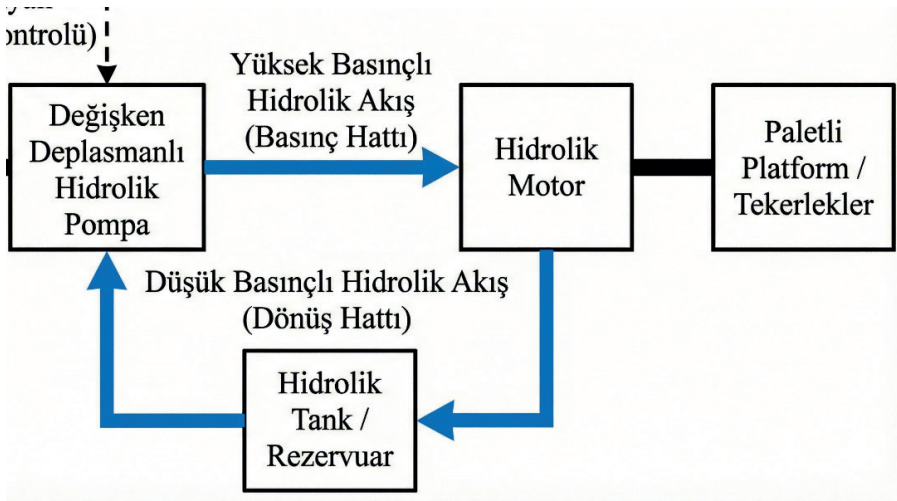


Şekil 3: Seri-Paralel hibrit tahrik sisteminde enerji ve güç akışlarının genel yapısı

2.3. Hidrostatik Tahrik Sistemleri

Hidrostatik tahrik sistemleri tarımsal robotlarda özellikle paletli platformlar için önem taşımaktadır. Lovarelli ve Bacenetti (2019), hidrostatik traktörlerde yük-altında tork yönetiminin mekanik sistemlere göre daha stabil olduğunu, ancak enerji veriminin daha düşük kaldığını belirtmektedir.

Hidrostatik tahrik mimarisinde pompa, motor ve hidrolik akış hatları arasındaki temel enerji iletimi Şekil 4'te şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 4: Hidrostatik tahrik sisteminde pompa, motor ve hidrolik akış hatlarının genel yapısı

Tarımsal robotlarda kullanılan elektrikli, hibrit ve hidrostatik güç aktarım mimarilerinin temel avantajları, dezavantajları ve tipik kullanım alanları Çizelge 1’de özetlenmektedir.

Çizelge 1. Güç Aktarım Sistemlerinin Karşılaştırılması

Sistem Türü	Avantajları	Dezavantajları	Tipik Uygulama
Elektrik	Sessiz, verimli,	Batarya kapasitesi sınırlı	Bahçe robotları,
Tahrikli	düşük bakım		küçük arazi robotları
Hibrit	Uzun operasyon süresi,	Karmaşık yapı,	Geniş tarla robotları,
	dinamik güç paylaşımı	daha yüksek maliyet	bağ robotları
Hidrostatik	Yüksek tork, sağlam yapı	Düşük enerji verimi	Paletli robotlar,
			dik eğimli araziler

3. Kontrol Sistemleri, EMS ve Güç Yönetimi

3.1. Elektrik Motoru Kontrol Yöntemleri

Tarımsal robotlarda elektrik motoru kontrolü, özellikle düşük hız-yük kombinasyonlarında yüksek moment doğruluğu gerektirdiğinden, klasik endüstriyel sistemlerden daha karmaşık bir yapı göstermektedir. PMSM ve BLDC motorlar, tarımsal ortamlarda yaygın olarak kullanılmakta ve bu motorların kontrolünde genellikle Field-Oriented Control (FOC), Direct Torque Control (DTC) ve sensörsüz tahminleyiciler temel stratejileri oluşturmaktadır.

Szeląg ve arkadaşları (2023), PMSM motorlarda FOC kontrolünün özellikle düşük hızlarda moment dalgalanmasını azalttığını ve enerji dalgalanmasının %7-12 arasında düştüğünü göstermektedir. Bu sonuç, bahçe robot-

ları gibi düşük hız gerektiren uygulamalarda FOC'un avantajını ortaya koymaktadır.

DTC stratejisi ise daha hızlı geçici tepki sağlamaktadır ancak moment dalgalanması FOC'a göre daha yüksektir. Gürgöze ve Türkoğlu (2022), DTC'nin yüksek hızlarda avantaj sağladığını, ancak düşük hız-yük koşullarında enerji tüketimini artırabildiğini bildirmektedir.

Bu bulgulardan, tarımsal robotlarda kontrol stratejisinin uygulamaya özel seçilmesi gerektiğini anlaşılmaktadır.

3.2. Hibrit Sistemler için Enerji Yönetim Algoritmaları (EMS)

Hibrit tahrik sistemlerinde enerji yönetimi, içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasında tork dağılımını belirleyen, batarya sağlığını gözetmen ve yakıt tüketimini minimize eden bir karar mekanizmasıdır. Tarımsal uygulamalarda arazi eğimi, yük değişimi ve görev türleri diğer mobil uygulamalara göre daha değişken olduğundan EMS, tarımsal robotlar için kritik teknolojidir.

3.2.1. Kural Tabanlı EMS

Kural tabanlı enerji yönetim sistemleri, bataryanın State of Charge (SOC) seviyesini, motor yükünü ve hız profilini esas alarak karar üretmektedir.

Yang ve arkadaşları (2025), kural tabanlı EMS'in tasarım kolaylığına rağmen tarla koşullarında optimum enerji verimliliği sunmadığını ve %8-12 aralığında enerji kaybına yol açtığını belirtmektedir.

3.2.2. Optimizasyon Tabanlı EMS

Bu yaklaşımda Dinamik Programlama (DP) ve Model Predictive Control (MPC) en sık kullanılan tekniklerdir.

Zhao ve arkadaşları, (2024), hibrit traktörlerde MPC tabanlı EMS kullanımının yakıt tüketimini klasik yöntemlere göre %14 azalttığını bildirmiştir. MPC özellikle değişken arazi eğimlerinde motor-jeneratör dengesini daha etkin yönetmektedir.

Feng ve arkadaşları (2024) ise DP tabanlı optimizasyonla hibrit traktörlerde egzoz emisyonlarının %22 azaldığını göstermektedir.

3.2.3. Makine Öğrenmesi ve Pekiştirmeli Öğrenme Tabanlı EMS

Son yıllarda hibrit traktör ve tarla robotları için Reinforcement Learning (RL) tabanlı EMS modelleri gelişmektedir.

Miranda ve Vázquez (2023), derin öğrenme tabanlı enerji tahmini modellerinin robotik işlerde ani yük değişimlerini daha doğru modellediğini; bu nedenle hibrit sistemlerde RL tabanlı EMS'in enerji tasarrufunu artırdığını bildirmektedir.

RL tabanlı EMS'in tarımsal robotlara uyarlanması hâlâ araştırma aşamasındadır; ancak ilk sonuçlar hibrit tahrikli tarımsal robotların geleceğinde bu yöntemlerin belirleyici olacağını göstermektedir.

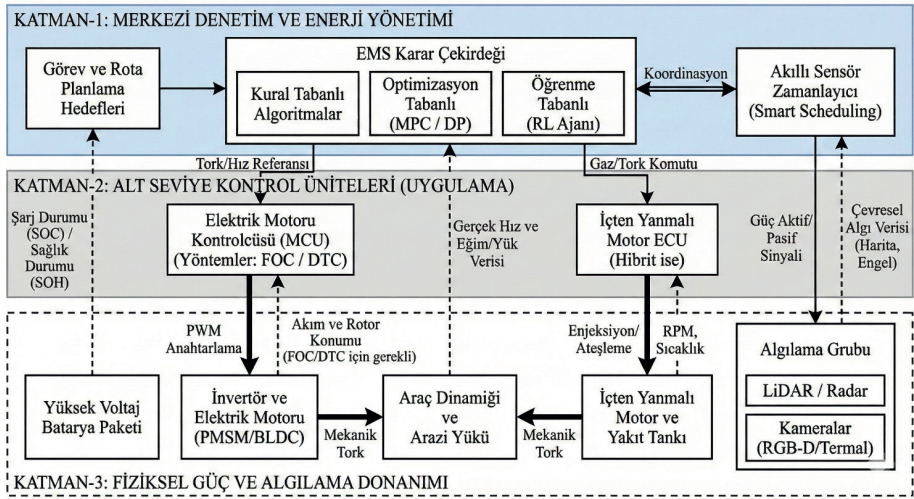
3.3. Sensör Yönetimi ve Enerji Tüketimi

Tarımsal robotlarda sensör entegrasyonu, enerji tüketimini çoğu zaman motor yükü kadar etkileyen kritik bir bileşen hâline gelmektedir. LiDAR, radar, termal kamera, multispektral kamera ve RGB-D sistemlerinin her biri işlemci ve bellek üzerinde ciddi enerji maliyeti oluşturmaktadır.

Rapalski ve Dudzik (2023), LiDAR tabanlı navigasyonun kamera tabanlı navigasyona göre %28 daha fazla enerji harcadığını göstermektedir.

“Akıllı sensör yönetimi (smart sensor scheduling)” yaklaşımında sensörler sürekli çalışmak yerine görev odaklı olarak devreye girmektedir. Bu yaklaşım tarla robotlarında enerji tasarrufunun anahtar bileşenlerinden biridir.

Motor kontrolü, EMS karar çekirdeği ve sensör zamanlayıcı arasında çok katmanlı bilgi akışı sağlayan bütünlük kontrol yapısı Şekil 5'te sunulmaktadır.



Şekil 5: Tarımsal robotlarda katmanlı kontrol ve enerji yönetim mimarisinin genel yapısı

4. Enerji Verimliliği Optimizasyonu ve Makine Öğrenmesi Yaklaşımları

4.1. Enerjiye Duyarlı Rota Planlama

Tarımsal robotların enerji tüketimi büyük ölçüde rotanın geometrik yapısına, dönüş sayısına, eğim değişimine ve yüzey sertliğine bağlıdır. Bu nedenle enerji tabanlı kapsama planlama son yıllarda literatürde öne çıkmak-

tadır.

Hameed (2013), sıra başı dönüşlerinin toplam enerji tüketiminin %18–22'sini oluşturduğunu ve dönüş minimizasyonunun enerji tasarrufunda belirleyici olduğunu göstermektedir.

Shen ve arkadaşları (2020), eğimli arazilerde enerji tabanlı kapsama optimizasyonunda Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) yönteminin, standart Boustrophedon rotalarına kıyasla enerji tüketimini yaklaşık %12 oranında azalttığını bildirmektedir.

Jin ve Lie (2011), üç boyutlu arazi modellerinde eğim ve yük değişimlerinin rota seçiminde dikkate alınmasının enerji tüketimini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, tarımsal robotlarda rota planlamasının yalnızca kapsama oranına değil enerji maliyetine göre yapılması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

4.2. Tork Yönetimi ve Çekiş Kontrolü

Tarımsal robotlarda tork yönetimi; kayma, zemin sertliği, sürtünme katsayısı ve tekerlek-toprak etkileşimi nedeniyle oldukça karmaşıktır. Yanlış tork yönetimi, özellikle yumuşak zeminlerde %30'a yakın enerji kaybına neden olabilmektedir.

Lovarelli & Bacenetti (2019), ağır hizmet traktörlerinde paletli yapılarda tork dalgalanmasının enerji verimini düşürdüğünü; hidrostatik tahrikin tork doğruluğu açısından avantaj sunduğunu belirtmektedir.

Modern tarla robotlarında tork tabanlı çekiş kontrolü giderek yaygınlaşmaktadır. Bu kontrol, torkun yüzeye uygun seviyede uygulanmasıyla kaymayı azaltmaktadır.

4.3. LSTM ve Derin Öğrenme ile Enerji Tahmini

Enerji tüketimi zaman serisi karakterine sahip olduğundan LSTM modelleri bu alanda güçlü performans sergilemektedir.

Jiang ve arkadaşları (2023), LSTM tabanlı modellerin robotik enerji tüketiminde %94 doğruluk oranına ulaştığını bildirmektedir.

Miranda ve Vázquez (2023) ise LSTM + Convolutional Neural Network (CNN) hibrit modellerinin özellikle hız-tekerlek kayması gibi karmaşık değişkenlerin etkisini daha doğru tahmin ettiğini göstermektedir.

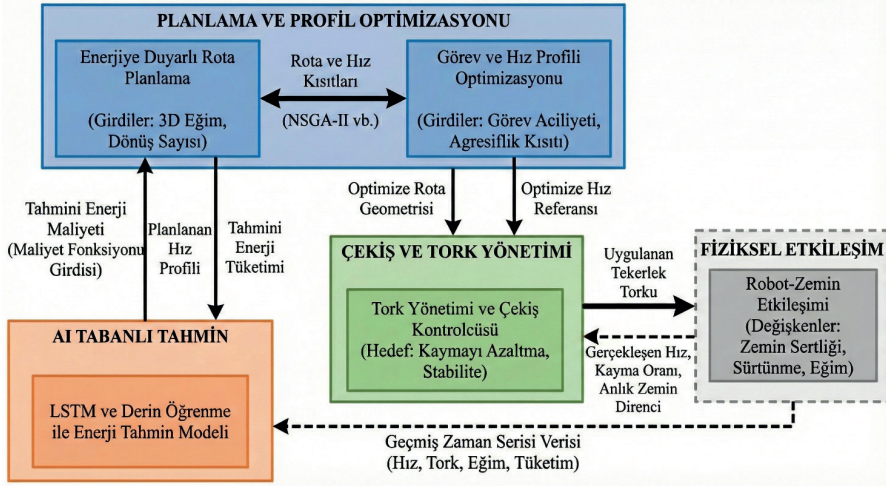
Bu tür modeller enerjiye duyarlı rota planlaması ve EMS algoritmalarına entegre edildiğinde ciddi avantajlar sunmaktadır.

4.4. Görev ve Hız Profili Optimizasyonu

Tarımsal robot görevlerinde hız profili doğrudan enerji tüketimini belirlemektedir. Rapalski ve Dudzik (2023), agresif hızlanma–yavaşlama döngülerinin enerji tüketimini %20 artırdığını göstermektedir.

Bu nedenle hız profili optimizasyonu, tarımsal robotlarda sürdürülebilir enerji yönetiminin temel bileşenidir.

Bölüm 4’te ele alınan enerjiye duyarlı rota planlaması, tork ve çekiş yönetimi, yapay zekâ tabanlı enerji tahmini ve hız profili optimizasyonu arasındaki veri akışı ve karar ilişkileri Şekil 6’da bütüncül bir yapı olarak gösterilmektedir.



Şekil 6: Tarımsal robotlarda enerji optimizasyonu için bütüncül karar ve kontrol döngüsü

5. Tarımsal Robotlarda Geleceğin Enerji Yaklaşımları

5.1. Yenilenebilir Enerji Tabanlı Güç Sistemleri

Tarımsal robotlarda enerji yönetiminin geleceği büyük ölçüde yenilenebilir enerji tabanlı çözümlere yönelmektedir. Özellikle güneş enerjisi, kırsal alanlarda şebekeden bağımsız çalışmanın yaygınlaşmasıyla birlikte tarımsal robotlar için potansiyel birincil enerji kaynağı hâline gelmektedir.

Gorjian ve arkadaşları (2021), güneş enerjisiyle çalışan tarım makineleri üzerine yaptıkları geniş kapsamlı incelemede, fotovoltaiik panellerin tarla içi mobil robotlarda yardımcı enerji kaynağı olarak kullanıldığında toplam enerji ihtiyacının %18–32’sinin karşılanabildiğini göstermektedir.

