

TARIMSAL ÜRETİMDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE UYGULAMALAR

Editör: HAYRETTİN KARADÖL



BİDGE Yayınları

Tarımsal Üretimde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Uygulamalar

Editör: Hayrettin KARADÖL Ali AYBEK

ISBN: 978-625-8995-90-9

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-03-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Tarımsal Üretimde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Uygulamalar

Tarım sektörü, artan nüfus, iklim değişikliği ve doğal kaynakların sınırlılığı gibi küresel sorunlar karşısında dönüşüm geçirmekte ve bu dönüşümde bilimsel ile teknolojik gelişmeler belirleyici rol oynamaktadır. Günümüzde tarımsal üretimin verimliliğini artırmak, çevresel etkileri azaltmak ve kaynak kullanımını optimize etmek amacıyla disiplinler arası yaklaşımlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Bu kapsamda, modern tarım uygulamalarında dijital teknolojiler, hassas tarım yöntemleri ve yenilikçi mühendislik çözümleri ön plana çıkmaktadır. Özellikle veri temelli analizler ve görsel değerlendirme teknikleri, üretim süreçlerinin izlenmesi ve karar destek mekanizmalarının geliştirilmesinde önemli katkılar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, bitki koruma uygulamalarında kullanılan ekipmanların performansının iyileştirilmesi, uygulama etkinliğinin artırılması ve çevresel risklerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Öte yandan, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi günümüzün en kritik konularından biri haline gelmiş olup, alternatif su temin yöntemlerine yönelik araştırmalar hız kazanmıştır. Atmosferden su elde edilmesine yönelik yaklaşımlar, özellikle su kıtlığı yaşayan bölgeler için umut vadeden çözümler arasında yer almaktadır. Bu tür yenilikçi uygulamalar, tarımsal üretimin sürekliliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

Ayrıca, sürdürülebilirlik kavramı çerçevesinde tarımsal mekanizasyon teknolojileri de önemli bir gelişim göstermektedir. Enerji verimliliği yüksek, çevre dostu ve akıllı sistemlerle donatılmış mekanizasyon çözümleri, hem üretim maliyetlerinin düşürülmesine hem de doğal kaynakların korunmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, tarımda sürdürülebilir üretim anlayışının yaygınlaştırılması, geleceğin gıda güvenliği açısından kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışma ile, tarımsal üretimin farklı boyutlarına ilişkin güncel yaklaşımların bir araya getirilmesi ve okuyucuya bütüncül bir bakış açısı sunulması amaçlanmıştır. Elde edilen bilgilerin, araştırmacılara, öğrencilere ve sektör paydaşlarına katkı sağlaması beklenmektedir.

Bu eserin hazırlanmasında emeği geçen tüm yazarlara teşekkür eder, çalışmanın bilim dünyasına faydalı olmasını temenni ederiz.

İÇİNDEKİLER

ATMOSFERİK SU HASADI (ASH)	1
----------------------------------	---

SERTAN SESVEREN

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM VE TARIMSAL MEKANİZASYONDA GELİŞMELER	32
---	----

MEHMET EMİN BİLGİLİ, ALİ AYBEK

PÜLVERİZATÖR NOZUL TİPLERİ: ÇALIŞMA PRENSİPLERİ VE UYGULAMA ALANLARI	65
---	----

HAMZA KUZU, HAYRETTİN KARADÖL

TARIMSAL ÜRETİMDE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI: BİR LİTERATÜR DERLEMESİ	93
---	----

HAMZA KUZU, HAYRETTİN KARADÖL, ALİ AYBEK

BÖLÜM 1

ATMOSFERİK SU HASADI (ASW)

SERTAN SESVEREN¹

GİRİŞ

Küresel su krizi günümüzde yaklaşık 3 milyar insanı etkileyen önemli bir çevresel ve sosyo-ekonomik sorun haline gelmiştir (WHO, 2022). Bu kriz, insan faaliyetleri ile çevresel süreçlerin birleşiminden kaynaklanmaktadır. Özellikle hızlı nüfus artışı ve buna paralel olarak artan kentleşme, su talebinin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır (Mekonnen & ark., 2016). Artan su talebi, özellikle tarımsal üretim faaliyetlerinde belirgin şekilde hissedilmektedir (Alvarez & ark., 2018). Bununla birlikte, birçok ülkede su temin ve dağıtım altyapısının eski ve verimsiz olması, suyun kaynaktan kullanıcıya ulaştırılması sürecinde önemli kayıplara ve su kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi zorluğuna neden olmaktadır.

İklim değişikliği ise küresel su krizini daha da derinleştiren önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Uzayan kuraklık dönemleri, düzensiz ve öngörülemeyen yağış rejimleri ile artan

¹ Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-5163-7066

sıcaklıklar, yenilenebilir tatlı su kaynaklarının miktarını ve sürekliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır.

Dünya yüzeyinin yaklaşık %70'i su ile kaplı olmasına rağmen, bunun yalnızca yaklaşık %2,5'i tatlı sudur ve bu tatlı suyun da sadece %0,3'ü sıvı halde bulunarak doğrudan kullanılabilir durumdadır (Oki & ark., 2006). Yapılan tahminlere göre 2040 yılına gelindiğinde dünya nüfusunun yaklaşık %50'si su kıtlığı yaşayan bölgelerde yaşayacaktır. Ayrıca projeksiyonlar, küresel su kaynakları açısından oldukça endişe verici bir tablo ortaya koymaktadır. Küresel su talebinin %20–30 oranında artabileceği öngörülmektedir (Shafeian & ark., 2022) (Şekil 1). Bu artış, birçok bölgede mevcut tatlı su kaynaklarının temel ihtiyaçları karşılamak için yetersiz kalmasına ve su kaynakları açısından zengin bölgeler ile hâlihazırda ciddi su kıtlığı yaşayan bölgeler arasındaki eşitsizliklere neden olabilir [10].

Şekil 1. Dünyada 2040 yılı su stresi altında olabilecek alanlar

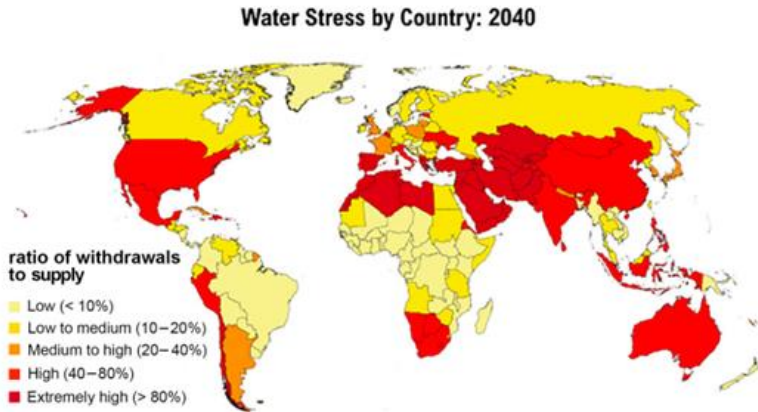


Figure 1. Forecast of water stress in 2040 [11].

Kaynak: Salehi & ark., 2020

Tüm bu gelişmeler, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için yenilikçi, alternatif ve sürdürülebilir su temin çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle son yıllarda atmosferden su elde etme teknolojileri gibi alternatif su kaynakları, su arz güvenliğinin artırılması açısından umut verici yaklaşımlar olarak değerlendirilmektedir. Ancak mevcutta, çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bunlar arasında deniz suyunun tuzdan arındırılması (desalinasyon) (Liu & ark., 2019), arıtılmış atık suların yeniden kullanımı ve yağmur suyu hasadı (Zavala & ark., 2018) yer almaktadır. Bununla birlikte, özellikle uzak veya iç bölgelerdeki coğrafi koşullar ve iklim özellikleri, ayrıca yüksek maliyet, enerji tüketimi ve ikincil çevresel kirlilik sorunları, bu teknolojilerin yaygın olarak uygulanmasını sınırlamaktadır. Bu bağlamda, atmosferik su hasadı (ASH) basitliği, hızlı su elde etme potansiyeli, görece düşük maliyeti ve kullanılan adsorban malzemelerin kolay geri dönüştürülebilir olması nedeniyle en umut verici alternatif çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu teknoloji, yarı kurak bölgelerde dahi yaygın olarak bulunan bir kaynak olan atmosferdeki nemin yakalanarak su elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Malik & ark., 2014). Gerçekten de sıklıkla göz ardı edilen bir su rezervi türü olan atmosferik su, yaklaşık olarak 12.900 trilyon litre yenilenebilir su içermekte olup bu miktar, yüzey suyu rezervlerinin yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir (Zhou & ark., 2020a). Kurak çöl koşullarında dahi havadaki nem içeriğinin 10 g/m³ düzeyine ulaşabildiği belirtilmektedir (Sleiti & ark., 2021). Bu suyun küresel ölçekte yaygın biçimde dağılmış olması, onu merkezi olmayan ve ayırım gözetmeyen bir su kaynağı hâline getirmektedir.