Ghobadpour ve arkadaşları (2019), yenilenebilir enerji ile çalışan otonom tarımsal araçların, özellikle düşük güçlü sensör platformlarında tam gün çalışma kapasitesine ulaşabildiğini ve mevsimsel işlem döngülerinde karbon

emissionunu önemli ölçüde azalttığını bildirmektedir.

Bu çalışmalar, yenilenebilir enerji tabanlı hibrit depolama yapılarının gelecekte tarımsal robotlar için standart hâle geleceğini göstermektedir.

5.2. Batarya-Süperkapasitör Hibrit Depolama Sistemleri

Tarımsal robotik operasyonlarda yük profili sabit değildir; anlık tork artışları, yumuşak zemin geçişleri ve manevra sırasındaki geçici güç talepleri enerji depolama birimlerinde aşırı akım çekişine neden olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda batarya-süperkapasitör hibrit enerji depolama sistemleri önem kazanmaktadır.

Jing ve arkadaşları (2018), hibrit enerji depolama sistemlerinde süperkapasitörlerin ani güç gereksinimlerini karşılayarak bataryaların akım piklerine maruz kalmasını engellediğini ve bu sayede batarya ömrünün %15-25 uzadığını belirtmektedir.

Tarımsal robotlar açısından bu durum kritik bir avantajdır; çünkü tarla yüzeyi sabit değildir ve robot sık sık tork artışı gerektiren küçük engeller veya çamurlu bölgelerle karşılaşmaktadır. Süperkapasitör destekli sistemler hem batarya sağlığını korumakta hem de daha kararlı bir güç dağılımı sağlamaktadır.

5.3. Robotik Mikro Şebekeler ve Çoklu Robot Enerji Paylaşımı

Çoklu robot sistemlerinin kullanıldığı büyük ölçekli tarım işletmelerinde, robotlar arası enerji paylaşımı kavramı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu yaklaşımda birden fazla robot, ortak bir enerji yönetim protokolü altında dinamik olarak batarya takası yapabilmekte, güç paylaşabilmekte veya mobil şarj istasyonlarını sırayla kullanabilmektedir.

Bras ve arkadaşları (2024), agroekolojik tarımda robotik enerji yönetimini incelediği çalışmada, çoklu robot enerji paylaşım protokollerinin toplam operasyon süresini %22'ye kadar artırabildiğini; özellikle görev kuyruklaşması ve enerjiye dayalı görev dağılımı uygulandığında verimin belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir.

5.4. Yapay Zekâ Destekli Enerji Yönetimi

Enerji tahmini ve yönetimi, çok değişkenli ve doğrusal olmayan bir problem olduğundan yapay zekâ yöntemleri bu alanda önemli bir perspektif sunmaktadır. Enerji tüketimi; hız, ivme, tekerlek-toprak etkileşimi, arazi eğimi, sensör yükü, batarya sıcaklığı ve rota geometrisi gibi geniş bir değişken kümesine bağlıdır. Derin öğrenme yöntemleri bu karmaşıklığı modellemede geleneksel yöntemlere göre daha başarılıdır.

Jiang ve arkadaşları (2023), LSTM tabanlı enerji tahmini modellerinin endüstriyel robotlarda %94'e varan doğruluk sağladığını, çok değişkenli sis-

temlerde bile tahmin başarımının yüksek olduğunu bildirmektedir.

Miranda ve Vázquez (2023), CNN-LSTM tabanlı hibrit modellerin özellikle tekerlek kayması gibi ani değişimlerin enerji tüketimine etkisini daha iyi modellediğini ve optimizasyon algoritmalarına entegre edildiğinde toplam enerji tüketiminde anlamlı iyileşmeler sağladığını göstermektedir.

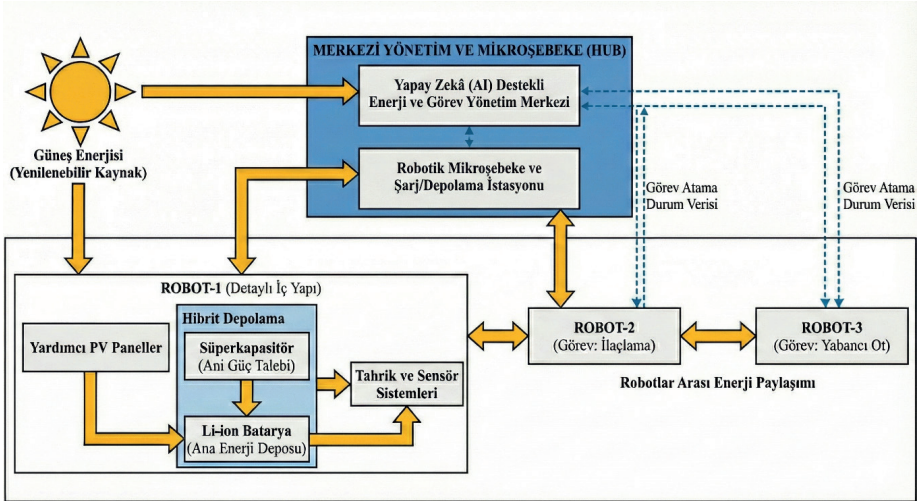
5.5. Enerjiye Dayalı Görev Dağılımı ve Operasyon Yönetimi

Tarımsal robot operasyonlarının başarısı yalnızca doğru rota seçimine değil, aynı zamanda görevin enerjiye göre dağıtılmasına da bağlıdır. Çoklu robot sistemlerinde görev dağılımı geleneksel olarak mesafe-minimizasyonu-na göre yapılmaktadır. Ancak mobil robot çalışmalarında, enerji-minimizasyonlu görev tahsisi çok daha verimli sonuçlar vermektedir.

Dai ve arkadaşları (2024), birden fazla toplama robotunun görev tahsisi için geliştirdiği matematiksel modelde enerji tüketimi ile görev süresi arasında denge kuran çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının, statik yöntemlere göre %17–24 daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Tarımda birden fazla robotun eşzamanlı çalıştığı sistemlerde bu yaklaşım doğrudan verim artışına dönüşmektedir.

Geleceğin tarımsal robotik sistemlerinde enerji yönetimi, yenilenebilir kaynakların integrasyonu, hibrit depolama yapıları, çoklu robotlar arası enerji paylaşımı ve yapay zekâ tabanlı koordinasyonun bütünleşik biçimde çalışmasına dayanmaktadır. Şekil 7, bu otonom enerji ekosisteminin mimarisini özetlemektedir.



Şekil 7: Çoklu tarımsal robot sistemlerinde yenilenebilir enerji, hibrit depolama ve yapay zekâ destekli görev-enerji yönetimi mimarisi

6. Sonuç

Bu çalışmada tarımsal robotlarda enerji yönetimi, güç aktarım sistemleri, kontrol algoritmaları, sensör yönetimi, rota optimizasyonu ve geleceğe yönelik enerji yaklaşımları çok yönlü olarak ele alınmıştır. Elektrikli, hibrit ve hidrostatik tahrik sistemlerinin performansı, tarımsal ortamın değişken yapısından doğrudan etkilenmektedir. Eğim, zemin sertliği, kayma, sensör yükü ve hız profili gibi faktörler enerji tüketimini belirleyen temel unsurlar arasındadır.

Gerçek çalışmalar göstermektedir ki:

- Hibrit tahrik sistemleri tarla robotlarında %15–28 enerji tasarrufu sağlamaktadır (Yang vd., 2025; Zhao vd., 2024).
- LSTM tabanlı enerji tahmin modelleri robotik enerji yönetiminde yüksek doğruluk sunmaktadır (Jiang vd., 2023).
- Enerjiye duyarlı rota planlama algoritmaları toplam enerji tüketimini %10–22 azaltabilmektedir (Hameed, 2013; Shen vd., 2020).
- Yenilenebilir enerji + hibrit depolama sistemleri, tarımsal robotların operasyon sürelerini anlamlı biçimde artırmaktadır (Ghobadpour vd., 2019; Gorjian vd., 2021).

Bu sonuçlar, tarımsal robotlarda enerji yönetiminin gelecekte sistem performansının ayrılmaz bir bileşeni hâline geleceğini ve yapay zekâ tabanlı güç yönetimi modellerinin bu süreçte belirleyici olacağını göstermektedir.

Kaynaklar

- Bras, A., Montanaro, A., Pierre, C., Pradel, M., & Laconte, J. (2024). *Toward a Better Understanding of Robot Energy Consumption in Agroecological Applications*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.07697>
- Dai, L. L., Pan, Q. K., Miao, Z. H., Suganthan, P. N., & Gao, K. Z. (2024). Multi-Objective Multi-Picking-Robot Task Allocation: Mathematical Model and Discrete Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(6), 6061-6073. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3336659>
- Eceoglu, O., & Ünal, İ. (2024). Optimizing Orchard Planting Efficiency with a GIS-Integrated Autonomous Soil-Drilling Robot. *AgriEngineering 2024, Vol. 6, Pages 2870-2890*, 6(3), 2870-2890. <https://doi.org/10.3390/AGRIENGINEERING6030166>
- Feng, G., Zhang, J., Yan, X., Dong, C., Liu, M., & Xu, L. (2024). Research on energy-saving control of agricultural hybrid tractors integrating working condition prediction. *PLOS ONE*, 19(3), e0299658. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0299658>
- Ghobadpour, A., Boulon, L., Mousazadeh, H., Malvajerdi, A. S., & Rafiee, S. (2019). State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems. *Energy Procedia*, 162, 4-13. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2019.04.002>
- Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021). The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126030. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126030>
- Gürgöze, G., & Türkoğlu, İ. (2022). A novel energy consumption model for autonomous mobile robot. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(1), 216-232. <https://doi.org/10.3906/elk-2103-15>
- Hameed, I. A. (2013). Intelligent Coverage Path Planning for Agricultural Robots and Autonomous Machines on Three-Dimensional Terrain. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 2013 74:3, 74(3), 965-983. <https://doi.org/10.1007/S10846-013-9834-6>
- Jiang, P., Wang, Z., Li, X., Wang, X. V., Yang, B., & Zheng, J. (2023). Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. *Journal of Manufacturing Systems*, 70, 137-148. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2023.07.009>
- Jin, J., & Tang, L. (2011). Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming. *Journal of Field Robotics*, 28(3), 424-440. <https://doi.org/10.1002/ROB.20388>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Jing, W., Lai, C. H., Wong, W. S. H., & Wong, M. L. D. (2018). A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification. *Applied Energy*, 224, 340-356. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.04.106>

- Lovarelli, D., & Bacenetti, J. (2019). Exhaust gases emissions from agricultural tractors: State of the art and future perspectives for machinery operators. *Biosystems Engineering*, 186, 204-213. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEM-SENG.2019.07.011>
- Miranda, S., & Vázquez, C. R. (2023). Analysis and Prediction of Energy Consumption in a Collaborative Robot. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 3710-3715. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2023.10.1538>
- Rapalski, A., & Dudzik, S. (2023). Energy Consumption Analysis of the Selected Navigation Algorithms for Wheeled Mobile Robots. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 1532, 16(3), 1532. <https://doi.org/10.3390/EN16031532>
- Shen, M., Wang, S., Wang, S., & Su, Y. (2020). Simulation Study on Coverage Path Planning of Autonomous Tasks in Hilly Farmland Based on Energy Consumption Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(1), 4535734. <https://doi.org/10.1155/2020/4535734>
- Szeląg, P., Dudzik, S., & Podsiedlik, A. (2023). Investigation on the Mobile Wheeled Robot in Terms of Energy Consumption, Travelling Time and Path Matching Accuracy. *Energies*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/en16031210>
- Xie, B., Wang, S., Wu, X., Wen, C., Zhang, S., & Zhao, X. (2022). Design and hardware-in-the-loop test of a coupled drive system for electric tractor. *Biosystems Engineering*, 216, 165-185. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEM-SENG.2022.02.014>
- Yang, Y., Wen, Y., Sun, X., Wang, R., & Dong, Z. (2025). A Review of Green Agriculture and Energy Management Strategies for Hybrid Tractors. *Energies* 2025, Vol. 18, Page 3224, 18(13), 3224. <https://doi.org/10.3390/EN18133224>
- Zhao, Y., Xu, L., Zhao, C., Xu, H., & Yan, X. (2024). Research on Energy Management Strategy for Hybrid Tractors Based on DP-MPC. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 3924, 17(16), 3924. <https://doi.org/10.3390/EN17163924>



**TÜRKİYE KOŞULLARINDA
FINDIK HASAT
YÖNTEMLERİNİN (ELLE-
PNÖMATİK-MEKANİK) TEKNİK
VE EKONOMİK AÇIDAN
KARŞILAŞTIRILMASI**

“ ”

Hüseyin SAUK¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi; Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Samsun. hsauk@omu.edu.tr, orcid id: 0000-0001-5622-6170

1. Giriş

Türkiye yaklaşık 750 bin ha alan ile dünya fındık dikim alanlarının yaklaşık %75'ine sahiptir. Kabuklu fındık olarak üretim miktarı ise yaklaşık 650 bin ton olup dünya fındık üretiminin yaklaşık %60'ını karşılamaktadır. (FAO, 2023). Türkiye'de dekara ortalama fındık verimi 1969–1972 yılları arasında 61,33 kg iken, 1979–1982 döneminde 70,50 kg'a yükselmiştir. Yaklaşık on yıllık süreçte gerçekleşen %18,8 oranındaki bu artış, üretim tekniklerindeki gelişmelerden ziyade, daha çok verimli, düz ve taban arazilerde fındık yetiştiriciliğinin yaygınlaşmasına bağlanmaktadır. Türkiye, dünya fındık üretim alanlarının büyük bölümüne sahip olmasına rağmen, birim alan verimi açısından diğer üretici ülkelerin gerisinde kalmaktadır. Nitekim dekara fındık verimi Türkiye'de 108 kg iken, bu değer ABD'de 293 kg, Gürcistan'da 201 kg, İtalya'da 183 kg ve İspanya'da 125 kg'dır (FAO, 2011).

Sert kabuklu meyve üretiminde hasat işlemi, yüksek iş gücü gereksinimi nedeniyle üretim maliyetlerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Tous vd., 1994). Türkiye koşullarında fındığın elle hasadı yaklaşık 306 BİİGh/ha iş gücü gerektirmekte olup, bu değer toplam çalışma zamanının %71'ini ve üretim maliyetinin yaklaşık %55'ini oluşturmaktadır (İlkyaz, 1986). Bu durum, fındık üretim maliyetlerinin artmasına ve hasat döneminde yoğun emek ihtiyacının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. İş gücü gereksinimi ve maliyetlerin azaltılması ise hasat işleminin makinalaştırılmasıyla mümkün olabilmektedir.

Türkiye dışındaki ekonomik ölçekte fındık üreten ülkelerde hasat işlemleri büyük ölçüde mekanize edilmiş durumdadır. Ancak mekanik hasadın uygulanabilirliği; topografya, toprak özellikleri, dikim sistemi, bahçe büyüklüğü, çeşit özellikleri, kültürel uygulamalar ve sosyo-ekonomik koşullar gibi birçok faktöre bağlıdır. Günümüzde bu faktörlerin olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiş olup, buna bağlı olarak dünya genelindeki farklı üretim bölgelerinde uygulanan mekanik hasat teknolojileri de çeşitlilik göstermektedir (Beyhan ve Yıldız, 1996).

Bu çalışmanın amacı; Türkiye'de fındık üretiminde hasat aşamasında ortaya çıkan yüksek iş gücü gereksinimi ve maliyet sorunlarını irdelemek, mevcut hasat yöntemlerini (elle, pnömatik ve mekanik) teknik ve ekonomik performans göstergeleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Ayrıca, Türkiye'nin bahçe yapısı, topoğrafik özellikleri ve ürün karakteristikleri dikkate alınarak mekanik hasadın uygulanabilirliğini ve yaygınlaştırılmasını sınırlayan temel faktörleri ortaya koymaktır.

2. Bahçe Tesisi

Fındık, Karadeniz Bölgesi'nde deniz seviyesinden itibaren kıyıda yaklaşık 60 km iç kesimlere ve 750 m rakıma kadar ekonomik olarak yetiştirile-

bilmektedir. Yükselti ve denize olan uzaklığa bağlı olarak fındık yetiştiriciliği yapılan alanlar üç ekolojik kuşak altında sınıflandırılmaktadır. 0–250 m rakıma sahip ve kıyından yaklaşık 0–10 km iç kesimlerde yer alan alanlar sahil kol olarak adlandırılmakta olup, fındık yetiştiriciliği açısından en uygun ekolojik koşulları sunmaktadır. 251–500 m rakım ve 10–20 km iç kesimlerde yer alan alanlar orta kol, 501–750 m rakım ve 20 km’den daha uzak alanlar ise yüksek kol olarak tanımlanmaktadır. 750 m rakımın üzerindeki alanlarda, iklim koşullarının uygun olmaması nedeniyle ekonomik anlamda fındık yetiştiriciliği yapılamamaktadır (Okay vd., 1986).

Türkiye’de fındık bahçelerinin tesisinde yaygın olarak ocak dikim sistemi uygulanmaktadır. Bu sistem, Karadeniz Bölgesi’nde geleneksel olarak kullanılan ve çok gövdeli gelişimi esas alan bir dikim şeklidir. Nitekim Samsun ili Terme ve Çarşamba ilçelerinde fındık üretim alanlarının yaklaşık %91’i ocak tipi dikim sistemine, geri kalan %9’luk kısmı ise sıra tipi dikim sistemine sahiptir. Ocak tipi dikimde her bir ocakta genellikle 6–8 adet fındık fidanı, yaklaşık 1.0–1.20 m çapında ve 0.60–0.70 m derinliğinde açılan dikim çukurlarına yerleştirilmektedir. Ocaklar arası mesafe, arazi eğimi, toprak yapısı ve çeşit özelliklerine bağlı olarak genellikle 4×4 m ile 6×6 m arasında değişmektedir (Özbek, 1978; Kılıç, 1997).

Ocak dikim sistemi, geleneksel üretim alışkanlıklarına uyumlu olmakla birlikte, bahçe içi mekanizasyon uygulamalarını sınırlayabilmekte; özellikle hasat, budama ve kültürel işlemlerde iş gücü gereksinimini artırabilmektedir. Bu durum, mekanik hasat uygulamalarının yaygınlaştırılması açısından bahçe tesis aşamasının kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

3. Zemin Hazırlığı

Türkiye’de fındık hasadına başlamadan önce, hasadın etkin ve kayıpsız bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla fındık bahçelerinde zemin hazırlığı yapılmaktadır. Özellikle Karadeniz Bölgesi’nin yağışlı iklim koşulları, yabancı otlar ve dikenli bitkilerin hızlı gelişmesine neden olmakta; bu durum hem hasat işlemini zorlaştırmakta hem de yere düşen fındıkların kaybolmasına yol açmaktadır. Bu nedenle hasat öncesi yapılan zemin temizliği, hem iş verimliliği hem de ürün kayıplarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Yabancı ot kontrolünde, düşey düzlemde dönerek çalışan biçme makineleri ile herbisit uygulamaları, geleneksel toprak işleme yöntemlerine kıyasla daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Biçme makinelerinin kullanımı, zemin hazırlığında ihtiyaç duyulan iş gücünü önemli ölçüde azaltmakta ve hasat öncesi hazırlık süresini kısaltmaktadır. Toprak işlemenin yapılmadığı, doğal yapısı korunmuş bahçelerde ise çoğunlukla yalnızca yabancı otların temizlenmesi yeterli olmaktadır.

Fındık üretiminde hasat işleminden sonra en yüksek iş gücü gereksinimi bakım faaliyetlerinde ortaya çıkmaktadır. Bakım işleri içerisinde dip sürgünü temizliği, toplam bakım iş gücünün yaklaşık %42'sini oluşturarak en fazla emek gerektiren uygulama olarak öne çıkmaktadır (İlkyaz, 1986). Dip sürgünü temizliği geleneksel olarak fındık bıçağı, çepin ve motorlu çalı tırpanları kullanılarak yapılmaktadır. Bununla birlikte, günümüzde iş gücü ihtiyacını azaltmak ve uygulama süresini kısaltmak amacıyla dip sürgünü kontrolünde çeşitli herbisitler de kullanılmaktadır. Ancak herbisit kullanımının, çevresel etkiler ve uzun dönemli bahçe sağlığı açısından dikkatli bir şekilde planlanması gerekmektedir.

Mekanik hasat uygulamalarının etkinliği, büyük ölçüde hasat öncesinde yapılan zemin hazırlığının niteliğine bağlıdır. Fındık bahçelerinde yüzeyin düzgün, yabancı otlardan ve bitki artıklarından arındırılmış olması; mekanik hasat makinelerinin çalışma verimini, ürün toplama etkinliğini ve makine-ürün etkileşimini doğrudan etkilemektedir. Yeterli zemin hazırlığı yapılmayan bahçelerde, makinenin yerle temas eden elemanları düzensiz çalışmakta, bu durum hem ürün kayıplarının artmasına hem de makine aksamalarında aşınma ve arıza riskinin yükselmesine neden olmaktadır.

4. Fındık Hasat Yöntemleri

4.1. Elle Hasat

Elle hasat, fındık üretiminde en yaygın ve geleneksel hasat yöntemi olup, meyvelerin daldan veya yere düşürüldükten sonra tamamen insan gücüyle toplanmasına dayanmaktadır. Türkiye'de özellikle Doğu ve Batı Karadeniz Bölgeleri'nde, bahçe topoğrafyasının eğimli olması, parsel büyüklüklerinin küçük ve düzensiz yapıda bulunması ve mekanik hasada uygun altyapının yetersizliği nedeniyle uzun yıllardır yaygın olarak uygulanmaktadır.

Elle hasatta hasat zamanının doğru belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Fındıkların hasat olgunluğuna ulaşması; zurufların sararıp kızarması, meyvelerin zuruf içerisinde serbest hareket edebilmesi, kabuk renginin büyük oranda kızarması ve dalların silkelenmesiyle meyvelerin yaklaşık %75'inin dökülmesi gibi göstergelerle belirlenmektedir. Bu dönemde yapılan hasat, ürün kalitesi ve randıman açısından en uygun sonucu vermektedir.

Uygulamada elle hasat farklı şekillerde gerçekleştirilmektedir. En yaygın yöntem, fındıkların doğrudan dallardan elle kopararak toplanmasıdır. Bununla birlikte, dalların silkelenerek meyvelerin yere düşürülmesi ve daha sonra yerden elle toplanması da kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca bazı bahçelerde süpürge yardımıyla namlu oluşturularak elle toplama veya file serilerek hasat yapılmaktadır. Daldan elle toplama yöntemi, hasat olgunluğuna ulaşmamış meyvelerin toplanmasına ve gelecek yılın ürününü oluşturacak tomurcukların zarar görmesine neden olabilmektedir. Fındığın elle toplan-

masında uygulanan farklı hasat yöntemlerinin performans göstergeleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. *Fındığın elle toplanmasında uygulanan farklı hasat yöntemlerinin performans göstergeleri*

Yöntem	Toplama Kapasitesi (kg/h, zuruflu))	Alan İş Başarısı (ha/h)	Toplama Etkinliği (%)	İş Gücü Gereksinimi (h/ha)
Daldan Elle Toplama	6–8	0.001–0.002	90–100	300–340
Silkeleme + Yerden Elle Toplama	8–11	0.002–0.004	95–100	220–280
Elle Namlu Yapma + Toplama	9–12	0.003–0.005	90–95	200–260
File Serilerek Elle Hasat	11–15	0.004–0.006	95–100	180–240
Yerden Seçmeli Elle Toplama	5–7	0.001–0.002	95–100	320–360

Tablo 1’de görüldüğü gibi, elle hasadın en önemli avantajı yüksek toplama etkinliği ve ürün kalitesinin korunmasıdır. Mekanik etkiye maruz kalmayan meyvelerde kırılma ve zedelenme riski son derece düşüktür. Buna karşın, alan iş başarısının çok düşük olması ve yüksek iş gücü gereksinimi, bu yöntemin en önemli dezavantajlarını oluşturmaktadır.

Elle hasat fındık üretim maliyetinin en büyük bileşenini oluşturmaktadır. Hasat işlemi toplam üretim maliyetinin %50–60’ını, toplam iş gücü gereksiniminin ise yaklaşık %70’ini kapsamaktadır. Özellikle son yıllarda mevsimlik işçi teminindeki güçlükler ve artan işçilik ücretleri, elle hasadın ekonomik sürdürülebilirliğini ciddi biçimde sınırlamaktadır. Hasat süresinin uzaması, ürün kayıplarını artırmakta ve olumsuz iklim koşullarına maruz kalma riskini yükseltmektedir.

Elle hasat yöntemi mevcut bahçe yapıları ve topoğrafik koşullar nedeniyle Türkiye’de hâlen yaygın olarak uygulanmakla birlikte, yüksek iş gücü gereksinimi ve maliyetleri nedeniyle modern fındık yetiştiriciliğinde önemli bir kısıt olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, hasat işleminin mekanizasyonuna yönelik araştırmaların ve Türkiye koşullarına uygun alternatif hasat sistemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.2. Makineli Hasat

Ekonomik anlamda fındık üreten İtalya, İspanya ve ABD’ de dikim tekniği ve arazi topoğrafyanın izin verdiği ölçüde mekanik hasat yaygınlaşmıştır. Bu amaçla, pnömatik (vakumlu), pnömatik+mekanik ve mekanik etkili

süpürme ünitesine sahip makinalar kullanılmaktadır. Bu makinalarla çalışmada, iyi bir zemin hazırlığı (tesviye ve sıkıştırma) ve yanal süpürücülerle yayılı ürünün namlu yapılması gerekmektedir. Söz konusu ülkelerde yetiştiriciliği yapılan fındıkların çeşit özelliği olarak kısa zuruflu olması, hasat döneminde fındıkların tane olarak dökülmesine neden olmaktadır. Bu nedenle zuruf soyma makinaları kullanılmamaktadır. Fındık tanelerinin tanımlanabilir geometrik şekli nedeniyle, bilinen separasyon yöntemleriyle etkin olarak temizlenmesi mümkün olmaktadır. Temizlenemeyen taş toprak vb unsurlar su havuzlarında ayrılmakta ve temizlenen fındıklar kurutucularda kurutulmaktadır.

Türk fındık çeşitlerinin uzun zuruflu olması ve meyveyi sıkıca sarması, tanımlanabilir bir geometrik şekle sahip olmaması söz konusu makinaların separasyon sistemlerini etkisiz hale getirmektedir. Ayrıca, dikim tekniğindeki farklılıklar ve bahçe zemini özellikleri nedeniyle süpürücü ünitelerin etkinliği de düşmektedir. Ayrıca, makinaların boyutlarının büyük olması dikim tekniğine bağlı olarak problem yaratmaktadır. İtalyan tarım makinaları imalatçıları yıllardır Türkiye pazarına girme konusunda çaba sarf etmelerine rağmen (Türkiye'ye makina getirerek çiftçi bahçelerinde demonstratif denemeler yaparak) makinaların uygun olmaması nedeniyle başarılı olamamışlardır. Türkiye koşullarına uygun makina geliştirme gayreti içerine girdikleri şeklinde duyumlar da alınmaktadır.

Genel olarak fındık, ceviz, pecan, badem, antepfıstığı gibi sert kabuklu meyvelerin mekanik hasadı aynı prensiplere dayanmaktadır. Bu amaçla geliştirilen ilk hasat makinalarında temel ilke olarak, bahçe zeminine düşürülen meyvelerin aspirasyonla toplanması dikkate alınmış (Park ve Fairbank, 1948), daha sonraları ise, mekanik ve aspirasyon+mekanik toplayıcı kombinasyonu yöntemleri araştırılmıştır (Fridley ve Adrian, 1959; Whitney vd, 1966).

4.2.1. Pnömatik Hasat

Pnömatik etkili fındık hasat makineleri, özellikle düz ve iyi hazırlanmış bahçelerde belirli avantajlar sunmakla birlikte, Türkiye koşullarında yaygınlaşmasını sınırlandıran önemli teknik ve ekonomik kısıtlar içermektedir. Bu sınırlılıklar, büyük ölçüde ürün özellikleri, bahçe yapısı, makine tasarımı ve maliyet unsurlarından kaynaklanmaktadır. Teknik açıdan değerlendirildiğinde, pnömatik hasat sistemlerinin en önemli kısıtı, Türk fındık çeşitlerinin uzun zuruflu yapısıdır. Uzun zuruf, emme sırasında fındıkla birlikte büyük miktarda yaprak, dal parçası ve toprak materyalinin sisteme girmesine neden olmakta; bu durum ayırma ve separasyon ünitelerinin etkinliğini düşürmektedir. Ayrıca, zuruflu fındıkların düzensiz ve tanımlanması güç geometrik yapısı, elek ve hava akımı esaslı ayırma sistemlerinin verimli çalışmasını sınırlandırmaktadır. Sonuç olarak, pnömatik hasat sonrası elde edilen ürünün temizliği yetersiz kalmakta ve ilave işleme ihtiyacı doğmaktadır. Bahçe

zemin koşulları da pnömatik hasadın teknik performansını doğrudan etkilemektedir. Eğimli, taşlı ve düzensiz zeminlerde emme ağzının yüzeye tam olarak temas edememesi, ürün kayıplarının artmasına ve makine veriminin düşmesine yol açmaktadır. Yetersiz zemin hazırlığı yapılan bahçelerde, emme sırasında yoğun miktarda toprak ve tozun sisteme girmesi; hortum, aspiratör ve vantilatörlerde tıkanma, aşınma ve bakım ihtiyacını artırmaktadır. Bu durum, makinenin çalışma sürekliliğini olumsuz etkilemekte ve arıza riskini yükseltmektedir. Ekonomik açıdan bakıldığında, pnömatik hasat makinelerinin ilk yatırım maliyetleri, özellikle küçük ve parçalı işletmeler için önemli bir engel oluşturmaktadır. Makinenin ekonomik olarak kullanılabilmesi için belirli bir yıllık çalışma süresine ve yeterli bahçe büyüklüğüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak Türkiye’de fındık işletmelerinin büyük bölümünün küçük ölçekli ve parçalı yapıda olması, bu makinelerin amortisman süresini uzatmakta ve birim alan başına düşen hasat maliyetini artırmaktadır.