Atmosferik su hasadı; sis hasadı, çiy hasadı ve adsorban temelli su hasadı olmak üzere farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Sis hasadı yöntemi, sis oluşumunun yaygın olduğu dağlık ve belirli mikroiklim koşullarına sahip bölgelerde uygulanabilmektedir. Bununla birlikte, kurak dönemlerde

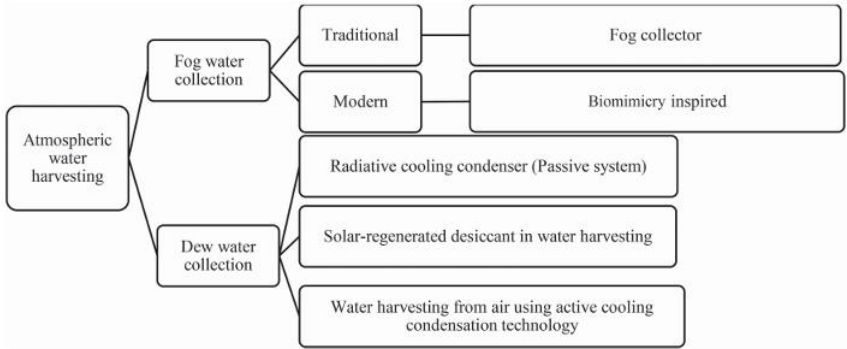
veya sis oluşumunun yetersiz olduğu durumlarda bu yöntemin etkinliği sınırlı kalabilmektedir. Benzer şekilde, çiy toplama yöntemi, günlük sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde etkili olmasına rağmen, gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkına bağımlı olduğundan bazı bölgelerde veya yaz aylarında yeterince güvenilir olmayabilir. Bu nedenlerle, Uygulanabilir bir ASH teknolojisinin temel olarak şu kriterleri karşılaması gerekmektedir:

- 1- Yüksek su toplama verimliliği,
- 2- Düşük enerji tüketimi,
- 3- Düşük maliyet,
- 4- Sistem kararlılığı ve çevresel ile iklimsel koşullardan minimum düzeyde etkilenme (Liu & ark., 2022).

1.1. Atmosferik su hasadı (ASH) teknolojilerinin sınıflandırılması

İlk olarak sis ortamından su elde edilmesi kapsam alanına girmektedir. Sis, yer yüzeyine yakın bölgelerde atmosferde asılı halde bulunan görünür su damlacıkları veya buz kristallerinden oluşan bir bulut türü olarak tanımlanmaktadır. Sis oluşumu genellikle havadaki nem miktarının artması veya ortam hava sıcaklığının düşmesi sonucu meydana gelmektedir. Sis suyu hasadı yöntemleri genel olarak geleneksel ve modern yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Şekil 2).

Şekil 2. Atmosferik su hasadı tekniklerinin sınıflandırılması



Kaynak: Jarimi & ark., 2020

İkinci toplama kategorisi ise su buharının toplanmasıdır. Sis çıplak gözle görülebilirken, su buharı görünmezdir ve sıvı suyun buharlaşması veya buzun süblimleşmesi sonucu oluşur. Atmosferde bulunan su buharı, bir yüzeyin sıcaklığı atmosferdeki su buharının çiy noktası sıcaklığının altına düştüğünde yoğunlaşarak çiy suyu oluşumuna neden olur.

Sis suyu hasadı sistemleri çoğunlukla ağ benzeri yapılara sahip kolektörler kullanılarak gerçekleştirilen geleneksel yaklaşımlarla ilişkilidir. Buna karşın, çiy suyu hasadı teknikleri ile ilgili çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Bu alandaki ilk çalışmalar, radyatif yoğunlaştırıcı (radiative condenser) kullanan pasif sistemler üzerine odaklanmıştır. Ancak bu sistemlerin düşük verimlilik göstermesi nedeniyle araştırmacılar nem adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerini artırmak amacıyla güneş enerjisi ile yenilenen desikant (kurutucu) yöntemlerini geliştirmiştir. Buna rağmen bu yöntemler tek başına yeterli performansı sağlayamamıştır. Son yıllarda gerçekleştirilen bilimsel gelişmeler, havadan nemi etkin bir şekilde yakalayabilen özel adsorban malzemelerin entegrasyonu sayesinde adsorpsiyon tekniklerinin optimize edilmesini mümkün kılmıştır. Silika jel (Davtalab & ark., 2013), zeolitler ve metal-organik iskelet yapıları (MOF'lar) (Schemenauer & Joe, 1989) gibi malzemeler; gözenekli yapıları ve

uygun termodinamik özellikleri sayesinde suyun hızlı bir şekilde adsorplanmasına ve desorpsiyon aşamasında kontrollü olarak serbest bırakılmasına olanak sağlamaktadır. Bu farklı adsorban malzemelere dayanarak yapılan birçok çalışmada, çeşitli adsorban türleri kullanılarak küçük ölçekli atmosferik su hasadı (ASH) cihazlarının tasarımı araştırılmıştır. Bu sistemler su buharı adsorpsiyonunda yüksek verimlilik göstermiş; taşınabilirliklerinin yüksek olması, ısı ve kütle transferi kayıplarının azaltılması ve su üretim veriminin artırılması gibi önemli avantajlar ortaya koymuştur. MOF tabanlı su toplayıcı gerçek dış ortam koşullarında test edilmiş ve 0.3 L su/kg sorbent su üretim verimine ulaşılmıştır (Seo & ark., 2016).

Daha verimli su hasadı sağlamak amacıyla araştırmacılar çeşitli stratejilere odaklanmıştır. Bunlar arasında sistem performansının optimize edilmesi (Rajaram & ark., 2016; Domen & ark., 2014), nemli havanın ısıtılması, taşınması ve yoğunlaştırılması için güneş enerjisiyle çalışan yardımcı ekipmanların kullanılması (Brown & Bhushan, 2016) ve çok döngülü çalışma modlarının geliştirilmesi yer almaktadır. Örneğin Li & arkadaşları (Domen & ark., 2014), adsorpsiyon süreci sırasında güneş ışınlamına maruziyeti azaltmak amacıyla koruyucu bir yapı kullanmış ve desorpsiyon aşamasında kaplama ve yoğunlaşma yüzeyi olarak şeffaf bir plastik filminden yararlanmıştır. Bu tasarım sayesinde sistem, bir gün içerisinde gerçekleştirilen üç adsorpsiyon/desorpsiyon döngüsü sonucunda 1.6 kg su/kg sorbent üretim kapasitesine ulaşmıştır. Diğer taraftan Lapotin & arkadaşları (Garrod & ark., 2007), iki kademeli bir sistem tasarlamış ve üst aşamada meydana gelen yoğunlaşma gizli ısını alt aşamadaki desorpsiyon sürecini desteklemek amacıyla kullanmıştır. Bu sistemde 0.77 kg su/kg sorbent su üretimi elde edilmiştir. Adsorpsiyon süreçleri, malzemelerin özgül özellikleri ve bu malzemelerin çevresel koşullarla etkileşimi hakkında daha derin bir anlayış geliştirilmesi; atmosferik su hasadı

teknolojilerinin performansının optimize edilmesi ve bu teknolojilerin uygulanabilir, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir bir çözüm haline getirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle çiy suyu hasadı alanındaki araştırmalar, aktif soğutmalı yoğunlaştırıcı teknolojileri ile entegrasyonu da kapsamaktadır. Bu teknolojiler arasında buhar sıkıştırmalı klima sistemleri ve son yıllarda termoelektrik soğutucular yer almaktadır. Aktif soğutmalı yoğunlaştırma sistemlerinin yüksek verimlilik göstermiştir.

2. Atmosferik Su Hasadı Teknolojisi (Genişletilmiş literatür destekli anlatım)

2.1. Sis Hasadı Teknolojisi

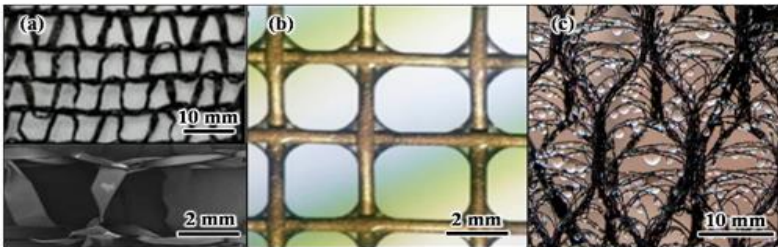
2.1.1. Geleneksel Sis Toplayıcılar

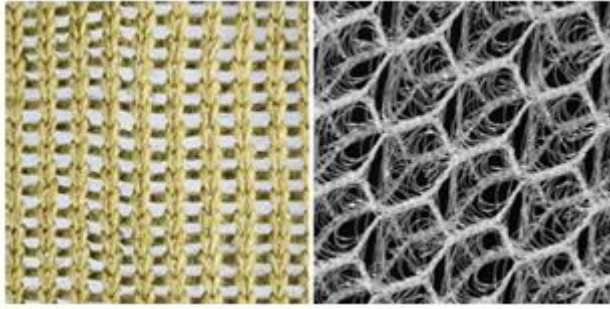
Geleneksel sis toplayıcılar, sisli bir hava kütesinin bir ağ malzemesine maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilen basit ve sürdürülebilir bir teknolojidir (Klemm & ark., 2012). Bazı sis damlacıkları çarpma yoluyla ağ malzemesi üzerinde birikir (Şekil 3.), birleşerek daha büyük damlacıklar oluşturur ve yerçekimi etkisiyle toplanarak tanka veya dağıtım sistemine akar (Park & ark., 2013; Montecinos & ark., 2018). Toplayıcılar, standart sis toplayıcıları ve büyük sis toplayıcıları olarak ikiye ayrılır. Standart sis toplayıcılar genellikle belirli koşullar altında sis suyunun ne kadar hacimde toplanabileceğini değerlendirmek amacıyla kullanılırken (Fernandez & ark., 2018) Büyük sis toplayıcıları ise pratik sis hasadı uygulamalarında kullanılır (Klemm & ark., 2012).

1980'lerin ortalarından sonra, geleneksel sis hasadı projeleri Şili'de büyük başarı elde etmiş ve dünyanın çeşitli bölgelerinde uygulanmaya başlanmıştır (Fessehay & ark., 2014). Bu bölgeler genellikle doğal olarak elverişli iklim ve coğrafyaya sahip olup çoğunlukla kurak tropikal ve subtropikal iklimlerde ve yüksek rakımlı alanlarda yer alır.

Çoğu ülkede en yaygın kullanılan sis toplayıcı, iki direk arasına dikey olarak yerleştirilen Raschel ağıdır (Rajaram & ark., 2016). Bu ağlar, milimetre ölçeğinde lifler ve gözeneklerden oluşan yaklaşık üçgen bir desenle dokunmuştur (Şekil 3b). Bu ağlar, UV dayanımı artırılmış ve %35 gölgeleme katsayısına sahip popüler bir toplama malzemesidir (Shanyengana & ark., 2003). Bir başkası 10 şerit ağdan oluşan iki katmanlı Raschel ağ içeren üç boyutlu bir sis toplayıcıdır (Eiffel). Bu tip Raschel ağlar toplayıcıya paralel esen rüzgârla taşınan sisi toplamak için kullanılabilir ve toplama verimi günde 281,2 litredir; bu da standart tam boyutlu sis toplayıcının 10 katına denk gelmektedir (Lummerich, 2011). Ancak rüzgâr yönüne bağlı toplama koşullarında sınırlılıkları olduğu için sonrasında “Harp” ve “Diagonal Harp” sis toplayıcıları geliştirilmiştir. Bu sistemler, birbirine yakın aralıklarla yerleştirilmiş dikey paslanmaz çelik tellerden oluşur ve yatay çizgiler içermeden, her yönden esen rüzgârdaki sisi yakalayabilen bir ağ gibi çalışır. Aynı zamanda damlacıkların aşağıya inme hızını artırarak tıkanmayı önler ve böylece toplayıcının performansını artırır (Shi & ark., 2018). Bununla birlikte, çoğu geleneksel sis toplayıcı, akan sis içindeki damlacıkların yalnızca bir kısmını yakalayabilir ve toplama verimi düşüktür. Mevcut çalışmaların büyük bölümü, geleneksel sis toplayıcıların ağ topolojisinin incelenmesine odaklanmıştır. Rüzgâr hızı, atmosferik nem, damlacık boyutu ve diğer coğrafi-çevresel faktörlerin getirdiği sınırlamaların aşılma istenmesi bunun nedeni olarak gösterilebilir.

Şekil 3. Sis toplayıcılarda ağ yapıları





2.1.2. Modern sis toplayıcılar

2.1.2.1. Dış alan etkisiyle yönlendirilen sis hasadı teknolojisi

Son 20-25 yıl içerisinde, damlacıkların elektrik, manyetik veya diğer alanlar kullanılarak aktif şekilde kontrol edilmesine yönelik yöntemler büyük ilgi görmüştür. 2004 yılında Dorvee & ark. (2004), Fe_3O_4 süperparamanyetik nanoparçacıklarının gözenekli nanoyapılara entegre edilmesi ile malzemenin mikrolitre ölçeğindeki damlacıklarla birlikte hareket edebileceğini göstermiştir. 2009 yılında Mugele (2009), elektro-ıslatma (electro-wetting) yönteminin çeşitli mikroakışkan uygulamalarda genellikle milimetre altı boyuttaki damlacıkları kontrol etmek için kullanılan genel bir yaklaşım olduğunu açıklamış ve bu olayın, iletken sıvı damlacıklarının dışarıdan uygulanan elektrik alanlarıyla etkileşimi sonucu ortaya çıktığını tartışmıştır. 2017 yılında ise Traipattanakul

& ark. (2017), elektrik alanı altında süperhidrofobik yüzeylerde sıçrayan su damlacıklarını incelemiş ve havadaki damlacıklara etki eden sabit elektrostatik kuvvet ile yüzey üzerindeki damlacıklara etki eden maksimum elektrostatik kuvvetin, boşluk genişliği ve uygulanan elektrik alan şiddetinden bağımsız olduğunu ortaya koymuştur. Öte yandan, Cruzat & ark. (2018), iki elektrot arasında radyal bir elektrik alan oluşturarak sis damlacıklarına elektriksel kuvvet uygulayan ve onları toplama noktasına yönlendiren elektrostatik bir sis toplayıcı tasarlayıp üretmiştir. Laboratuvar simülasyonları ve açık alan deneyleri ile bu cihazın toplama veriminin geleneksel sis toplayıcılara göre yaklaşık %60 daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Başka bir çalışmada ise geleneksel sis toplayıcıların aerodinamik açıdan doğal sınırlamalara sahip olduğu ileri sürülmüştür (Damak ve Varanasi, 2018). Bu sınırlamaların aşılması için ek bir elektriksel kuvvet uygulanarak aerodinamik sürüklenme kuvvetlerinin üzerine çıkılması sağlanmıştır. Yapılan işlemde bir iyon yayıcı kullanılmış ve ardından bir elektrik alan ile damlacıklar toplayıcıya yönlendirilmiştir. Böylelikle, sis damlacıklarının toplayıcı telin her iki tarafında birikmesini sağlayan teknik geliştirilmiştir. Ancak, ağ (mesh) yerine tel dizilerinin kullanılması verimliliği düşürmüştür. Bu dezavantajın ortadan kaldırılması için Seyyedmajid ve Hanif (2021), damlacıkların tek tek teller etrafındaki aerodinamik sapmalarını ve düşük kopma oranı sınırlamalarını en aza indirmek amacıyla geleneksel ağ yapısı ile elektriksel sürüş tekniklerini birleştirmiştir. Bu sayede, birleşik sistemin toplam verimi %84'e yükselttiği bulunmuştur. Bu değer, yöntemlerin tek başına kullanımından daha başarılı bir sonuçtur. Ayrıca, bu Teknik ile enerji verimliliğinin geleneksel sis toplayıcılara kıyasla 100 kat artırılabilirdiği ortaya konmuştur.