Bunun yanı sıra, pnömatik sistemlerin yüksek enerji gereksinimi de önemli bir ekonomik sınırlılık olarak öne çıkmaktadır. Güçlü aspiratör ve vantilatörlerin sürekli çalışması, yakıt tüketimini artırmakta; bu durum hasat maliyetlerinin yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca, yoğun bakım-onarım gereksinimi, yedek parça temini ve işçilik giderleri de toplam işletme maliyetleri içerisinde dikkate değer bir pay oluşturmaktadır. Pnömatik etkili fındık toplama makineleri kullanılarak uygulanan farklı hasat yöntemlerinin performans göstergeleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Pnömatik etkili fındık toplama makineleri kullanılarak uygulanan farklı hasat yöntemlerinin performans göstergeleri

Yöntem	Toplama Kapasitesi (kg/h)	Alan İş Başarısı (ha/h)	Toplama Etkinliği (%)	Yakıt Tüketimi (L/h)	İş Gücü Gereksinimi (h/ha)
El Tipi Hortumlu Vakum	250–400	0.02–0.04	60–75	2.0–3.5	80–120
Traktör PTO’lu Vakum Toplayıcı	400–700	0.04–0.08	65–80	3.0–4.5	60–90
Vakum + Mekanik Ön Ayırmalı	500–900	0.05–0.10	70–85	3.5–5.0	50–80
Çift Hortumlu Vakum Sistemleri	600–1000	0.06–0.12	70–85	4.0–6.0	45–70
Vakum + Namlu Destekli Sistem	700–1200	0.08–0.15	75–90	4.5–6.5	40–65
Kendi Yürür Pnömatik Toplayıcı	900–1500	0.10–0.20	80–90	6.0–9.0	30–50

Tablo 2’de görüldüğü üzere, pnömatik hasat sistemlerinde toplama kapasitesi ve alan iş başarısı, aspirasyon gücü ve zemin hazırlığı düzeyi ile doğrudan ilişkilidir. El tipi ve PTO’lu vakum sistemleri düşük yatırım maliyeti

avantajına sahip olmakla birlikte, yüksek yabancı madde oranı ve sınırlı alan iş başarısı nedeniyle büyük alanlarda ekonomik etkinlikleri düşmektedir. Namı diğer destekli ve ön ayırmalı pnömatik sistemler daha dengeli bir performans sunmakta; ancak uzun zuruflu yerli çeşitler ve düzensiz bahçe zeminleri, pnömatik hasadın Türkiye koşullarındaki en önemli teknik sınırlılığı olarak öne çıkmaktadır.

4.2.2. Mekanik Hasat

Mekanik hasat sistemleri, uygun bahçe ve zemin koşullarında yüksek toplama etkinliği sağlayabilmesine rağmen, Türkiye’de fındık üretiminin yapısal ve çevresel özellikleri nedeniyle yaygın bir uygulama alanı bulamamıştır. Bu durum, teknik ve ekonomik sınırlılıkların birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Teknik açıdan en önemli kısıt, Türkiye’de fındık yetiştiriciliğinin büyük ölçüde eğimli, parçalı ve düzensiz arazi yapısına sahip alanlarda gerçekleştirilmesidir. Mekanik toplama makinelerinin çoğu, düzgün ve geniş bahçe zeminlerinde etkin çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Eğimli ve taşlı arazilerde makinenin stabilitesi azalmakta, toplama ünitesinin zeminle temas sürekliliği bozulmakta ve ürün kayıpları artmaktadır. Ayrıca, bu koşullarda makinenin güvenli çalıştırılması güçleşmekte ve operatör açısından riskler ortaya çıkmaktadır. Bahçe yapısı ve dikim sistemi de mekanik hasadın etkinliğini sınırlayan diğer önemli faktörlerdir. Türkiye’de yaygın olarak uygulanan ocak sistemi, çok gövdeli bitki yapısı ve düzensiz dikim aralıkları, mekanik toplama makinelerinin bahçe içerisinde rahat hareket etmesini engellemektedir. Özellikle büyük boyutlu makinelerde, sıra aralarının yetersiz olması ve bitki taçlarının makine geçişine izin vermemesi önemli bir teknik engel oluşturmaktadır. Küçük ve kompakt makinelerde ise kapasite ve iş başarısı sınırlı kalmaktadır. Zemin koşulları bakımından, yeterli tesviye ve sıkıştırma yapılmamış bahçelerde mekanik hasat makinelerinin toplama verimi düşmektedir. Yabancı ot yoğunluğu ve yüzey düzensizlikleri, mekanik toplama elemanlarının fındıkları etkin biçimde almasını zorlaştırmakta; bu durum, hasat sonrası elle toplama ihtiyacını artırarak mekanizasyonun sağladığı avantajları azaltmaktadır. Mekanik etkili fındık toplama makineleri kullanılarak uygulanan farklı hasat yöntemlerinin performans göstergeleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Mekanik etkili fındık toplama makineleri kullanılarak uygulanan farklı hasat yöntemlerinin performans göstergeleri

Mekanik Hasat Yöntemi	Toplama Kapasitesi (kg/h)	Alan İş Başarısı (ha/h)	Toplama Etkinliği (%)	Yakıt Tüketimi (L/h)	İş Gücü Gereksinimi (h/ha)
Süpürücü + Toplayıcı Sistem	800–1500	0.10–0.25	75–90	3.0–5.0	20–40

Parmaklı Tamburlu Toplayıcı	1000–2000	0.15–0.30	80–95	4.0–6.0	15–35
Zincirli Tamburlu Toplayıcı	700–1400	0.10–0.20	70–85	3.5–5.5	25–45
Kombine Mekanik (Süpürme + Tambur)	1200–2200	0.20–0.35	85–95	4.5–6.5	15–30
Traktör Arkası Mekanik Toplayıcı	900–1600	0.12–0.25	80–90	3.0–5.5	20–40
Kendi Yürür Mekanik Hasat Makinası	1500–3000	0.25–0.40	90–97	6.0–9.0	10–25

Tablo 3’de görüldüğü üzere, mekanik hasat sistemlerinde performans büyük ölçüde zemin hazırlığı ve bahçe altyapısına bağlıdır. Parmaklı ve kombine sistemler en yüksek toplama etkinliği ve alan iş başarısını sağlar-ken, yüksek tesviye ve sıkıştırma gereksinimi nedeniyle Türkiye’nin eğimli ve düzensiz bahçelerinde sınırlı kullanım alanına sahiptir. Traktör arkası ve süpürücü destekli sistemler ise nispeten daha düşük yatırım maliyetiyle, uygun şekilde hazırlanmış bahçelerde uygulanabilir ara çözümler olarak öne çıkmaktadır.

Mekanik hasat makinelerinin yüksek ilk yatırım maliyeti, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için önemli bir engel teşkil etmektedir. Türkiye’de fındık işletmelerinin büyük bölümünün küçük, parçalı ve dağınık yapıda olması, makinenin yıllık kullanım süresini sınırlamakta; bu da amortisman giderlerinin birim alan başına düşen maliyetini artırmaktadır. Sonuç olarak, mekanik hasadın ekonomik olarak cazip hale gelebilmesi için gereken ölçek koşulları çoğu işletmede sağlanamamaktadır. Buna ek olarak, mekanik hasat makinelerinin bakım-onarım giderleri, yedek parça temini ve işletme sırasında ortaya çıkan yakıt tüketimi de toplam hasat maliyetlerini yükselten unsurlar arasında yer almaktadır. Hasat döneminin kısa olması, makine yatırımının geri dönüş süresini uzatmakta ve üreticinin mekanik hasada yönelik istekliliğini azaltmaktadır.

Mekanik hasat sistemleri Türkiye koşullarında teknik olarak uygulanabilir olmakla birlikte, arazi topoğrafyası, bahçe yapısı, dikim sistemi ve işletme ölçeği gibi faktörler nedeniyle ekonomik ve teknik açıdan önemli sınırlılıklar taşımaktadır. Bu nedenle mekanik hasadın yaygınlaştırılabilmesi, yalnızca makine teminiyle değil; bahçe tesis tekniklerinin iyileştirilmesi, zemin hazırlığının standardize edilmesi ve işletme ölçeğini dikkate alan destekleme politikalarının geliştirilmesiyle mümkün olabilecektir.

5. Hasat Yöntemlerinin Karşılaştırması

Pnömatik ve mekanik hasat sistemleri, fındık üretiminde iş gücü gereksinimini azaltmayı ve hasat süresini kısaltmayı hedefleyen iki temel mekanizasyon yaklaşımıdır. Ancak bu sistemler, çalışma prensipleri, bahçe ve ürün

uyumu ile ekonomik etkinlikleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Fındık hasadında kullanılan elle, pnömatik ve mekanik yöntemlerin performans karşılaştırması Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Fındık hasadında kullanılan elle, pnömatik ve mekanik yöntemlerin performans karşılaştırması

Performans Göstergesi	Elle Hasat	Pnömatik Hasat	Mekanik Hasat
Toplama kapasitesi (kg/h)	5–12	250–1500	700–3000
Alan iş başarısı (ha/h)	0.001–0.006	0.02–0.20	0.10–0.40
Toplama etkinliği (%)	90–100	60–90	70–97
İş gücü gereksinimi (h/ha)	180–360	30–120	10–45
Yakıt tüketimi (L/h)	–	2.0–9.0	3.0–9.0
Yabancı madde oranı	Çok düşük	Yüksek	Orta–Düşük
Ek temizleme ihtiyacı	Yok	Yüksek	Düşük–Orta
Hasat süresi	Çok uzun	Orta	Kısa
İlk yatırım maliyeti	Yok	Düşük–Orta	Orta–Yüksek
Birim ürün maliyeti	Çok yüksek	Orta–Yüksek	Düşük–Orta
Bahçe uygunluğu	Tüm bahçeler	Sınırlı	Uygun bahçeler
Uzun vadeli sürdürülebilirlik	Düşük	Orta	Yüksek

Tablo 4’de görüldüğü gibi, hasat yöntemleri arasında verimlilik, iş gücü gereksinimi ve sürdürülebilirlik açısından belirgin farklılıklar bulunduğunu ortaya koymaktadır. Hasat teknolojisi geliştikçe, toplama kapasitesi ve alan iş başarısı artmakta, buna karşılık birim alan başına iş gücü ihtiyacı ve hasat süresi önemli ölçüde azalmaktadır.

Elle hasatta toplama kapasitesi 5–12 kg/h ve alan iş başarısı 0.001–0.006 ha/h ile oldukça sınırlıdır. Bu durum, hasat süresinin uzamasına ve işçilik maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Pnömatik hasat sistemleri, kapasiteyi 250–1500 kg/h seviyesine çıkararak elle hasada göre yaklaşık 30–60 kat verim artışı sağlamaktadır. Mekanik hasat yöntemleri ise 700–3000 kg/h kapasite ve 0.10–0.30 ha/h alan iş başarısı ile en yüksek operasyonel performansı sunmaktadır.

Elle hasatta toplama etkinliği %90–100 gibi yüksek değerlere ulaşmakta ve yabancı madde oranı çok düşük seviyelerde kalmaktadır. Ancak pnömatik hasatta aspirasyon prensibine bağlı olarak yabancı madde oranı yükselmekte ve ek temizleme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Mekanik hasat sistemleri, pnömatik yöntemlere kıyasla daha düşük yabancı madde oranı ve daha sınırlı ek temizleme gereksinimi ile kalite–verim dengesini daha iyi sağlamaktadır.

Elle hasatta iş gücü gereksinimi 180–360 h/ha gibi çok yüksek değerlere ulaşmakta ve bu durum birim ürün maliyetini “çok yüksek” seviyeye taşımaktadır. Pnömatik hasatta iş gücü gereksinimi 30–120 h/ha düzeyine düşerken, mekanik hasatta bu değer 10–45 h/ha seviyesine kadar gerilemektedir. Her ne kadar mekanik sistemlerde yakıt tüketimi bulunsun da, yüksek alan iş başarısı sayesinde birim alan ve birim ürün başına maliyetler en düşük seviyede gerçekleşmektedir.

Tüm bu sonuçlar göstermiştir ki, Türkiye fındık üretiminde teknolojik ilerlemeyle birlikte hasat verimliliğinin önemli ölçüde arttığını ve mekanik hasadın, uygun bahçe koşulları sağlandığında, en rasyonel ve sürdürülebilir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Pnömatik hasat yöntemleri, elle hasada kıyasla önemli avantajlar sunmakta ancak ürün temizliği ve ek işlem ihtiyacı açısından sınırlılıklar taşımaktadır. Bu bağlamda, hasat yöntemi seçimi; işletme ölçeği, bahçe yapısı, işçilik maliyetleri ve uzun vadeli üretim hedefleri birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır.

6. Sonuç

Türkiye, dünya fındık üretiminde sahip olduğu ekolojik avantajlar, üretim alanı büyüklüğü ve toplam üretim miktarı bakımından lider konumda olmasına rağmen, hasat aşamasında mekanizasyon düzeyinin yetersizliği nedeniyle yüksek üretim maliyetleri ve yoğun iş gücü gereksinimi ile karşı karşıyadır. Özellikle hasat işleminin, toplam iş gücü kullanımının yaklaşık %70’ini ve üretim maliyetlerinin %50–60’ını oluşturması, fındık üretiminde hasat mekanizasyonunun stratejik bir zorunluluk olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye koşullarında uygulanan fındık hasat yöntemleri; bahçe yapısı, zemin hazırlığı, iş gücü gereksinimi, toplama kapasitesi, alan iş başarısı, yakıt tüketimi ve ekonomik etkinlik kriterleri açısından bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, geleneksel elle hasat yöntemlerinin yüksek toplama etkinliği ve ürün kalitesi sağlamasına karşın, son derece düşük alan iş başarısı ve yüksek iş gücü gereksinimi nedeniyle ekonomik sürdürülebilirliğinin giderek azaldığını göstermektedir. Özellikle artan işçilik maliyetleri ve mevsimlik işçi teminindeki güçlükler, elle hasadın uzun vadede uygulanabilirliğini ciddi biçimde sınırlandırmaktadır.

Pnömatik hasat sistemleri, elle hasada kıyasla iş gücü gereksinimini önemli ölçüde azaltmakta ve hasat süresini kısaltmaktadır. Ancak Türk fındık çeşitlerinin uzun zuruflu yapısı, düzensiz bahçe zeminleri ve aspirasyon prensibine bağlı olarak sisteme giren yabancı madde miktarının yüksek olması, bu yöntemlerin toplama etkinliğini ve ürün temizleme performansını sınırlamaktadır. Bu durum, pnömatik hasat sonrası ek temizleme ihtiyacını artırarak, sistemin toplam maliyet ve verim avantajını azaltmaktadır.

Mekanik hasat sistemleri, uygun bahçe ve zemin koşullarında en yüksek toplama kapasitesi, alan iş başarısı ve en düşük birim iş gücü gereksinimini sunarak, hasat verimliliği açısından en üstün yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, Türkiye’de fındık üretiminin büyük ölçüde eğimli, parçalı ve ocak tipi dikim sistemine sahip alanlarda yapılması, mekanik hasadın yaygınlaşmasını sınırlandıran temel yapısal faktörlerdir. Yüksek ilk yatırım maliyetleri, kısa hasat dönemi ve sınırlı yıllık kullanım süresi de mekanik hasat makinelerinin ekonomik cazibesini azaltan unsurlar arasında yer almaktadır.

Çalışma sonuçları, fındık hasadında mekanizasyonun başarısının yalnızca makine teknolojisine değil; bahçe tesis tekniği, zemin hazırlığı, dikim sistemi ve işletme ölçeğini kapsayan üretim sisteminin bütününe bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Mekanik hasadın etkin ve ekonomik biçimde uygulanabilmesi için, mekanizasyona uygun bahçe tesislerinin yaygınlaştırılması, zemin hazırlığının standart hale getirilmesi ve Türkiye koşullarına özgü, yerli fındık çeşitleriyle uyumlu hasat makinelerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye’de fındık hasadında mekanizasyon düzeyinin artırılması; hasat maliyetlerinin düşürülmesi, iş gücüne olan bağımlılığın azaltılması, hasat süresinin kısaltılması ve üretimde sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kaçınılmaz bir gerekliliktir. Üniversite–sanayi–kamu iş birliği ile yürütülecek Ar-Ge çalışmaları, üreticiye yönelik eğitim ve yayım faaliyetleri ile destek politikalarının bütüncül biçimde uygulanması halinde, Türkiye’nin bahçe yapısına ve fındık çeşitlerine uygun mekanik hasat sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması mümkün olacaktır. Bu gelişmeler, Türkiye’nin dünya fındık piyasalarındaki rekabet gücünü uzun vadede önemli ölçüde artıracaktır.

7. Öneriler

Türkiye’de fındık hasadında mekanizasyonun etkin bir şekilde uygulanabilmesi ve yaygınlaştırılabilmesi için teknik, yapısal ve sosyo-ekonomik boyutları kapsayan bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu kapsamda, aşağıda sunulan öneriler ve geleceğe yönelik araştırma başlıkları, fındık hasat sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilecek temel alanları ortaya koymaktadır. Öncelikle, fındık bahçelerinde mekanik hasada uygun dikim sistemlerinin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Geleneksel ocak tipi dikim sistemine alternatif olarak, sıra tipi veya modifiye edilmiş ocak sistemlerinin mekanik hasat makineleriyle uyumu araştırılmalı ve bu sistemlerin uzun dönemli verim, maliyet ve kalite üzerindeki etkileri ortaya konulmalıdır. Yeni tesis edilecek bahçelerde, mekanizasyona uygun dikim aralıkları ve bitki formunun teşvik edilmesi önem arz etmektedir. Bahçe zemin hazırlığı ve yüzey özelliklerinin mekanik hasat performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmelidir. Farklı zemin hazırlığı yöntemlerinin (biçme, tesviye, sıkıştır-

ma, malç uygulamaları vb.) toplama etkinliği, ürün kaybı ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin deneysel çalışmalarla ortaya konulması, uygulayıcılara yol gösterici olacaktır.

Mekanik hasat makinelerinin tasarımına yönelik olarak, Türkiye’de yaygın yetiştirilen uzun zuruflu fındık çeşitlerine uygun toplama ve ayırma sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, mekanik ve pnömatik sistemlerin birlikte kullanıldığı hibrit çözümler, yabancı madde ayrıştırma etkinliğini artıracak yeni seperasyon mekanizmaları ve ürün kayıplarını azaltmaya yönelik yenilikçi tasarımlar ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, ergonomi, iş güvenliği ve kullanıcı konforunu önceleyen tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi önemlidir. Mekanik hasat sistemlerinin enerji tüketimi, alan iş başarısı ve ekonomik fizibilitesi ayrıntılı olarak analiz edilmelidir. Farklı hasat yöntemlerinin yaşam döngüsü maliyeti ve çevresel etkilerinin karşılaştırılması, sürdürülebilir mekanizasyon stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, sayısal modelleme, CFD-DEM tabanlı simülasyonlar ve karar destek sistemleri gibi mühendislik araçlarının daha yaygın kullanılması önerilmektedir.

Son olarak, fındık hasadında mekanizasyonun yaygınlaştırılabilmesi için üretici eğitimi, yayım faaliyetleri ve destek politikaları büyük önem taşımaktadır. Üniversite-sanayi-kamu iş birliği ile yürütülecek Ar-Ge projeleri, yerli makine üretiminin teşvik edilmesi ve üreticilerin yeni teknolojilere adaptasyonunu kolaylaştıracak eğitim programları, mekanizasyon düzeyinin artırılmasında belirleyici olacaktır. Bu doğrultuda yapılacak çalışmalar, Türkiye’nin fındık üretiminde verimlilik, kalite ve rekabet gücünü sürdürülebilir biçimde artırmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

Bernardi, B., Stillitano, T., Luca, A., Abenavoli, L., Zimbalatti, G., Benalia, S., & Tous, J. (2017). The assessment of hazelnut mechanical harvesting productivity. doi.org/10.15159/ar.17.042

Beyhan, M. A. (1992). Fındık yetiştiriciliğinde hasat zamanı ve hasat yöntemlerinin ürün kalitesi üzerine etkileri. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 7(2), 45–56.

Beyhan, M. A., Yıldız, T. (1996). Fındık hasadında mekanizasyon olanakları ve uygulama sorunları. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 2(1), 23–31.

Bozoğlu, M. (1999). Fındık üretiminde girdi kullanımı ve maliyet yapısı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

FAO. (2011). Hazelnut production statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat>. (Erişim tarihi; Aralık 2025)

FAO. (2023). Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat> (Erişim tarihi; Aralık 2025)

FAO. (2024). Nuts and dried fruits: Global production and trade review. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat>. (Erişim tarihi; Aralık 2025)

Fridley, R. B., & Adrian, P. A. (1959). Mechanical harvesting of nuts. Agricultural Engineering, 40(5), 262–266.

Ghiotti, G. (1989). Development of a mechanical nut harvester for sloping orchards. Journal of Agricultural Engineering Research, 44, 157–165.

İlkyaz, S. (1986). Türkiye’de fındık üretiminde iş gücü kullanımı ve maliyet analizi. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Yayınları, Ankara.

Kılıç, O. (1997). Karadeniz Bölgesi’nde fındık tarımı ve verim sorunları. Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları, Trabzon.

Okay, Y., Özdemir, G., Korkmaz, A. (1986). Doğu Karadeniz Bölgesi’nde fındık yetiştiriciliğinin ekolojik sınırları. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 17(3–4), 89–101.

Özbek, S. (1978). Fındık yetiştiriciliği. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara.

Park, R. D., Fairbank, D. C. (1948). Vacuum-type nut harvesters. Agricultural Engineering, 29(4), 179–183.

Peterson, D. L., & Monroe, G. E. (1977). Evaluation of a mechanical nut

harvester. Transactions of the ASAE, 20(5), 845–849.

Sauk, H., & Beyhan, M. (2024). The Effect of Different Orchard Ground Conditions on the Performance of A Mechanical Hazelnut Harvesting Machine. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*. doi.org/10.7161/omuana-jas.1443157

Sauk, H., Beyhan, M. (2024). Comparison of Product Losses and Foreign Material Separation Efficiencies of Hazelnut Harvesting Machines under Different Orchard Yield Conditions. *Turkish Journal of Food and Agriculture Sciences*. doi.org/10.53663/turjfas.1432844

Sauk, H., Beyhan, M., Uğurlutepe, K. (2023). Technical and Economic Examination of The Mechanical Hazelnut Collecting Machine Manufacturing. *Black Sea Journal of Agriculture*. doi.org/10.47115/bsagriculture.1301657

Sauk, H., Beyhan, M. (2024). Comparison of Performance Characteristics of Different Types of Hazelnut Harvesting Machines. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*. doi.org/10.24180/ijaws.1421481

Tous, J., Romero, A., Plana, J. (1994). Harvesting systems for nut crops. *Acta Horticulturae*, 373, 251–260. doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.373.30

Whitney, J. D., Sumner, H. R., Churchill, D. B. (1966). Mechanical nut harvesting research. Transactions of the ASAE, 9(3), 341–345.



**MİKROALGAL BİYOKÜTLEDEN
BİYOHİDROJEN ÜRETİMİ:
MEKANİZMALAR,
TEKNOLOJİLER VE
SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ
POTANSİYELİ**

“ ”

F. Özge UYSAL¹

Önder UYSAL²

1 Dr. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye. zm.ozgeuysal@gmail.com ORCID iD: 0000-0001-7764-7580

2 Doç. Dr. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye. onderuysal@isparta.edu.tr ORCID iD: 0000-0002-8019-5260

GİRİŞ

1.HİDROJEN EKONOMİSİ VE MİKROALGLERİN YERİ

Dünya nüfusunun artışı, sanayileşmenin hızlanması ve yaşam standartlarının yükselmesi, küresel ölçekte enerji talebini sürekli artırmaktadır. Günümüzde bu talebin büyük bir bölümü hâlâ fosil yakıtlardan karşılanmakta olup, bu durum hem sınırlı doğal kaynakların hızla tükenmesine hem de iklim değişikliği, hava kirliliği ve ekosistem bozulmaları gibi ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Özellikle karbon temelli enerji sistemlerinin neden olduğu sera gazı emisyonları, sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişi yalnızca bir tercih olmaktan çıkarıp zorunluluk hâline getirmiştir. Bu bağlamda hidrojen, son yıllarda “geleceğin enerji taşıyıcısı” olarak öne çıkmaktadır. Hidrojenin yanma veya elektrokimyasal dönüşüm sonucunda yalnızca su açığa çıkarması, onu çevresel açıdan son derece cazip bir seçenek hâline getirmektedir. Ayrıca yüksek özgül enerji içeriği ($\approx 120 \text{ MJ kg}^{-1}$) sayesinde, hidrojen enerji yoğunluğu açısından birçok geleneksel yakıtın önüne geçmektedir. Ancak hidrojen birincil bir enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısıdır; dolayısıyla sürdürülebilirliği, nasıl üretildiğine doğrudan bağlıdır.

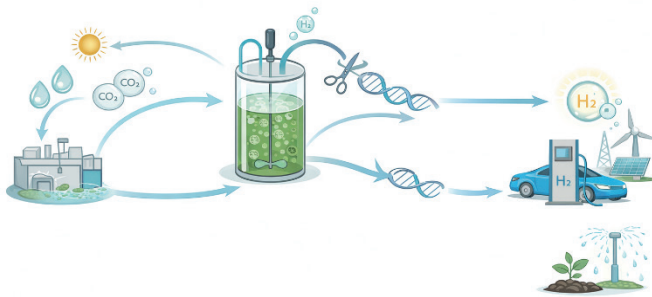
Günümüzde endüstriyel hidrojen üretiminin büyük kısmı doğal gazın buharla reformasyonu (steam methane reforming, SMR) gibi fosil yakıt temelli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler yüksek verime sahip olsa da önemli miktarda CO_2 salınımına neden olmakta ve hidrojenin “yeşil” kimliğiyle çelişmektedir. Su elektrolizi gibi daha temiz alternatifler ise yüksek enerji maliyetleri ve elektrik kaynağının çoğu zaman fosil kökenli olması nedeniyle sınırlı bir sürdürülebilirlik sunmaktadır. Bu nedenle, düşük karbon ayak izine sahip, yenilenebilir kaynaklara dayalı hidrojen üretim teknolojilerine yönelik ilgi giderek artmaktadır. Bu noktada biyohidrojen üretimi, hidrojen ekonomisinin sürdürülebilir bir bileşeni olarak dikkat çekmektedir. Biyohidrojen; mikroorganizmalar tarafından, genellikle biyokimyasal veya biyofotokimyasal süreçler aracılığıyla üretilen hidrojeni ifade eder. Bakteriler, siyanobakteriler ve mikroalgler bu alandaki başlıca biyolojik üreticiler arasında yer almaktadır. Özellikle mikroalgler, sahip oldukları fotosentetik mekanizmalar sayesinde güneş enerjisini doğrudan kimyasal enerjiye dönüştürebilmeleri bakımından benzersiz bir konuma sahiptir.

Mikroalglerin hidrojen ekonomisindeki potansiyeli, birkaç temel avantaja dayanmaktadır. Öncelikle mikroalgler, fotosentez yoluyla suyu ve karbondioksiti kullanarak enerji depolayabilen mikroorganizmalardır. Bu süreçte açığa çıkan elektronlar, uygun metabolik koşullar altında hidrojenaz enzimleri aracılığıyla moleküler hidrojen (H_2) üretiminde kullanılabilir. Böylece mikroalgler, teorik olarak güneş enerjisini

doğrudan hidrojen gazına dönüştürebilen biyolojik sistemler olarak değerlendirilmektedir.

Buna ek olarak mikroalglerin tarımsal üretimle rekabet etmeyen alanlarda yetiştirilebilmesi, tuzlu su veya atıksu gibi alternatif su kaynaklarını kullanabilmesi ve yüksek büyüme hızlarına sahip olması, onları biyohidrojen üretimi açısından sürdürülebilir bir biyokütle kaynağı hâline getirmektedir. Mikroalg bazlı sistemlerin atıksu arıtımı, CO₂ yakalama ve yan ürün olarak değerli biyokütle eldesi gibi çoklu faydalar sunması, hidrojen ekonomisinin döngüsel ekonomi ilkeleriyle bütünleştirilmesine de olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, mikroalg biyokütleden biyohidrojen üretimi hâlen önemli bilimsel ve teknolojik zorluklar içermektedir. Özellikle hidrojenaz enzimlerinin oksijene karşı yüksek hassasiyeti, fotosentetik süreçlerle hidrojen üretiminin eş zamanlı yürütülmesini sınırlandırmaktadır. Ayrıca mevcut sistemlerde elde edilen hidrojen verimleri, endüstriyel ölçekte rekabet edebilir düzeyin altında kalmaktadır. Bu durum, mikroalg bazlı biyohidrojen üretimini kısa vadede fosil yakıt temelli hidrojenin yerine geçecek bir çözüm olmaktan ziyade, uzun vadeli ve entegre enerji sistemlerinin stratejik bir bileşeni olarak konumlandırmaktadır.

Sonuç olarak mikroalgler, hidrojen ekonomisinin biyolojik ayağında özgün ve umut vadeden bir rol üstlenmektedir. Güneş enerjisi, su ve karbondioksit gibi bol ve yenilenebilir girdileri kullanarak hidrojen üretebilme potansiyelleri, mikroalgleri sürdürülebilir enerji araştırmalarının merkezine taşımaktadır. Mikroalg biyokütleden biyohidrojen üretimi, tek başına bir çözüm olmasa da, geleceğin düşük karbonlu enerji sistemlerinde biyoteknoloji, tarım, çevre ve enerji sektörlerini bir araya getiren bütüncül yaklaşımların önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Döngüsel Biyokonomi Kapsamında Mikroalg Tabanlı Biyohidrojen Üretimi

2. MİKROALGAL BİYOKÜTLELERİN BİYOHİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİ

Mikroalgler, fotosentetik yetenekleri, hızlı büyüme hızları ve metabolik esneklikleri sayesinde biyohidrojen üretimi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle ökaryotik yeşil algler (Chlorophyta), oksijenik fotosentez mekanizmaları ile hidrojen üretim yollarını aynı hücresel sistem içerisinde barındırmaları nedeniyle biyohidrojen araştırmalarında öne çıkmaktadır (Becker, 1994; Raven vd., 2013). Mikroalglerin biyohidrojen üretim kapasitesi, onların doğal fizyolojik özelliklerinin insan enerji gereksinimleri doğrultusunda yeniden değerlendirilmesine dayanmaktadır.

2.1. Mikroalglerin Genel Fizyolojisi: Yeşil Algler

Yeşil algler, ökaryotik hücre yapısına sahip olup kloroplastlarında klorofil *a* ve *b* içeren fotosentetik mikroorganizmalardır (Raven vd., 2013). Fotosentez süreci kloroplastlarda gerçekleşir ve fotosistem I (PSI) ile fotosistem II (PSII) olmak üzere iki temel ışık reaksiyonu kompleksini içerir (Blankenship, 2014). PSII’de suyun fotolizi sonucu moleküler oksijen (O_2), protonlar ve elektronlar açığa çıkar; bu elektronlar elektron taşıma zinciri boyunca ilerleyerek PSI’ye ulaşır ve normal koşullarda $NADP^{+}$ ’ın indirgenmesiyle NADPH oluşumunda kullanılır (Taiz vd., 2015). Ancak mikroalglerin fotosentetik elektron akışı, çevresel koşullara bağlı olarak farklı metabolik yollara yönlendirilebilir. Özellikle oksijenin sınırlandığı veya besin kısıtlamasının uygulandığı koşullarda, PSI’den çıkan elektronlar NADPH üretimi yerine ferredoksin aracılığıyla hidrojenaz enzimlerine aktarılabilir (Ghirardi vd., 2000; Melis ve Happe, 2001). Bu süreç sonucunda protonlar moleküler hidrojene (H_2) indirgenir ve biyohidrojen üretimi gerçekleşir. Bu durum, mikroalglerde hidrojen üretiminin özel bir metabolik amaçtan ziyade alternatif bir elektron tüketim yolu olduğunu göstermektedir (Ghirardi vd., 2009).