2.1.2. 2. Biyomimetik (doğadan esinlenen) sis hasadı teknolojisi

Aşırı kurak çöllerde yaşayan bazı organizmalar, havadaki su buharını yakalayıp hayatta kalmalarını sağlayan özel yapı ve

mekanizmalara sahiptir (Zhang & ark., 2017). Doğada hiperfiltrasyon yeteneği gösteren bu canlılar arasında Namib çöl böceği, örümcek ipeği ve kaktüsler en etkili atmosferik su toplayıcılar olarak öne çıkar. Özellikle Namib Çölü'nde gece oluşan sis, burada yaşayan böceklerin su toplama adaptasyonlarını geliştirmesine olanak sağlamıştır. Namib çöl böceği, sırt yüzeyindeki süperhidrofilik ve süperhidrofobik bölgelerin birlikte çalışması sayesinde su toplar. Su damlacıkları önce hidrofilik çıkıntılarda yoğunlaşır, büyür ve ardından hidrofobik yüzeyler sayesinde kolayca hareket ederek böceğin ağzına ulaşır. Bu dönüşümlü yapı, yüksek verimli su toplamanın temelini oluşturur (Parker ve Lawrence 2001; Nørgaard & ark., 2010). Benzer şekilde, örümcek ağlarında sabah saatlerinde su damlacıklarının özellikle düğüm noktalarında biriktiği gözlemlenir. Örümcek ipeğinin yönlü su taşıma özelliği, biyomimetik liflerin geliştirilmesine ilham vermiştir (Bai & ark., 2014; Chen & ark., 2014). Günümüzde çeşitli üretim teknikleriyle elde edilen bu lifler, sisli ortamlarda etkili su toplama amacıyla kullanılmaktadır (Thakur & ark., 2017). Kaktüsler ise konik diken yapıları sayesinde suyu yönlendiren Laplace basınç ve yüzey enerjisi gradyanlarından yararlanır (Ju & ark., 2012). Bu özelliklerden esinlenerek geliştirilen yapay sistemler, suyun hızlı ve kontrollü şekilde toplanmasını sağlamaktadır. Ayrıca Nepenthes bitkisi, lotus yaprağı, kelebek kanatları ve buğday kılçıkları gibi birçok doğal yapı da sis hasadı konusunda araştırmalara ilham vermiştir. Ancak tek bir biyomimetik sistemin verimi sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle güncel çalışmalar, birden fazla biyolojik yapıdan esinlenen hibrit sistemlere evrilmiştir. Bu tür çok işlevli yüzeyler hem suyun yakalanması hem de taşınmasında daha yüksek performans göstermektedir (Zhao & ark., 2023). Li & ark. (2023a) ise kaktüs, çöl böceği, örümcek ipeği ve lotus yaprağından ilham alarak dört katmanlı biyomimetik bir Janus kompozit malzeme tasarlamış ve yüksek sis toplama verimi elde etmiştir ($80.57 \text{ mg} \cdot \text{dak}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$). Sonuç olarak, farklı doğal sistemlerin özelliklerini

bir araya getiren biyomimetik tasarımlar, atmosferik su hasadında verimliliği artırmak için önemli bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir.

2.2. Yoğuşma (kondensasyon) teknolojisi

Yoğuşma teknolojisi, nemli havanın soğuk bir yüzeyle temas ederek çığ noktasının altına düşmesi ve su buharının yoğunlaştırılması prensibine dayanır. Bu yöntemle atmosferden tatlı su elde edilmesi, tarihsel olarak MÖ 600’lü yıllarda antik Yunanlıların çığ toplayıcıları kullanmasına kadar uzanmaktadır (Shafeian & ark., 2022). Günümüzde yoğuşma için gerekli soğutma genellikle buhar sıkıştırırmalı soğutma (VCR) ve termoelektrik soğutma (TEC) sistemleriyle sağlanır (Kwan & ark., 2022). VCR sistemleri, buzdolabı ve klima prensibiyle çalışır: Nemli hava fan yardımıyla evaporatöre alınır, soğutucu akışkan havadan ısı çekerek sıcaklığı düşürür ve su buharı yoğuşarak toplanır (Raveesh & ark., 2021). Bu sistemler yüksek enerji verimliliğine sahip olup, uygun koşullarda günlük 22–26 litre su üretimi sağlayabilmektedir (Zolfagharkhani & ark., 2018). TEC sistemleri ise Peltier etkisine dayanır ve elektrik akımı ile sıcaklık farkı oluşturarak yoğuşma sağlar. Hareketli parça içermemesi, kompakt yapısı ve düşük bakım ihtiyacı önemli avantajlarıdır. Ancak su üretimi; bağıl nem, elektrik akımı ve hava akışı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanı sıra adsorpsiyon/absorpsiyon ve elektromanyetik soğutma gibi alternatif yöntemler de geliştirilmiştir (İbrahim & ark., 2016). Adsorpsiyon ve absorpsiyon sistemleri genellikle ısı enerjisi ile çalışırken, elektromanyetik soğutma manyetik alan değişimleriyle sıcaklık kontrolü sağlar. Ancak bu yöntemler yüksek maliyetleri nedeniyle geniş ölçekli uygulamalarda sınırlı kalmaktadır. Yoğuşma tabanlı sistemler atmosferik su üretiminde etkili ve yaygın kullanılan teknolojiler arasında yer almakta; ancak enerji tüketimi ve maliyet faktörleri, bu sistemlerin geliştirilmesi gereken temel yönleridir.

2.3. Soğurma (sorpsiyon) teknolojisi

Son yıllarda sorpsiyon tabanlı atmosferik su toplama (SASH), en hızlı gelişen teknolojilerden biri haline gelmiştir (Salehi & ark., 2020). Bu yöntemde süreç üç ana adımdan oluşur: 1. Adsorban malzeme tarafından suyun tutulması, 2. Isı uygulanarak suyun serbest bırakılması, 3. Su buharının yoğunlaştırılması ve sıvılaştırılması

2.3.1. Adsorban Malzemeler (Sorbentler)

Sorbentler, adsorpsiyon tabanlı atmosferik su hasadı (SASH) sistemlerinin temel bileşenidir. İdeal bir sorbent; yüksek su tutma kapasitesi, hızlı adsorpsiyon–desorpsiyon kinetiği, düşük enerji gereksinimi ve uzun süreli kararlılık gibi özelliklere sahip olmalıdır. Günümüzde kullanılan başlıca sorbent türleri Higroskopik malzemeler, Metal-organik kafesler (MOF’lar) ve Polimerik jeller (Hidrojel) olarak sıralanabilir. Higroskopik malzemelerden olan silika jel, zeolit ve higroskopik tuzlar, havadaki nemi doğrudan emerek çalışır. Silika jel ve zeolit gibi ilk nesil malzemeler düşük kapasite ve zayıf ısı iletkenliği nedeniyle sınırlı kalmaktadır (Ejeian & ark., 2021). Buna karşılık CaCl_2 , LiCl ve LiBr gibi higroskopik tuzlar düşük ve orta bağıl nemde yüksek performans sergiler (Li & ark., 2018). Ancak çözünme, korozyon ve düşük çevrim kararlılığı gibi dezavantajlara sahiptir. Bu sorunlar, tuzların gözenekli veya polimer matrisler içine entegre edilmesiyle azaltılabilmektedir. Nitekim son çalışmalar, tuz destekli kompozit yapıların su toplama kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Wasti & ark., 2022). MOF’lar ise yüksek yüzey alanına sahip yeni nesil gözenekli malzemeler olup ASH uygulamalarında öne çıkmaktadır. Geliştirilen MOF tabanlı sistemler, hızlı adsorpsiyon–desorpsiyon döngüleri (Hanikel & ark., 2019) ve yüksek su üretim kapasiteleri sunmaktadır. Özellikle yeni nesil MOF tasarımları, daha düşük enerji tüketimiyle

sürekli ve verimli su toplama imkânı sağlamaktadır. Mof alanındaki çalışmalardan, Logan & ark. (2020), farklı MOF türlerini karşılaştırmış ve Zr-MOF-808'in en iyi performansı gösterdiğini, günde 8.66 L/kg su üretebildiğini belirlemiştir. Hanikel & ark. (2023) ise MOF yapılarını genişleterek daha düşük enerjiyle çalışan ve uzun süreli su toplama sağlayan yeni tasarımlar önermiştir. Son olarak, Polimerik jeller (Hidrojeller) ile ilgili bilgi verilecek olursa; Hidrojeller, suyu emerek polimer ağ yapısı içinde depolayan ve yapısal olarak ayarlanabilir özelliklere sahip malzemelerdir (Loo & ark., 2021). Yüksek su emme kapasiteleri sayesinde büyük ölçekli uygulamalar için umut verirler. Ancak çevresel koşullar (sıcaklık, rüzgâr) performanslarını etkileyebilir. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirilen çok katmanlı ve ışığa duyarlı hidrojel yapıları, suyun yakalanması, taşınması ve depolanmasını daha verimli hâle getirmektedir (Zhang & ark., 2022).