2.2. Model Organizma Olarak *Chlamydomonas reinhardtii*

Mikroalglerden biyohidrojen üretimi çalışmalarında en yaygın kullanılan model tür *Chlamydomonas reinhardtii*’dir. Bu tek hücreli tatlı su yeşil alg, genomunun tamamen dizilenmiş olması ve genetik manipülasyona yüksek derecede uygun yapısı sayesinde fotosentez ve hidrojen metabolizması çalışmalarında referans organizma hâline gelmiştir (Merchant vd., 2007). *Chlamydomonas reinhardtii*, normal aerobik fotosentetik koşullar altında hidrojen üretmez. Ancak sülfür kısıtlaması gibi stres koşullarında PSII aktivitesi baskılanır, oksijen üretimi azalır ve hücre içi ortam giderek anaerobik hâle gelir (Melis vd., 2000). Bu koşullar altında oksijene duyarlı [FeFe]-hidrojenaz enzimleri aktif hâle gelir ve fotosentetik elektronlar ferredoksin aracılığıyla bu enzimlere yönlendirilerek H_2 üretimi gerçekleşir (Happe ve Naber, 1993; Melis ve Happe, 2001). Bu süreç, alg hücresi açısından bir enerji üretim stratejisinden ziyade hücresel redoks dengesini korumaya

yönelik geçici bir metabolik adaptasyon olarak değerlendirilmektedir (Ghirardi vd., 2009). Dolayısıyla hidrojen üretimi mikroalg için bir yan ürün niteliği taşıırken, insan açısından hedeflenen ana enerji ürünü konumundadır.

2.3. Mikroalgler ve Siyanobakteriler Arasındaki Temel Farklar

Biyohidrojen literatüründe mikroalgler ile siyanobakteriler sıklıkla birlikte ele alınsa da, bu iki grup biyolojik açıdan temelden farklıdır. Mikroalgler ökaryotik organizmalar iken, siyanobakteriler prokaryotik yapıya sahiptir (Madigan vd., 2018). Mikroalglerde fotosentez kloroplastlarda gerçekleşirken, siyanobakterilerde fotosentetik sistemler sitoplazmik tilakoid membranlar üzerinde yer alır. Hidrojen üretimi açısından en önemli fark, kullanılan enzim sistemleridir. Yeşil alglerde biyohidrojen üretimi esas olarak [FeFe]-hidrojenaz enzimleri aracılığıyla gerçekleşirken, siyanobakterilerde hidrojen üretimi çoğunlukla nitrogenaz enzimi ile ilişkilidir (Tamagnini vd., 2002). Nitrogenaz enzimi, atmosferik azotun (N_2) amonyağa indirgenmesini katalizlerken hidrojen üretimini kaçınılmaz bir yan ürün olarak ortaya çıkar (Dixon ve Kahn, 2004).

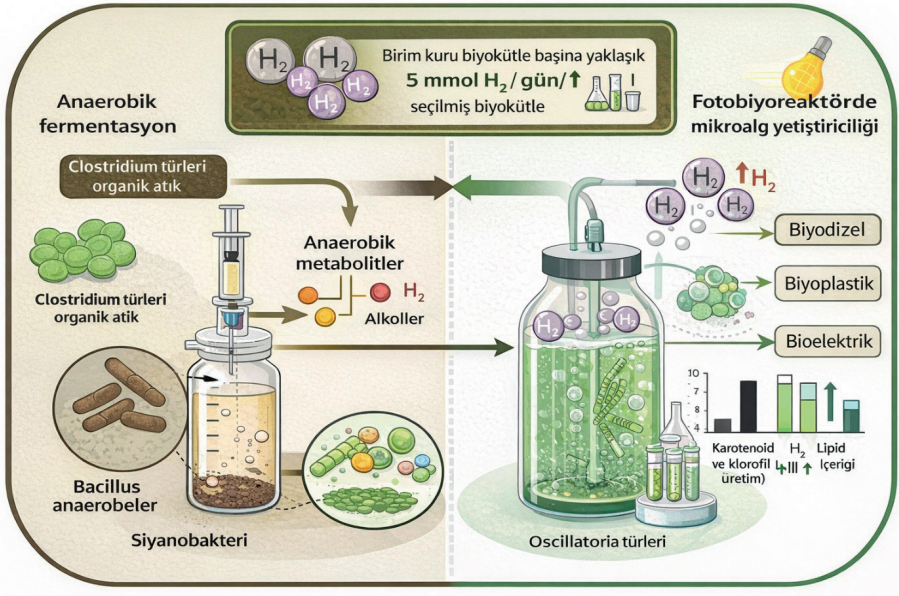
2.4. Hidrojen Üretiminde Rol Alan Temel Enzimler

[FeFe]-Hidrojenaz

[FeFe]-hidrojenazlar, yeşil alglerde biyohidrojen üretiminden sorumlu anahtar enzimlerdir ve indirgenmiş ferredoksininden aldıkları elektronlarla protonları moleküler hidrojene dönüştürürler (Peters vd., 1998). Bu enzimler son derece yüksek katalitik aktiviteye sahip olmalarına karşın, oksijene karşı aşırı hassastır ve çok düşük oksijen konsantrasyonlarında dahi aktivitelerini hızla kaybedebilirler (Stripp ve Happe, 2009; Lubitz vd., 2014). Bu durum, fotosentetik oksijen üretimi ile hidrojen üretimi arasındaki temel biyokimyasal çelişkiyi ortaya koymaktadır.

Nitrogenaz (Siyanobakteriler İçin)

Nitrogenaz enzimi, yüksek ATP gereksinimi olan ve yalnızca anaerobik koşullarda çalışabilen bir enzimdir (Burgess ve Lowe, 1996). Siyanobakterilerde hidrojen üretimi, azot fiksasyonu sürecine bağlı olarak gerçekleşir ve hidrojen, bu reaksiyonun zorunlu bir yan ürünü olarak ortaya çıkar (Tamagnini vd., 2002). Ancak yüksek enerji maliyeti ve düşük hidrojen verimi nedeniyle nitrogenaz temelli sistemler, mikroalg bazlı hidrojen üretimine kıyasla daha sınırlı bir uygulama potansiyeline sahiptir. Biyohidrojen üretiminin sürdürülebilirliği, bu sürecin yalnızca enerji üretimi değil, aynı zamanda atıksu arıtımı, besin geri kazanımı ve yan ürün oluşumu ile birlikte ele alınmasına bağlıdır. Bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen entegre sistemlerde, farklı biyolojik ve elektrokimyasal süreçler ardışık veya paralel olarak işletilebilmektedir. Mikroalg ve siyanobakteri temelli biyohidrojen üretim yollarının bu kapsamda nasıl bütünleştirilebileceği Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Mikroalg ve siyanobakteri temelli biyohidrojen üretim yollarının entegre ve hibrit sistemler kapsamında şematik gösterimi

3. BİYOHİDROJEN ÜRETİM MEKANİZMALARI

Mikroalglerden biyohidrojen üretimi, fotosentetik ve metabolik süreçlerin yönlendirilmesine dayanan farklı biyolojik mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu mekanizmalar genel olarak direkt biyofotoliz, indirekt biyofotoliz ve karanlık fermentasyon olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir. Her bir mekanizma, hidrojen üretim yolu, enerji verimliliği, proses karmaşıklığı ve ölçeklenebilirlik açısından kendine özgü avantajlar ve sınırlılıklar barındırmaktadır (Ghirardi vd., 2009).

3.1. Direkt Biyofotoliz

Direkt biyofotoliz, mikroalglerin fotosentetik sistemleri aracılığıyla suyun doğrudan parçalanması ve eş zamanlı olarak hidrojen üretimi esasına dayanmaktadır. Bu mekanizmada fotosistem II (PSII), ışık enerjisi yardımıyla su moleküllerini parçalayarak elektronlar, protonlar ve moleküler oksijen (O_2) üretir (Blankenship, 2014). Açığa çıkan elektronlar fotosentetik elektron taşıma zinciri üzerinden fotosistem I'e (PSI) aktarılır ve buradan ferredoksin aracılığıyla [FeFe]-hidrojenaz enzimine yönlendirilir. Hidrojenaz enzimi, protonları moleküler hidrojene (H_2) indirger (Melis ve Happe, 2001). Bu mekanizma teorik olarak oldukça caziptir; çünkü yalnızca güneş enerjisi ve su kullanılarak hidrojen üretimi mümkün görünmektedir. Teorik enerji dönüşüm veriminin yüksek olduğu hesaplanmıştır (Kruse vd., 2005). Ancak

pratik uygulamalarda direkt biyofotolizin karşılaştığı en büyük engel, hidrojenaz enzimlerinin oksijene karşı aşırı hassas olmasıdır. Fotosentez sırasında PSII tarafından üretilen oksijen, hidrojenaz aktivitesini çok düşük konsantrasyonlarda dahi geri dönüşümsüz biçimde baskılamaktadır (Stripp ve Happe, 2009). Bu durum, fotosentetik oksijen üretimi ile hidrojen üretimi arasında temel bir biyokimyasal çelişki yaratmaktadır. Sonuç olarak direkt biyofotoliz, yüksek teorik potansiyeline rağmen günümüzde düşük pratik hidrojen verimleri ile sınırlı kalmaktadır (Ghirardi vd., 2009).

3.2. İndirekt Biyofotoliz

İndirekt biyofotoliz, direkt biyofotolizin oksijen problemine çözüm olarak geliştirilmiş iki aşamalı bir yaklaşımdır. Bu sistemde fotosentez ve hidrojen üretimi zamansal olarak ayrıştırılır (Melis vd., 2000). Birinci aşamada mikroalgler, normal fotosentetik koşullar altında büyür ve karbon fiksasyonu yoluyla karbonhidratlar (özellikle nişasta) depolar. Bu aşamada oksijen üretimi gerçekleşir, ancak hidrojen üretimi söz konusu değildir. İkinci aşamada ise çevresel koşullar (çoğunlukla sülfür kısıtlaması) değiştirilerek PSII aktivitesi baskılanır ve oksijen üretimi büyük ölçüde durdurulur (Melis vd., 2000).

Sülfür kısıtlaması stratejisi, özellikle *Chlamydomonas reinhardtii* üzerinde geliştirilen ve literatürde “klasik Melis yaklaşımı” olarak bilinen yöntemdir. Sülfür eksikliği, PSII’nin onarım döngüsünü yavaşlatarak oksijen evrim hızını düşürür ve hücre içi ortamın anaerobik hâle gelmesini sağlar (Melis ve Happe, 2001). Bu anaerobik koşullarda [FeFe]-hidrojenaz enzimleri aktifleşir ve birinci aşamada depolanan karbonhidratlardan elde edilen indirgenmiş eş taşıyıcılar kullanılarak H_2 üretimi gerçekleşir (Ghirardi vd., 2000). İndirekt biyofotoliz, direkt biyofotolize kıyasla daha yüksek ve daha kararlı hidrojen üretim oranları sağlayabilmektedir. Ancak sistemin iki aşamalı olması, proses kontrolünü karmaşıktırmakta ve sürekli üretim yerine yarı-kesikli (batch) sistemleri zorunlu kılmaktadır (Ghirardi vd., 2009).

3.3. Karanlık Fermantasyon (Dark Fermentation)

Karanlık fermantasyon, fotosenteze dayanmayan ve tamamen anaerobik metabolik süreçler aracılığıyla hidrojen üretimini esas alan bir mekanizmadır. Bu yöntemde mikroalgler ışığa ihtiyaç duymadan, daha önce depoladıkları karbonhidratları (nişasta, glikojen vb.) parçalayarak hidrojen üretirler (Kapdan ve Kargi, 2006). Karanlık fermantasyon sürecinde hidrojen üretimi, pirüvatın indirgenmesi ve ferredoksin aracılı elektron transferi yoluyla gerçekleşir. Bu süreçte hidrojen üretimi, organik asitler (asetat, bütirat vb.) gibi yan ürünlerin oluşumu ile birlikte yürütülür (Hallenbeck ve Benemann, 2002). Mikroalglerde karanlık fermantasyon kapasitesi sınırlı olmakla birlikte, süreç bakteriyel sistemlere kıyasla daha düşük hidrojen verimleri

sunmaktadır. Bununla birlikte karanlık fermentasyonun en önemli avantajı, oksijen hassasiyetinin ortadan kalkması ve proses koşullarının görece kolay kontrol edilebilmesidir. Ayrıca ışık gereksinimi olmadığı için reaktör tasarımı ve enerji girdileri açısından daha esnek bir yapı sunar (Kapdan ve Kargi, 2006).

Mekanizmaların Karşılaştırılması: Avantajlar ve Dezavantajlar

Direkt biyofotoliz, en basit teorik sistem olmasına rağmen oksijen hassasiyeti nedeniyle pratik uygulamalarda sınırlıdır. İndirekt biyofotoliz, daha yüksek hidrojen verimleri sağlamakla birlikte iki aşamalı yapısı nedeniyle süreç karmaşıklığı ve süreksizlik problemi taşımaktadır. Karanlık fermentasyon ise düşük hidrojen verimine rağmen proses kontrolünün kolaylığı ve oksijen probleminden bağımsız olması nedeniyle özellikle entegre biyokütle değerlendirme sistemlerinde tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir (Ghirardi vd., 2009; Kapdan ve Kargi, 2006). Bu nedenle güncel araştırmalar, bu mekanizmaların tek başına optimize edilmesinden ziyade, hibrit ve entegre sistemler geliştirilmesine odaklanmaktadır.

4. KÜLTİVASYON VE PROSES PARAMETRELERİ

Mikroalglerden biyohidrojen üretiminin başarısı, yalnızca biyokimyasal mekanizmalara değil; aynı zamanda kültivasyon koşullarının ve proses parametrelerinin doğru şekilde yönetilmesine bağlıdır. Işık, karbon kaynağı, besin elementleri, pH, sıcaklık ve çözünmüş oksijen gibi çevresel faktörler, fotosentetik elektron akışını ve dolayısıyla hidrojen üretim verimini doğrudan etkilemektedir (Ghirardi vd., 2009). Bu parametrelerin optimizasyonu, mikroalglerin doğal metabolik sınırlarını zorlayarak biyohidrojen üretimini artırmanın temel yoludur.

4.1. Işık Şiddeti ve Spektrumu

Işık, fotosentetik mikroorganizmalar için temel enerji kaynağıdır ve biyohidrojen üretiminde belirleyici bir rol oynar. Düşük ışık şiddetleri fotosentetik aktiviteyi sınırlandırırken, aşırı yüksek ışık şiddetleri fotoinhibisyona yol açarak fotosistem II (PSII) hasarına neden olabilmektedir (Blankenship, 2014). Bu durum, hidrojen üretiminde kullanılabilecek elektron akışını olumsuz etkiler. Işık spektrumu da en az şiddet kadar önemlidir. Yeşil algler, özellikle mavi (≈ 450 nm) ve kırmızı (≈ 680 nm) dalga boylarında yüksek fotosentetik aktivite göstermektedir. Son yıllarda LED tabanlı sistemler kullanılarak ışık spektrumunun kontrol edilmesi, fotosentetik verim ve hidrojen üretimi açısından önemli avantajlar sağlamıştır (Sforza vd., 2012).

4.2. Karbon Kaynağı ve Atıksu Entegrasyonu

Mikroalg kültivasyonunda karbon kaynağı genellikle CO_2 formunda sağlanmakta olup, bu durum mikroalg sistemlerini potansiyel bir karbon

yakalama teknolojisi hâline getirmektedir (Chisti, 2007). Bununla birlikte, endüstriyel ve tarımsal atıksular mikroalgler için yalnızca karbon değil; aynı zamanda azot, fosfor ve iz elementler açısından da zengin bir besin kaynağı sunmaktadır. Tarımsal ve endüstriyel atıksuların mikroalg kültivasyonunda kullanılması, biyohidrojen üretimini çok fonksiyonlu bir çevresel teknolojiye dönüştürmektedir. Bu entegrasyon sayesinde hem atıksu arıtımı sağlanmakta hem de hidrojen üretimi için gerekli biyokütle düşük maliyetle elde edilebilmektedir (Pittman vd., 2011). Bu bağlamda, Uysal ve Ekinci (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışma, mikroalglerin tarımsal kökenli atıksularla başarılı bir şekilde kültive edilebileceğini ve bu sistemlerin biyokütle üretimi açısından önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Söz konusu çalışmada, atıksu ortamının mikroalg büyümesini desteklediği ve besin elementi geri kazanımı açısından çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığı gösterilmiştir. Bu tür entegre sistemler, biyohidrojen üretimi için gerekli olan karbonhidrat rezervlerinin oluşturulmasında stratejik bir avantaj sunmaktadır.

4.3. pH, Sıcaklık ve Çözünmüş Oksijen

pH, mikroalg hücre içi enzimatik aktiviteler üzerinde doğrudan etkili olup, çoğu yeşil alg türü için optimum pH aralığı 6.5–8.0 arasında değişmektedir (Becker, 1994). pH değişimleri, karbon türleşmesini ve CO₂ biyoyararlanımını da etkilemektedir. Sıcaklık, fotosentetik reaksiyon hızlarını belirleyen bir diğer kritik parametredir. Çoğu mikroalg türü için optimum sıcaklık aralığı 20–30 °C olup, bu sınırların dışına çıkılması biyokütle üretimi ve hidrojen veriminde düşüşe neden olmaktadır (Ras vd., 2013). Çözünmüş oksijen (DO) seviyesi, biyohidrojen üretimi açısından özel bir öneme sahiptir. Hidrojenaz enzimlerinin oksijen hassasiyeti nedeniyle, hidrojen üretimi genellikle düşük DO koşullarında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, kültivasyon ve hidrojen üretim aşamalarında oksijen seviyesinin kontrollü olarak düşürülmesi gerekmektedir (Stripp ve Happe, 2009).

4.4. Besin Elementi Kısıtlaması: Sülfür, Azot ve Fosfor

Besin elementi kısıtlaması, mikroalglerde biyohidrojen üretimini tetikleyen en etkili stratejilerden biridir. Özellikle sülfür kısıtlaması, Chlamydomonas reinhardtii üzerinde yapılan çalışmalarda PSII aktivitesini baskılayarak oksijen üretimini azaltmakta ve anaerobik koşulların oluşmasını sağlamaktadır (Melis vd., 2000).

Azot ve fosfor kısıtlaması da hücresel metabolizmayı değiştirerek karbonhidrat birikimini teşvik edebilmekte, bu durum dolaylı olarak hidrojen üretim potansiyelini artırmaktadır (Markou vd., 2014). Ancak aşırı besin kısıtlaması, biyokütle üretimini sınırlandırabileceğinden dikkatli bir optimizasyon gerektirmektedir.

4.5. Fotobiyoreaktör Tasarımları

Açık Sistemler: Açık sistemler (yarış yolu havuzları gibi), düşük yatırım maliyetleri ve büyük hacimlerde üretim avantajı sunmaktadır. Ancak ışık dağılımının kontrol edilememesi, kontaminasyon riski ve gaz transferinin sınırlı olması gibi dezavantajlar, biyohidrojen üretimi açısından bu sistemlerin kullanımını kısıtlamaktadır (Chisti, 2007).

Kapalı Sistemler (Tübüler ve Flat-Panel): Kapalı fotobiyoreaktörler, ışık, gaz transferi ve sterilite açısından yüksek kontrol imkânı sunmaktadır. Tübüler ve flat-panel reaktörler, biyohidrojen üretimi için gerekli olan düşük oksijen koşullarının sağlanmasında daha etkilidir. Bununla birlikte, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri bu sistemlerin en önemli sınırlayıcı faktörüdür (Posten, 2009).

Tarımsal ve Endüstriyel Atıksularla Entegre Sistemlerin Önemi

Mikroalg tabanlı biyohidrojen üretiminin sürdürülebilirliği, bu sistemlerin tek amaçlı enerji üretiminden ziyade atıksu arıtımı-biyokütle üretimi-enerji geri kazanımı üçgeninde değerlendirilmesine bağlıdır. Tarımsal ve endüstriyel atıksularla entegre edilen mikroalg sistemleri, hem çevresel yükü azaltmakta hem de biyokütle üretimi için gerekli girdileri düşük maliyetle sağlamaktadır (Uysal ve Ekinci, 2021; Pittman vd., 2011). Bu yönüyle mikroalg bazlı biyohidrojen üretimi, döngüsel biyokonomi yaklaşımının güçlü bir örneğini oluşturmaktadır.

5. GENETİK VE BİYOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR

Mikroalglerden biyohidrojen üretiminin mevcut sınırları, büyük ölçüde biyolojik sistemlerin doğal evrimsel kısıtları ile ilişkilidir. Güncel araştırmalar, bu sınırları aşabilmek amacıyla genetik mühendisliği, metabolik mühendislik ve sentetik biyoloji temelli yaklaşımlara yönelmektedir. Ancak bu yaklaşımların başarısı, mikroalglerin doğal fizyolojisinin ve evrimsel önceliklerinin doğru anlaşılmasına bağlıdır (Ghirardi vd., 2009).

Bu bağlamda temel gerçek şudur:

Sorun biyolojide değil, evrimdedir; mikroalgler hidrojen üretmek için değil, hayatta kalmak için evrilmiştir. Dolayısıyla genetik ve biyoteknolojik müdahaleler, alglerin doğal metabolik sınırlarını tamamen ortadan kaldırmaktan ziyade, bu sınırları kontrollü biçimde yeniden yönlendirmeyi hedeflemelidir.

5.1. Oksijen Toleranslı Hidrojenaz Geliştirme

Mikroalg bazlı biyohidrojen üretiminin önündeki en temel engel, [FeFe]-hidrojenaz enzimlerinin oksijene karşı aşırı hassasiyetidir. Fotosistem II tarafından üretilen moleküler oksijen, hidrojenaz enzimlerinin aktif merkezini hızla inaktive etmekte ve hidrojen üretimini durdurmaktadır

(Stripp ve Happe, 2009). Bu sorunu aşmaya yönelik genetik yaklaşımlar, oksijen toleranslı hidrojenaz varyantlarının geliştirilmesine odaklanmıştır. Bazı bakteriyel sistemlerde bulunan [NiFe]-hidrojenazların oksijene karşı daha dayanıklı olması, bu enzimlerin alg sistemlerine transfer edilmesi fikrini gündeme getirmiştir (Lubitz vd., 2014). Ancak bakteriyel hidrojenazların alg kloroplastlarında işlevsel olarak ifade edilmesi, kofaktör montajı ve elektron transfer uyumu gibi nedenlerle önemli teknik zorluklar içermektedir (Peters vd., 2015). Bu nedenle güncel çalışmalar, tamamen yeni bir hidrojenaz tasarlamaktan ziyade, mevcut [FeFe]-hidrojenazların oksijen hassasiyetini azaltmaya yönelik nokta mutasyonları ve protein mühendisliği yaklaşımlarına yönelmiştir (Khanna vd., 2017). Bununla birlikte, oksijen toleransının artırılması çoğu zaman katalitik aktivitenin düşmesiyle sonuçlanmakta, bu da hidrojen üretiminde yeni bir denge problemi ortaya çıkarmaktadır.

5.2. Metabolik Yolak Optimizasyonu

Hidrojen üretim kapasitesini artırmaya yönelik bir diğer strateji, mikroalg hücrelerindeki rekabetçi metabolik yolların baskılanması ve elektron akışının hidrojenaz yönüne kaydırılmasıdır. Normal fotosentetik koşullarda indirgenmiş ferredoksin ve NADPH, başta Calvin döngüsü olmak üzere biyokütle sentezinde kullanılmaktadır. Hidrojen üretimi, bu ana metabolik yollarla rekabet hâlinindedir (Melis, 2012). Metabolik mühendislik çalışmaları, karbon fiksasyonu, nişasta sentezi veya solunum gibi yolların kısmen baskılanarak elektronların hidrojen üretimine yönlendirilmesini hedeflemektedir. Örneğin *Chlamydomonas reinhardtii*'de nişasta metabolizmasının modifiye edilmesi, hidrojen üretim süresini ve miktarını artırabilmektedir (Posewitz vd., 2004). Ancak bu tür müdahaleler, çoğu zaman hücresel büyüme hızının düşmesi ve stres toleransının azalması gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu durum, mikroalglerin hidrojen üretimini evrimsel olarak “öncelikli bir hedef” olarak görmediğinin açık bir göstergesidir.

5.3. CRISPR/Cas Uygulamaları: Potansiyel ve Sınırlar

Son yıllarda CRISPR/Cas tabanlı gen düzenleme teknolojilerinin mikroalg sistemlerine uyarlanması, biyohidrojen araştırmaları için yeni olanaklar sunmuştur. CRISPR/Cas9 ve CRISPR/Cas12a sistemleri, *Chlamydomonas reinhardtii* başta olmak üzere çeşitli mikroalg türlerinde başarılı şekilde uygulanmıştır (Shin vd., 2016; Baek vd., 2016). Bu teknoloji sayesinde hidrojenaz ekspresyonunun artırılması, oksijen üreten yolların baskılanması veya rekabetçi metabolik yolların düzenlenmesi mümkün hâle gelmiştir. Ancak CRISPR/Cas uygulamalarının mikroalglerde hâlen sınırlı verimlilik, hedef dışı mutasyon riski ve uzun vadeli genetik stabilite sorunları taşıdığı da göz ardı edilmemelidir (Nymark vd., 2016). Bu nedenle CRISPR/Cas teknolojisi, biyohidrojen üretiminde kısa vadeli bir “devrim aracı”

olmaktan ziyade, uzun vadeli ve dikkatli optimizasyon gerektiren bir araç olarak değerlendirilmelidir.

5.4. Sentetik Biyoloji Perspektifi

Sentetik biyoloji, biyolojik sistemlerin modüler ve mühendislik temelli bir yaklaşımla yeniden tasarlanmasını hedeflemektedir. Mikroalg bazlı biyohidrojen üretiminde sentetik biyoloji yaklaşımları, fotosentetik elektron akışının yeniden düzenlenmesi, yapay metabolik devrelerin oluşturulması ve hidrojen üretiminin hücresel büyümeden kısmen ayrıştırılması gibi stratejileri içermektedir (Eriksen, 2008). Ancak sentetik biyoloji uygulamalarının mikroalglerde karşılaştığı temel zorluk, bu organizmaların karmaşık hücresel yapıları ve çok katmanlı düzenleyici ağlarıdır. Bakteriye sistemlerde nispeten kolay uygulanabilen sentetik devreler, mikroalglerde öngörülemeyen metabolik geri beslemelerle karşılaşabilmektedir (Scaife vd., 2015). Bu durum, mikroalglerin “yeniden programlanabilir biyoreaktörler” olarak değil, evrimsel geçmişi olan canlı sistemler olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Evrimsel Gerçeklik ve Gelecek Perspektifi

Mikroalgler, milyarlarca yıllık evrimsel süreç boyunca enerji verimliliği, stres toleransı ve üreme başarısı için seçilmiş organizmalardır. Hidrojen üretimi, bu evrimsel süreçte yalnızca geçici bir metabolik yan yol olarak şekillenmiştir. Dolayısıyla biyohidrojen üretimindeki temel sınırlayıcı faktör, genetik araçların yetersizliği değil; mikroalglerin evrimsel öncelikleridir (Ghirardi vd., 2009). Bu gerçekliği ışığında, genetik ve biyoteknolojik yaklaşımların amacı mikroalgleri “hidrojen fabrikalarına” dönüştürmekten ziyade, onların doğal metabolik esnekliğini kontrollü, entegre ve sürdürülebilir sistemler içinde değerlendirmek olmalıdır. Bu yaklaşım, biyohidrojen üretimini tek başına bir hedef olmaktan çıkararak, atıksu arıtımı, karbon yakalama ve biyokütle üretimi ile bütünleşmiş hibrit sistemlerin bir bileşeni hâline getirmektedir.

6. VERİM, ENERJİ DENGESİ VE TEKNO-EKONOMİK DEĞERLENDİRME

Mikroalglerden biyohidrojen üretiminin laboratuvar ölçeğindeki biyolojik başarısı, bu teknolojinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği açısından tek başına yeterli değildir. Bir biyohidrojen sisteminin sürdürülebilirliği; elde edilen hidrojen verimi, enerji dönüşüm etkinliği ve toplam sistem maliyetlerinin bütüncül olarak değerlendirilmesine bağlıdır. Bu nedenle verim, enerji dengesi ve tekno-ekonomik analizler, mikroalg bazlı biyohidrojen üretiminin gerçekçi potansiyelini ortaya koyan kritik araçlardır (Ghirardi vd., 2009).

6.1. Biyohidrojen Verimleri ve Ölçütler

Mikroalglerden biyohidrojen üretiminde verim, farklı çalışmalarda farklı metriklerle ifade edilmektedir. En yaygın kullanılan göstergeler arasında hacimsel hidrojen üretim hızı ($\text{mL H}_2 \text{ L}^{-1} \text{ gün}^{-1}$), biyokütle başına hidrojen üretimi ($\text{mL H}_2 \text{ g}^{-1}$ biyokütle) ve fotosentetik enerji dönüşüm verimi yer almaktadır (Hallenbeck ve Benemann, 2002). Literatürde *Chlamydomonas reinhardtii* gibi model türler kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda, indirekt biyofotoliz koşulları altında hidrojen üretim hızlarının genellikle 10–100 $\text{mL H}_2 \text{ L}^{-1} \text{ gün}^{-1}$ aralığında kaldığı rapor edilmektedir (Melis vd., 2000; Ghirardi vd., 2009). Bu değerler, teorik hesaplamalarla öngörülen maksimum verimlerin oldukça altındadır. Bu durum, biyohidrojen üretiminin temel sınırlayıcı faktörünün yalnızca fotosentetik kapasite değil; metabolik yönlendirme, enzim aktivitesi ve proses sürekliliği olduğunu göstermektedir.