2.3.2. Sorpsiyon sistemleri

Adsorpsiyon tabanlı atmosferik su hasadı (ASH) sistemlerinde yüksek performanslı adsorban malzemeler önemli olsa da, sistemin genel verimini belirleyen temel unsurlar kütle ve ısı transfer süreçleridir. Adsorban tarafından tutulan su, ısıtma ile serbest bırakılır; oluşan su buharı basınç farkı ile kondenser tarafına taşınır ve burada yoğunlaşarak toplanır. Yüksek verimli su üretimi için sorpsiyon yatağının (sorbent bed) uygun şekilde tasarlanması gerekir. Bu amaçla, kütle transferini artırmak, enerji tüketimini azaltmak ve sistem boyutunu küçültmek için iki temel tasarım yaklaşımı öne çıkmaktadır: İlk yaklaşımda, nem alıcı kaplamalı ısı değiştiriciler kullanılır. Bu sistemlerde adsorban malzeme doğrudan ısı değiştiriciye entegre edilerek etkin bir ısıtma-soğutma sağlanır (Tu & ark., 2017b). Böylece daha düşük sıcaklıklarda çalışmak mümkün olur ve enerji verimliliği artar. İkinci yaklaşım ise güneş enerjisi destekli, nem alıcı güçlendirilmiş ısı pompası sistemleridir. Bu sistemlerde hava akımı ikiye ayrılır; bir kısmı soğutulurken nemi

alınırken diğerk kısmı ısıtılır ve nemlendirilir. Ardından bu iki akım kondenserde birleşerek suyun yoğunlaşmasını sağlar. Son yıllarda çok kademeli nem alıcı tekerlekler (desiccant wheels) ile desteklenen sistemler de geliştirilmiştir (Li & ark., 2023b). Bu yapılarda hava önce nemlendirilir, ardından yoğunlaşma süreci ile su elde edilir. Bu yöntem, hem buharlaşma sıcaklığını artırmakta hem de su toplama hızını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Ayrıca optimize edilmiş MOF tabanlı sistemlerin kullanımı, rejenerasyon ve nem alma verimliliğinde önemli artışlar sağlamıştır. Bu konu ile ilgili Shahvari & ark. (2023), çok kademeli nem alıcı tekerlek sisteminde rejenerasyon verimliliğini %5-20 ve nem alma verimliliğini %20-40 oranında artırmayı başarmıştır.

3. Farklı Atmosferik Su Hasadı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Tüm atmosferik su hasadı (ASH) teknolojilerinin özelliklerini, avantajlarını ve dezavantajlarını özetlemek gerekirse:

Geleneksel sis toplayıcılar iyi geliştirilmiş ve maliyet etkin sistemler olmasına rağmen, sisin yakalanması, damlacıkların oluşumu, taşınması ve uzaklaştırılması süreçlerinin sürekliliğini sağlamak zordur ve verimleri düşüktür. Basit pasif çarpışmaya dayanan geleneksel sis toplama yöntemlerinden farklı olarak, ısı, ışık, manyetik alan ve elektrik gibi dış uyarılarla damlacık hareketinin aktif olarak yönlendirilmesi, daha yüksek toplama verimi elde edilmesine yardımcı olabilir.

Biyomimetik sistemler, doğadan ilham alarak enerji gerektirmeden yönlü damlacık taşınımı sağlayabilmeleri açısından umut vericidir. Ancak üretim zorlukları, karmaşık yapılar ve henüz düşük ölçeklenebilirlik gibi nedenlerle ticari uygulamaları sınırlıdır. Ayrıca bu sistemlerin çoğu, yüksek nemli ortamlarda etkili olsa da kurak koşullardaki performansları hâlâ yeterince geliştirilmemiştir.

Yoğuşma tabanlı aktif sistemler, sürekli çalışabilmek için yüksek enerji gereksinimine sahiptir ve genellikle endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. Pasif yoğuşma sistemleri ise enerji gerektirmemekle birlikte; sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr ve buhar basıncı gibi çevresel faktörlere oldukça bağımlıdır ve genellikle küçük ölçekli su temini ile sınırlı kalır.

Adsorpsiyon tabanlı sistemler, özellikle düşük nem koşullarında çalışabilmeleri ve geniş bağıl nem aralığında su toplayabilmeleri nedeniyle önemli avantajlar sunar. Ancak suyun adsorbanlardan ayrılması için enerji gereksinimi, malzeme seçimine bağlı zorluklar ve olası sızıntıların neden olabileceği korozyon ve su kalitesi problemleri gibi dezavantajlar bulunmaktadır.

Teknolojik gelişmeler önemli potansiyel ve birçok ideal özellik ortaya koymuş olsa da, her teknolojinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca Malik & ark. (2014), su hasadı veriminin büyük ölçüde hava durumu ve iklim koşullarına bağlı olduğunu ve farklı bölgelerin atmosferik su toplama sistemleri için farklı gereksinimlere sahip olabileceğini göstermiştir. Bu nedenle ASH teknolojilerinin, uygulanacak atmosferik koşullara uygun şekilde uyarlanması gerekmektedir.

Geliştirilen bazı entegre sistemler; endüstriyel ortamlarda su geri kazanımını artırmış, düşük nem koşullarında yüksek su üretim kapasitesi sağlamış ve enerji verimliliğini iyileştirmiştir. Ayrıca, gün boyu su üretimi sağlayabilen sistemler ve çoklu fiziksel mekanizmaları birleştiren yeni nesil tasarımlar dikkat çekmektedir.

4. ASH Uygulama Alanları

Atmosferik su hasadı (ASH) teknolojilerinin uygulama alanları; su-gıda-enerji sürdürülebilirliği üzerinedir. Bu teknolojilerin en yaygın kullanım alanları ise içme suyu temini ve tarımsal sulamadır. Küresel su sorunları dikkate alındığında, ASH teknolojisi coğrafi ve iklimsel kısıtlamalardan büyük ölçüde

bağımsız bir çözüm sunmakta; özellikle su kıtlığı yaşanan bölgelerde içme suyu ve sulama suyu taşınmasına alternatif en umut verici stratejilerden biri olarak değerlendirilmektedir.

ASH teknolojilerinin temel araştırma alanları ve pratik uygulamalarına ilişkin genel bir şema Şekil 4’de gösterilmektedir.

Şekil 4. ASH teknolojisinin temel araştırmaları ve pratik uygulamalarına genel bakış diyagramı



Kaynak: Wang & ark., 2024

4.1. Taşınabilir Su Temini

Atmosferden su elde etme teknolojileri, “taşınabilir vaha” kavramıyla tanımlanmakta ve giderek artan küresel su kıtlığı koşullarında neredeyse her yerde güvenli içme suyu sağlayabilmektedir. Bu çalışmada öne çıkan taşınabilir atmosferik su üretim cihazları, hem verimlilik hem de kullanım kolaylığı açısından umut verici sonuçlar göstermiştir. Dash & ark. (2015) tarafından geliştirilen Peltier tabanlı taşınabilir cihaz, atmosferik suyu yoğunlaştırmakta ve güneş enerjisinden yararlanarak enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu tasarım, Dünya Sağlık Örgütü (WHO)

içme suyu kalite standartlarını karşılamakla birlikte, kullanıcı güvenliği ve düşük maliyet açısından da avantaj sağlamaktadır.

Benzer şekilde, Shan & ark. (2022) tarafından sunulan taşınabilir su toplayıcı, düşük maliyetli, hafif ve ölçeklenebilir adsorbanlar kullanarak bireysel günlük su ihtiyaını karşılayabilmektedir. Beş farklı iklim bölgesinde yapılan testler, bu cihazın kurak, yarı kurak ve nemli bölgelerde yüksek su üretim kapasitesi gösterebileceğini ortaya koymuştur. Kurak bölgelerde güneş ışığı potansiyelinin yüksek olması, taşınabilir su üreticilerinin fotovoltaiik sistemlerle desteklenmesini olanaklı kılmaktadır; ince film güneş hücreleri insan taşınabilir cihazlarda, silisyum hücreler ise şebeke elektriğinin bulunmadığı alanlarda etkin enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

Almassad & ark. (2022) tarafından geliştirilen MOF tabanlı çevresel adaptif cihaz, günlük hava koşullarındaki değişikliklere yanıt vererek zorlu çöl koşullarında sürekli su üretimini sağlamış ve elde edilen su Ürdün ulusal içme suyu standartlarına uygun bulunmuştur. Ayrıca, Inbar & ark. (2020) tarafından Tel Aviv’de yürütülen uzun dönemli kimyasal analizler, atmosferik su üreticilerinin yoğun şehirleşmiş bölgelerde güvenli içme suyu sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu bulgular, taşınabilir su üretiminin nüfus yoğunluğu ve coğrafi sınırlamalar gibi geleneksel engelleri aşabileceğini ve çöl gibi kurak bölgelerde uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Günlük en az 1100 litre taze su üretebilen tam fonksiyonel bir su üretim istasyonu, yaklaşık 150 kişinin içme suyu ihtiyaını karşılayabilir; bu da teknolojinin askerler, afet yardım ekipleri ve uzak bölgelerde yaşayan insanlar için güvenilir, ucuz ve sürdürülebilir bir yaşam kaynağı sunabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, taşınabilir atmosferik su üretimi teknolojileri, hem bireysel hem de toplumsal su güvenliği açısından kritik bir çözüm

sunmakta, düşük karbon ayak izi ve çevresel adaptasyon kapasitesi ile geleceğin su temini stratejilerinde önemli bir rol olabilir.

4.2. Tarımsal Sulama

ASH teknolojisi, tarımsal gelişim için sürdürülebilir bir sulama suyu kaynağı sağlayabilir. ASH sistemleri, mevcut merkezi su temin hatlarından bağımsız olarak minyatürize ve modüler hale getirilebilir; bu sayede çatı üstü tarımı, kırsal çiftlikler ve diğer kentsel tarım uygulamalarında kullanılabilir ve şehirlerdeki nüfus artışı nedeniyle artan gıda talebi üzerindeki baskıyı azaltabilir. Atmosferik suyun sulama kaynağı olarak kullanılması, geleneksel olmayan tarım arazisi kaynaklarının daha etkin şekilde geliştirilmesine, ekilen alanın artırılmasına ve ekonomik ile ekolojik faydaların iyileştirilmesine katkıda bulunabilir (Yang & ark., 2023). Yang & ark. (2020a) tarafından geliştirilen tamamen otomatik, kendi kendine yeten ve güneş enerjisiyle çalışan akıllı tarım sistemi, bakır kompozit malzemeler kullanarak gece atmosferik suyu toplamakta ve güneş ışığına maruz kaldığında adsorbe edilen suyu etkin şekilde serbest bırakmaktadır. Su hasadı ve yeniden sulama süreçleri, farklı iklim bölgelerinde farklı bitki türlerinin ekimi için optimize edilebilir. Bu akıllı tarım uygulamalarıyla taze su ihtiyacı önemli ölçüde azalacak ve büyük ölçekli çatı üstü tarım gibi kentsel tarım uygulamaları mümkün hale gelecektir. Buna ek olarak, toprak bazlı süper-absorban jel sulama sistemleri, gelişmemiş ve kurak bölgelerdeki tarım uygulamalarını uzun mesafeli hidroelektrik su tedariklerinden bağımsız kılmakta ve aynı zamanda küresel çölleşme gibi toprak kaynaklı çevresel sorunların hafifletilmesine katkı sağlamaktadır. Bu üç tarımsal sulama sistemi, coğrafi ve hidrolojik açıdan bağımsız şekilde işletilebilir (Zhou & ark., 2020b). Gelecekte, hava-su toplama teknolojisine dayalı olarak sürdürülebilir sera tarımı tesislerinin insan yaşam alanlarını genişletmek için sınırsız olanaklar sunması mümkün olacaktır.

Modern bir tarımsal üretim sistemi olan sera yetiştiriciliğinde, su kullanım verimliliğinin artırılması büyük önem taşımaktadır. Geleneksel su tasarruflu sulama yöntemleri sera sulamasında kullanılan su miktarını belirli ölçüde azaltsada, su kullanım verimliliğini yeterince artırmada yetersiz kalmaktadır. Bu yöntemler, bitki terlemesi (transpirasyon) sonucu ortaya çıkan yüksek nem sorununu etkili bir şekilde ele alamamakta ve bu durum hem önemli miktarda su kaybına hem de sera ortamında istenmeyen yüksek nem koşullarının oluşmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak zaman zaman çelişkili yönetim durumları ortaya çıkabilmektedir; bunun en belirgin örneklerinden biri yan pencere havalandırmasıdır (Zhang & ark., 2020). Ancak bu süreç çoğu zaman değerli su buharının ortamdaki uzaklaşmasına neden olur. Böylece bir yandan sulama yoluyla sisteme su eklenirken, diğer yandan havalandırma yoluyla su kaybedilen bir durum ortaya çıkar. Bu durum etkili havalandırma ihtiyacı ile su kayıplarının azaltılması arasında denge kurabilecek çözümlerin geliştirilmesini son derece önemli hale getirmektedir. Bu aşamada, Sorpsiyon temelli atmosferik su hasadı sistemlerinin (SASH) ortaya çıkışı, seralarda su kullanım verimliliği sorununa çözüm bulma konusunda yeni fırsatlar sunmuştur (Zou & ark., 2024; Lyu & ark., 2024). Bu yenilikçi teknoloji, çevredeki havadan doğrudan su elde edilmesini sağlayan pasif bir yöntemdir. Ayrıca bu teknolojilerdeki kullanılan adsorban malzemeler, yüksek bağıl nem (RH) koşullarında havadaki nemi adsorplayarak tutar. Daha sonra güneş enerjisi veya diğer aktif enerji kaynaklarının yardımıyla adsorbanlar su buharını desorbe eder ve açığa çıkan buhar gün içerisinde yoğunlaşarak sıvı suya dönüşür (Poredoš ve Wang 2023; Ejeian & ark., 2021). İşte bu mekanizmaları içerisinde barındıran seralar, doğal olarak yüksek nem seviyelerine sahip olmaları ve sürekli nem kontrolü gereksinimi bulunması nedeniyle SASH teknolojisinin uygulanması için oldukça uygun bir ortam sunmaktadır. Bu nedenle bazı araştırmalar, sera ortamlarında su geri kazanımı amacıyla SASH sistemlerinin uygulanmasını

incelemiştir (Shan & ark., 2024; Yang & ark., 2020a). Bu çalışmaların bir kısmı fotovoltaik paneller ve ısı pompaları gibi büyük sistem bileşenlerinin entegrasyonunu gerektirmiştir [24]. SASH sistemlerinin sera işletmelerinde böylelikle faaliyetlerini aksatmadan su geri kazanım verimliliğini artırma potansiyeline sahip olmuştur. Zou & ark. (2025), sera ortamları için özel olarak tasarlanmış ve su kullanım verimliliğini artırmayı amaçlayan öncü bir cihaz olan yan pencere geri dönüştürücüsünü (SWR) sunmuşlardır. SWR'nin merkezinde, yüksek ölçeklenebilirlik ve güçlü yapışma özelliklerine sahip, çok bileşenli ve birbirine bağlı higroskopik gözenekli bir jel olan LHPE bulunmaktadır. LHPE, sorbent başına 4,06 g suya kadar yüksek su tutma kapasitesi gösterir ve desorpsiyon sırasında hızlı su salımını destekler. SWR, bu gelişmiş jeli kullanarak sera yan pencerelerinden kaçan su buharını yakalar ve elektrikle ısıtılan desorpsiyon yoluyla bunu sulama suyuna dönüştürür. Sera denemelerinde SWR, 5015,6 g m⁻² su geri kazanım oranına ve %78,78 su tasarrufu verimliliğine ulaşarak ürün verimini %120'ye kadar önemli ölçüde artırmıştır. Sürdürülebilir su geri dönüşümünü tarıma entegre eden SWR, küresel su kıtlığı krizine çözüm sunmakta ve sera su verimliliğinde dönüştürücü bir ilerlemeyi temsil ederek dünya genelinde su yoğun uygulamalarda etkili bir şekilde benimsenmeye adaydır.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Yerleşik teknolojiler arasında, geleneksel sis toplayıcı ve aktif yoğunlaşma belirli bir uygulama alanı kazanmış olsa da, verimlilik ve enerji tüketimi hâlâ gelişimlerini sınırlamaktadır. Yeni gelişen teknolojiler arasında ise dış alan etkili sis toplama, pasif yoğunlaşma, biyomimetik (biyomimetik) sis toplama ve adsorpsiyon yer almakta olup, yeni malzemeler ve sistemlerin geliştirilmesiyle kademeli olarak ilerlemektedir. Ancak mevcut araştırma düzeyi, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını ve uygulanmasını hâlâ kısıtlamaktadır.

Farklı ASH teknolojilerinin değerlendirilmesi sonucunda, farklı teknolojilerin ve ekipmanların entegre/hibrit sistemler halinde kullanımı, atmosferik su hasadında gelecekteki eğilim olarak öne çıkmaktadır. ASH teknolojisi araştırmalarında kaydedilen büyük ilerlemelere rağmen, etkin, sürdürülebilir ve yaygın olarak uygulanabilir bir teknoloji henüz tam anlamıyla gerçekleştirilememiştir.