6.2. Enerji Dönüşüm Verimi ve Enerji Dengesi

Enerji dönüşüm verimi, güneş enerjisinin moleküler hidrojenin kimyasal enerjisine dönüştürülme oranı olarak tanımlanabilir. Teorik olarak fotosentetik organizmalar için güneşten hidrojene dönüşüm veriminin %10'un üzerine çıkabileceği öngörülmektedir. Ancak pratik uygulamalarda mikroalg bazlı sistemlerde bu değer çoğunlukla %1'in altında kalmaktadır (Kruse vd., 2005). Enerji dengesi analizlerinde yalnızca hidrojen üretimi değil; kültivasyon, karıştırma, gaz ayırma, sıcaklık kontrolü ve fotobiyoreaktör işletimi için harcanan enerji de dikkate alınmalıdır. Birçok çalışmada, özellikle kapalı fotobiyoreaktör sistemlerinde enerji girdilerinin, üretilen hidrojenin enerji içeriğine yaklaştığı veya bazı durumlarda bunu aştığı rapor edilmiştir (Posten, 2009). Bu nedenle mikroalg bazlı biyohidrojen üretimi, tek başına bir enerji üretim teknolojisi olarak değil; atıksu arıtımı ve karbon yakalama gibi ek fonksiyonlarla birlikte değerlendirildiğinde daha dengeli bir enerji bilançosu sunmaktadır (Pittman vd., 2011).

6.3. Ölçeklenebilirlik Sorunları

Laboratuvar ölçeğinde başarıyla gerçekleştirilen biyohidrojen üretimi, ölçek büyütüldüğünde ciddi mühendislik sorunlarıyla karşılaşmaktadır. Işık penetrasyonunun sınırlanması, gaz transfer dirençleri, oksijen birikimi ve biyokütle homojenliğinin sağlanması, büyük hacimli sistemlerde verimi düşüren başlıca faktörlerdir (Chisti, 2007). Ayrıca hidrojenin düşük yoğunluklu ve patlayıcı bir gaz olması, gaz toplama ve depolama sistemlerinin güvenlik açısından dikkatle tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, sistem maliyetlerini artıran ek bir mühendislik yükü oluşturmaktadır (Hallenbeck ve Benemann, 2002).

6.4. Tekno-Ekonomik Değerlendirme (TEA)

Tekno-ekonomik analizler, mikroalg bazlı biyohidrojen üretiminin mevcut koşullarda fosil yakıt temelli hidrojen veya elektroliz bazlı yeşil hidrojen ile rekabet edemediğini göstermektedir. Yüksek yatırım maliyetleri (CAPEX), özellikle fotobiyoreaktör sistemlerinde başlıca ekonomik engel olarak öne çıkmaktadır (Posten, 2009). Bununla birlikte işletme maliyetleri (OPEX) açısından en önemli kalemler; enerji girdileri, besin temini ve sistem bakım-onarımıdır. Bu noktada tarımsal ve endüstriyel atıksuların kullanımı, hem besin maliyetlerini düşürmekte hem de arıtma hizmeti sunarak dolaylı ekonomik kazançlar sağlamaktadır (Pittman vd., 2011; Gül vd., 2021). Bu nedenle güncel ekonomik yaklaşımlar, biyohidrojenin tek başına satılan bir ürün olmaktan ziyade; atıksu arıtımı + biyokütle + enerji geri kazanımı içeren çok çıktılı sistemlerin bir parçası olarak değerlendirilmesini önermektedir (Ghirardi vd., 2009).

6.5. Endüstriyel Uygulamalara Geçiş Perspektifi

Mevcut verim ve maliyet düzeyleri dikkate alındığında, mikroalglerden biyohidrojen üretiminin kısa vadede büyük ölçekli enerji piyasalarında yer alması beklenmemektedir. Ancak bu teknolojinin, düşük karbonlu enerji sistemlerinde niş ve tamamlayıcı bir rol üstlenmesi mümkündür. Özellikle tarımsal ve endüstriyel atıksularla entegre edilen, yerinde (on-site) hidrojen üretimi yapan sistemler; enerji geri kazanımı, karbon ayak izi azaltımı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Gül vd., 2021). Bu yaklaşım, biyohidrojen üretimini “rekabet eden bir yakıt” olmaktan çıkararak, döngüsel biyokütle içinde işlevsel bir süreç hâline getirmektedir.

7. ÇEVRESEL ETKİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Mikroalglerden biyohidrojen üretimi, yalnızca alternatif bir enerji teknolojisi olarak değil; çevresel sürdürülebilirlik, kaynak verimliliği ve döngüsel biyokütle bağlamında da değerlendirilmesi gereken çok boyutlu bir yaklaşımdır. Bu sistemlerin çevresel etkisi, hidrojen üretim sürecinin ötesinde; karbon yakalama, atıksu arıtımı ve biyokütle geri kazanımı gibi ek fonksiyonlarla birlikte ele alındığında anlam kazanmaktadır (Ghirardi vd., 2009).

7.1. Karbon Ayak İzi ve İklim Değişikliği Bağlamı

Mikroalgler, fotosentez yoluyla atmosferik veya baca gazı kaynaklı CO₂'yi biyokütleyle dönüştürebilen organizmalardır. Bu özellikleri, mikroalg bazlı sistemleri potansiyel bir biyolojik karbon yakalama ve kullanım (CCU) teknolojisi hâline getirmektedir (Chisti, 2007). Biyohidrojen üretimi sırasında açığa çıkan hidrojenin yanma veya yakıt hücrelerinde kullanımı sonucunda yalnızca su oluşması, sürecin doğrudan karbon emisyonu içermemesini

sağlamaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) çalışmalarında, mikroalg tabanlı enerji sistemlerinin çevresel performansının büyük ölçüde proses entegrasyonuna bağlı olduğu gösterilmiştir. Özellikle atıksu arıtımı ve besin geri kazanımı ile entegre edilen sistemlerin, tek amaçlı üretim sistemlerine kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olduğu rapor edilmektedir (Pittman vd., 2011).

7.2. Su Kullanımı ve Atıksu Geri Kazanımı

Enerji üretim teknolojilerinin sürdürülebilirliğinde su kullanımı giderek daha kritik bir parametre hâline gelmektedir. Mikroalg sistemleri, tatlı suya bağımlı olmayan; tuzlu su, deniz suyu ve özellikle tarımsal veya endüstriyel atıksularla çalışabilen esnek yapıları sayesinde bu açıdan önemli bir avantaj sunmaktadır (Markou ve Georgakakis, 2011). Tarımsal ve endüstriyel atıksularla entegre edilen mikroalg kültürasyon sistemleri, azot ve fosfor gibi besin elementlerinin geri kazanılmasını sağlarken, aynı zamanda ötrofikasyon riskini azaltmaktadır. Bu yaklaşım, biyohidrojen üretimini klasik bir enerji prosesi olmaktan çıkararak çevresel hizmet sunan bir teknolojiye dönüştürmektedir (Gül vd., 2021).

7.3. Döngüsel Biyokonomi Perspektifi

Mikroalg bazlı biyohidrojen üretimi, döngüsel biyokonomi ilkeleriyle yüksek düzeyde uyumludur. Atıksuların besin kaynağı olarak kullanılması, karbonun biyokütledetutulması ve hidrojen üretimi sonrası kalan biyokütlenin biyogübre, biyoyakıt veya biyokömür gibi ürünlere dönüştürülebilmesi, bu sistemleri çok çıktılı (multi-output) süreçler hâline getirmektedir (Markou vd., 2014). Bu bağlamda biyohidrojen, tek başına ekonomik rekabet gücü sınırlı bir ürün olmaktan ziyade; entegre sistemler içinde katma değer yaratan bir enerji taşıyıcısı olarak konumlanmaktadır. Bu yaklaşım, mikroalg tabanlı teknolojilerin tarım, çevre ve enerji sektörleri arasında köprü kurmasını mümkün kılmaktadır.

7.4. Gelecek Perspektifi ve Araştırma Öncelikleri

Mevcut bilimsel ve teknolojik veriler ışığında, mikroalglerden biyohidrojen üretiminin kısa vadede fosil yakıt temelli hidrojenin veya elektroliz bazlı yeşil hidrojenin yerini alması beklenmemektedir. Ancak bu durum, teknolojinin stratejik önemini azaltmamaktadır. Aksine, mikroalg bazlı biyokütleden biyohidrojen sistemleri; yerel, küçük ölçekli ve entegre uygulamalarda anlamlı bir rol üstlenme potansiyeline sahiptir (Ghirardi vd., 2009).

Gelecekteki araştırmaların şu başlıklara odaklanması kritik görünmektedir:

- biyolojik verim sınırlarının gerçekçi biçimde belirlenmesi,

- atıksu-enerji entegrasyonunun optimize edilmesi,
- yaşam döngüsü ve tekno-ekonomik analizlerin standartlaştırılması ve
- biyohidrojenin diğer biyoyakıt ve biyomalzeme üretim süreçleriyle birlikte değerlendirilmesi.

7.5. Genel Değerlendirme

Mikroalglerden biyohidrojen üretimi, tek başına bir “mucize çözüm” değildir. Ancak doğru bağlamda ele alındığında, sürdürülebilir enerji sistemlerinin önemli bir tamamlayıcısı olma potansiyeline sahiptir. Bu teknolojinin gerçek gücü, mikroalglerin doğasında var olan fotosentetik esneklik ile insanın mühendislik ve sistem entegrasyonu becerisinin buluştuğu noktada ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak mikroalg bazlı biyohidrojen üretimi, enerji, çevre ve tarım alanlarını bir araya getiren bütüncül yaklaşımlar içinde değerlendirildiğinde; düşük karbonlu, kaynak verimli ve sürdürülebilir bir gelecek için anlamlı bir seçenek sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Baek, K., Yu, J., Jeong, J., Sim, S. J., ve Jin, E. (2016). DNA-free two-gene knockout in *Chlamydomonas reinhardtii* via CRISPR-Cas9 ribonucleoproteins. *Scientific Reports*, 6, 30620.
- Becker, E. W. (1994). *Microalgae: Biotechnology and microbiology*. Cambridge University Press.
- Blankenship, R. E. (2014). *Molecular mechanisms of photosynthesis* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Burgess, B. K., ve Lowe, D. J. (1996). Mechanism of molybdenum nitrogenase. *Chemical Reviews*, 96(7), 2983–3012. <https://doi.org/10.1021/cr950055x>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
- Dixon, R., ve Kahn, D. (2004). Genetic regulation of biological nitrogen fixation. *Nature Reviews Microbiology*, 2(8), 621–631. <https://doi.org/10.1038/nrmicro954>
- Eriksen, N. T. (2008). The technology of microalgal culturing. *Biotechnology Letters*, 30, 1525–1536.
- Ghirardi, M. L., Dubini, A., Yu, J., ve Maness, P. C. (2009). Photobiological hydrogen-producing systems. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 52–61. <https://doi.org/10.1039/B718939K>
- Ghirardi, M. L., Zhang, L., Lee, J. W., Flynn, T., Seibert, M., Greenbaum, E., ve Melis, A. (2000). Microalgae: A green source of renewable H₂. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 84–86, 447–458.
- Hallenbeck, P. C., ve Benemann, J. R. (2002). Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(11–12), 1185–1193.
- Happe, T., ve Naber, J. D. (1993). Isolation, characterization and N-terminal amino acid sequence of hydrogenase from the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *European Journal of Biochemistry*, 214(2), 475–481.
- Kapdan, I. K., ve Kargi, F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38(5), 569–582.
- Khanna, N., Lindblad, P., ve Heidorn, T. (2017). Modifying cyanobacterial hydrogen production through genetic engineering. *Biochimica et Biophysica Acta – Bioenergetics*, 1858(4), 333–341.
- Kruse, O., Rupprecht, J., Bader, K. P., Thomas-Hall, S., Schenk, P. M., Finazzi, G., ve Hankamer, B. (2005). Improved photobiological H₂ production in engineered green algal cells. *Journal of Biological Chemistry*, 280(40), 34170–34177.
- Lubitz, W., Ogata, H., Rüdiger, O., ve Reijerse, E. (2014). Hydrogenases. *Chemical Reviews*, 114(8), 4081–4148. <https://doi.org/10.1021/cr4005814>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., ve Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.

- Markou, G., Angelidaki, I., ve Georgakakis, D. (2014). Microalgal carbohydrates: An overview of the factors influencing carbohydrates production, and of main bio-conversion technologies for production of biofuels. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(2), 563–575.
- Markou, G., ve Georgakakis, D. (2011). Cultivation of filamentous cyanobacteria (*Spirulina*) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review. *Applied Energy*, 88(10), 3389–3401.
- Melis, A., ve Happe, T. (2001). Hydrogen production. Green algae as a source of energy. *Plant Physiology*, 127(3), 740–748.
- Melis, A., Zhang, L., Forestier, M., Ghirardi, M. L., ve Seibert, M. (2000). Sustained photobiological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiology*, 122(1), 127–136.
- Merchant, S. S., vd. (2007). The *Chlamydomonas* genome reveals the evolution of key animal and plant functions. *Science*, 318(5848), 245–250. <https://doi.org/10.1126/science.1143609>
- Nymark, M., Sharma, A. K., Sparstad, T., Bones, A. M., ve Winge, P. (2016). A CRISPR/Cas9 system adapted for gene editing in marine algae. *Scientific Reports*, 6, 24951.
- Peters, J. W., Lanzilotta, W. N., Lemon, B. J., ve Seefeldt, L. C. (1998). X-ray crystal structure of the Fe-only hydrogenase. *Science*, 282(5395), 1853–1858.
- Peters, J. W., Schut, G. J., Boyd, E. S., Mulder, D. W., Shepard, E. M., Broderick, J. B., ve King, P. W. (2015). [FeFe]- and [NiFe]-hydrogenase diversity, mechanism, and maturation. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1853(6), 1350–1369.
- Pittman, J. K., Dean, A. P., ve Osundeko, O. (2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*, 102(1), 17–25.
- Posewitz, M. C., Smolinski, S. L., Kanakagiri, S. D., Melis, A., Seibert, M., ve Ghirardi, M. L. (2004). Hydrogen photoproduction is attenuated by disruption of an isoamylase gene in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Cell*, 16(8), 2151–2163.
- Posten, C. (2009). Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*, 9(3), 165–177.
- Ras, M., Steyer, J. P., ve Bernard, O. (2013). Temperature effect on microalgae: A crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 12, 153–164.
- Raven, P. H., Evert, R. F., ve Eichhorn, S. E. (2013). *Biology of plants* (8th ed.). W.H. Freeman.
- Scaife, M. A., Nguyen, G. T. D. T., Rico, J., Lambert, D., Helliwell, K. E., ve Smith, A. G. (2015). Establishing *Chlamydomonas reinhardtii* as an industrial biotechnology host. *Plant Journal*, 82(3), 532–546.
- Sforza, E., Simionato, D., Giacometti, G. M., Bertucco, A., ve Morosinotto, T. (2012).

Adjusted light and dark cycles can optimize photosynthetic efficiency in algae growing in photobioreactors. PLoS ONE, 7(6), e38975.

Shin, S. E., Lim, J. M., Koh, H. G., Kim, E. K., Kang, N. K., Jeon, S., ... Jeong, B. R. (2016). CRISPR/Cas9-induced knockout and knock-in mutations in *Chlamydomonas reinhardtii*. Scientific Reports, 6, 27810.

Stripp, S. T., ve Happe, T. (2009). How algae produce hydrogen—news from the photosynthetic hydrogenase. Dalton Transactions, 9960–9969.

Tamagnini, P., Axelsson, R., Lindberg, P., Oxelfelt, F., Wünsche, A., & Lindblad, P. (2002). Hydrogenases and hydrogen metabolism of cyanobacteria. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 66(1), 1–20. <https://doi.org/10.1128/MMBR.66.1.1-20.2002>

Taiz, L., Zeiger, E., Möller, I. M., ve Murphy, A. (2015). Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer.

Uysal, Ö., ve Ekinci, K. (2021). Treatment of rose oil processing effluent with *Chlorella* sp. using photobioreactor and raceway. Journal of Environmental Management, 295, 113089.