Bu derlemeye öneriler, aşağıdaki gibi detaylandırılabilir:

- Malzeme bilimi ilerledikçe, gelişmekte olan ASH teknolojileri belirgin potansiyeller ve beklenen birçok yetenek sunmaktadır. İki veya daha fazla malzemenin hibritlenmesi, biyokütle bazlı malzeme tasarımı, su-malzeme etkileşimi mekanizması ve nem evrimi süreci araştırılmalıdır.
- Entegre sistemlerin geliştirilmesi, ASH teknolojisini gerçek dünya uygulamalarına taşımak için kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda su kalitesi yönetimi, ısı dönüşümü, nem alma ve enerji üretimi gibi fonksiyonlarla birleştirilmesi, sistemin genel potansiyelinin gerçekleştirilmesine yardımcı olacaktır.
- Güneş enerjisiyle çalışan ASH teknolojisi, gelecekteki araştırmalar için önemli bir konu hâline gelmektedir. Güneş enerjisi, Jeotermal enerji, endüstriyel atık ısı ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları da sistem için ek enerji kaynağı olarak kullanılabilir.
- ASH teknolojisi ile üretilen içme suyunun güvenli olması gerekmektedir. Mevcut atmosfer kirliliği sorunları (ör. is partikülleri, ağır metaller, organik kirleticiler vb.) su kalitesi üzerinde ciddi etkilere sahip olabilir. Bu sorunun çözümü, ASH öncesi atmosferin ön arıtımı için bir hava temizleyici eklemek veya ASH sonrası su ürünlerinin arıtımı için bir su filtresi kullanılarak sağlanabilir.

- ASH teknolojisi araştırmasının değeri, ticari yaygınlaşmayı sağlamaktır. Kullanıcı maliyetleri ve elde edilen kaynaklar dengelenmelidir. Takip eden araştırmalar, düşük maliyetli malzemelerin ve verimli işletim sistemlerinin tasarımını ve geliştirilmesini güçlendirmeli ve bunların detaylı ve doğru ekonomik analizlerini yaparak ticari uygulamalar için temel oluşturmalıdır.

Kaynakça

- Almassad, H.A., Abaza, R.I., Siwwan, L., Al-Maythalony, B., Cordova, K.E., 2022. Environmentally adaptive MOF-based device enables continuous self-optimizing atmospheric water harvesting. *Nat. Commun.* 13, 4873.
- Alvarez, P. J. J., Chan, C. K., Elimelech, M., Halas, N. J., & Villagrán, D. (2018). Emerging opportunities for nanotechnology to enhance water security. *Nature Nanotechnology*, 13, 634–641.
- Bai, H., Wang, L., Ju, J., Sun, R., Zheng, Y., Jiang, L., 2014. Efficient water collection on integrative bioinspired surfaces with star-shaped wettability patterns. *Adv. Mater.* 26, 5025–5030.
- Brown, P. S., & Bhushan, B. (2016). Bioinspired materials for water supply and management: Water collection, water purification and separation of water from oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374, 1–15.
- Chen, Y., Zheng, Y., 2014. Bioinspired micro-/nanostructure fibers with a water collecting property. *Nanoscale* 6, 7703–7714.
- Damak, M., & Varanasi, K. K. (2018). Electrostatically enhanced fog harvesting. *Science Advances*, 4(6), eaao5323.
- Dash, A., & Mohapatra, A. (2015). *Atmospheric water generator: To meet the drinking water requirements of a household in coastal regions of India*. NIT Rourkela.
- Davtalab, R., Salamat, A., & Oji, R. (2013). Water harvesting from fog and air humidity in warm and coastal regions in the south of Iran. *Irrigation and Drainage*, 62, 281–288.

- Domen, J. K., Stringfellow, W. T., Camarillo, M. K., et al. (2014). Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 235–249.
- Dorvee, J. R., Derfus, A. M., Bhatia, S. N., & Sailor, M. J. (2004). Manipulation of liquid droplets using amphiphilic magnetic one-dimensional photonic crystal chaperones. *Nature Materials*, 3, 896–899.
- Ejeian, M., Wang, R., Liu, H., Zhao, F., Zhou, W., & Peng, Y. (2021). A comprehensive review of atmospheric water harvesting systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110340.
- Fernandez, D.M., Oliphant, A., Bowman, M., Torregrosa, A., Weiss-Penzias, P.S., Zhang, B.J., Sorensen, D., Cohen, R.E., McKinley, G.H., Kleingartner, J.A., 2018. Fog water collection effectiveness: mesh intercomparisons. *Aerosol Air Qual. Res.* 18,, 270-28.
- Fessehaye, M., Abdul-Wahab, S. A., Savage, M. J., Kohler, T., Gherezghiher, T., & Hurni, H. (2014). Fog-water collection for community use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 52–62.
- Garrod, R. P., Harris, L. G., Schofield, W. C. E., et al. (2007). Mimicking a *Stenocara* beetle's back for microcondensation using patterned surfaces. *Langmuir*, 23, 689–693.
- Hanikel, N., Kurandina, D., Chheda, S., et al. (2023). MOF linker extension strategy for enhanced atmospheric water harvesting. *ACS Central Science*, 9, 551–557.
- Hanikel, N., Prévot, M. S., & Yaghi, O. M. (2019). Rapid cycling and exceptional yield in a metal–organic framework water harvester. *Science*, 365(6452), 430–434.

- Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., & Saidur, R. (2016). Performance assessment of water production from solar cooling systems in humid climates. *Energy Conversion and Management*, 127, 647–655.
- Inbar, O., Gozlan, I., Ratner, S., et al. (2020). Producing safe drinking water using an atmospheric water generator in an urban environment. *Water*, 12, 2940.
- Jarimi, H., Powell, R., & Riffat, S. (2020). Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(2), 253–276. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz072>
- Ju, J., Bai, H., Zheng, Y., Zhao, T., Fang, R., & Jiang, L. (2012). A multifunctional fog collection system inspired by cactus. *Nature Communications*, 3, 1247.
- Klemm, O., Schemenauer, R. S., Lummerich, A., et al. (2012). Fog as a freshwater resource: Overview and perspectives. *Ambio*, 41(3), 221–234.
- Kwan, T. H., Yuan, S., Shen, Y., & Pei, G. (2022). Meta-analysis of desalination and atmospheric water harvesting technologies. *Energy Reports*, 8, 10072–10087.
- Li, R., Shi, Y., Shi, L., Alsaedi, M.K., Wang, P., 2018. Harvesting water from air: using anhydrous salt with sunlight. *Environ. Sci. Technol.* 52, 5398–5406.
- Li, H., Zhang, Z., Ren, Z., Chen, Y., Huang, J., Lei, Z., Qian, X., Lai, Y., Zhang, S., 2023a. A quadruple biomimetic hydrophilic/hydrophobic Janus composite material integrating Cu(OH)₂ micro-needles and embedded bead-on-string nanofiber membrane for efficient fog harvesting. *Chem. Eng. J.* 455, 140863.

- Li, Z., Tao, R., 2023b. Performance enhancement of desiccant wheels by adsorption/ desorption in stages with type-S isotherm desiccants. *Appl. Therm. Eng.* 224, 120068.
- Liu, Z., Wu, B., Zhu, B., Chen, Z., Zhu, M., Liu, X., 2019. Continuously producing watersteam and concentrated brine from seawater by hanging photothermal fabrics under sunlight. *Adv. Funct. Mater.* 29, 1905485.
- Liu, X., Beysens, D., & Bourouina, T. (2022). Water harvesting from air: Current passive approaches and outlook. *ACS Materials Letters*, 4, 1003–1024.
- Lummerich, A. T. K. (2011). Fog harvesting on the verge of economic competitiveness. *Erdkunde*, 65, 305–306.
- Logan, M. W., Langevin, S., & Xia, Z. (2020). Reversible atmospheric water harvesting using MOFs. *Scientific Reports*, 10, 149.
- Loo, S. L., Vásquez, L., Athanassiou, A., & Fragouli, D. (2021). Polymeric hydrogels for enhancing water security. *Advanced Materials Interfaces*, 8, 202100580.
- Lyu, T.; Han, Y.; Chen, Z.; Fan, X.; Tian, Y. Hydrogels and Hydrogel Derivatives for Atmospheric Water Harvesting. *Mater. Today Sustain.* 2024, 25, 100693.
- Malik, F. T., Clement, R. M., Gethin, D. T., et al. (2014). Nature's moisture harvesters: A review. *Bioinspiration & Biomimetics*, 9, 031002.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2, e1500323.

- Montecinos, S., Carvajal, D., Cereced, P., Concha, M., 2018. Collection efficiency of fog events. *Atmos. Res.* 209, 163–169.
- Mugele, F. (2009). Fundamental challenges in electrowetting. *Soft Matter*, 5, 3377–3384.
- Nørgaard, T., Dacke, M., 2010. Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles. *Front. Zool.* 7, 23.
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and water resources. *Science*, 313, 1068–1072.
- Park, K. C., Chhatre, S. S., Srinivasan, S., et al. (2013). Optimal design of fiber networks for fog harvesting. *Langmuir*, 29, 13269–13277.
- Parker, A. R., & Lawrence, C. R. (2001). Water capture by a desert beetle. *Nature*, 414, 33–34.
- Poredoš P., R. Wang, *Science* 2023, 380, 458.
- Rajaram, M., Heng, X., & Oza, M. (2016). Enhancement of fog collection efficiency using mesh modifications. *Colloids and Surfaces A*, 508, 218–229.
- Raveesh, G., Goyal, R., & Tyagi, S. K. (2021). Advances in atmospheric water generation technologies. *Energy Conversion and Management*, 239, 114226.
- Salehi, A. A., Ghannadi-Maragheh, M., Torab-Mostaedi, M., et al. (2020). Water-energy nexus for drinking water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109627.
- Schemenauer, R. S., & Joe, P. I. (1989). The collection efficiency of fog collectors. *Atmospheric Research*, 24, 53–69.

- Seo, D., Lee, J., Lee, C., et al. (2016). Effects of surface wettability on fog harvesting. *Scientific Reports*, 6, 24276.
- Shafeian, N., Ranjbar, A. A., & Gorji, T. B. (2022). Progress in atmospheric water generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112325.
- Shahvari, S.Z., Clark, J.D., 2023. Approaching theoretical maximum energy performance for desiccant dehumidification using staged and optimized metal-organic frameworks. *Appl. Energy* 331, 120421.
- Shan, H., Li, C., Chen, Z., et al. (2022). High-yield portable water harvester. *Nature Communications*, 13, 5406.
- Shan H., Poredos, H., Qu, X., Yang, M., Zhou, L., Bai, J., Shi, W., Chen, R., Wang, S. C. Tan, *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 2402839.
- Shanyengana, E. S., Henschel, J. R., Seely, M. K., & Sanderson, R. D. (2003). Fog as a supplementary water source in Namibia. *Atmospheric Research*, 64, 251–259.
- Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., et al. (2018). Fog harvesting with harps. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10, 11979–11986.
- Sleiti, A. K., Al-Khawaja, H., Al-Khawaja, H., & Al-Ali, M. (2021). Harvesting water from air using adsorption materials. *Separation and Purification Technology*, 257, 117921.
- Thakur, N., Ranganath, A. S., Agarwal, K., & Baji, A. (2017). Electrospun fibers for fog harvesting. *Macromolecular Materials and Engineering*, 302, 1700124.
- Traipattanakul, B., Tso, C. Y., & Chao, C. Y. H. (2017). Jumping droplets on superhydrophobic surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 672–681.

- Tu, Y. D., Wang, R. Z., Ge, T. S., et al. (2017). High-efficiency heat pump systems. *Scientific Reports*, 7, 40437.
- Wang, X., et al. (2024). Atmospheric water harvesting: Fundamentals and applications. *Energy*, 280, 128186.
- Yang, J., Zhang, X., Qu, H., et al. (2020). Moisture-harvesting copper complex. *Advanced Materials*, 32, e2002936.
- Yang, Y., Roderick, M. L., Guo, H., et al. (2023). Evapotranspiration on a greening Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 626–641.
- Zavala, M. A. L., Cruz-Prieto, M. J., & Rojas, C. (2018). Rainwater harvesting as alternative water supply. *Water Science & Technology: Water Supply*, 18, 1946–1955.
- Zhang, S., Huang, J., Chen, Z., Lai, Y., (2017). Bioinspired special wettability surfaces: from fundamental research to water harvesting applications. *Small* 13, 1602992.
- Zhang Y., L. Wu, X. Wang, J. Yu, B. Ding (2020). *Nat. Commun.* 11, 3302.
- Zhang Z., Y. Wang, Z. Li, H. Fu, J. Huang, Z. Xu, Y. Lai, X. Qian, S. Zhang, ACS. (2022). *Appl. Mater. Interfaces* 2022, 14, 55295.
- Zhou, X., Lu, H., Zhao, F., & Yu, G. (2020a). Atmospheric water harvesting materials. *ACS Materials Letters*, 2, 671–684.
- Zhou, X., Zhang, P., Zhao, F., & Yu, G. (2020b). Super moisture absorbent gels for agriculture. *ACS Materials Letters*, 2, 1419–1422.
- Zhao, C., Li, P., Li, Z., Peng, S., 2023. Incorporation of superamphiphobic and slippery patterned materials for water

collection inspired by beetle, cactus, and Nepenthes. New J. Chem. 47, 1962–1972.

Zolfagharkhani, S., Zamen, M., & Shahmardan, M. M. (2018). Thermodynamic analysis of water production systems. *Energy Conversion and Management*, 170, 97–107.

Zou H., X. Yang, J. Zhu, F. Wang, Z. Zeng, C. Xiang, D. Huang, J. Li, R. Wang, Nat. Water 2024, 2, 663.

Wasti, T. Z., Sultan, M., Aleem, M., et al. (2022). Materials for adsorption-based water harvesting. *Advances in Mechanical Engineering*, 14, 1–27.

WHO, 2022. Drinking-Water <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

BÖLÜM 2

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM VE TARIMSAL MEKANİZASYONDA GELİŞMELER

MEHMET EMİN BİLGİLİ¹
ALİ AYBEK²

1. Giriş

Günümüzde artan dünya nüfusu, iklim değişikliği, doğal kaynakların sınırlılığı ve gıda arz güvenliği gibi küresel sorunlar, tarım sektöründe sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, hem bitkisel hem de hayvansal üretimde verimliliği artırırken çevresel etkileri minimize eden sürdürülebilir tarım yaklaşımları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Sürdürülebilir tarımın temel bileşenlerinden biri olan tarımsal mekanizasyon ise teknolojik gelişmeler doğrultusunda hızlı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir.

¹ Doç. Dr., Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Adana/Türkiye. Orcid: 0000-0002-4191-0540

² Prof. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye. Orcid: 0000-0003-3036-8204

Son yıllarda tarım makinalarında yaşanan teknolojik gelişmeler; yapay zekâ, büyük veri analitiği, bulut bilişim, nesnelerin interneti (IoT), otonom sistemler ve robotik uygulamalar gibi ileri teknolojilerin tarımsal üretim süreçlerine entegre edilmesiyle yeni bir boyut kazanmıştır. Bunun yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarının tarım makinalarında kullanımı ve akıllı tarım sistemlerinin yaygınlaşması, sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşılmasında önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu gelişmeler, tarımsal üretimde kaynak kullanımını optimize ederken üretim maliyetlerinin azaltılması ve verimliliğin artırılması açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır.

Öte yandan, küresel ölçekte tarım makinaları sektöründe yaşanan hızlı teknolojik dönüşüm ve pazar büyümesi, sektör içindeki rekabeti de önemli ölçüde artırmaktadır. Tarımsal mekanizasyon şirketleri ile teknoloji firmaları arasındaki iş birlikleri ve entegrasyon süreçleri, sektördeki yeniliklerin hızla yayılmasına katkı sağlarken aynı zamanda pazar dinamiklerini de yeniden şekillendirmektedir. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkeler açısından teknolojiye uyum ve rekabet gücü bakımından önemli bir süreç olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye’de de tarımsal mekanizasyon ve akıllı tarım teknolojileri alanında önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Birçok tarım makinaları üreticisi küresel teknolojik dönüşüme uyum sağlamak amacıyla Ar-Ge faaliyetlerine yönelmekte ve yeni nesil teknolojileri üretim süreçlerine entegre etmektedir. Bununla birlikte yükseköğretim kurumlarında da bu alana yönelik akademik çalışmalar ve eğitim faaliyetleri hız kazanmıştır. Nitekim Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından alınan karar doğrultusunda bazı üniversitelerde “Hassas Tarım ve Robotik Sistemler” alanında yeni bölümler açılmış ve bu alanlarda araştırma ve eğitim faaliyetleri başlatılmıştır.

Bu çalışmada, dünyada ve Türkiye’de sürdürülebilir tarım kapsamında tarım makinalarında yaşanan teknolojik gelişmeler ele alınmakta; bu gelişmelerin üreticiler ve çiftçiler üzerindeki etkileri, teknoloji kullanımına yönelik eğilimler ve benimseme süreçleri değerlendirilmektedir. Ayrıca söz konusu teknolojilerin tarımsal üretimde sağladığı potansiyel faydalar incelenerek, konu ile ilgili araştırmacılara, politika yapıcılara, tarım makinaları üreticilerine ve sektör paydaşlarına katkı sağlayabilecek bir değerlendirme sunulması amaçlanmaktadır.

2. Teknolojik Gelişmelerde Bazı Süreçler

Gelişmiş teknolojilerin tarım makinalarına entegrasyonu ile birlikte otomasyon uygulamaları hız kazanmış ve bu durum sürdürülebilir tarım uygulamalarında önemli bir dönüşüm sürecini beraberinde getirmiştir. Günümüzde tarım makinalarında kullanılan ileri teknolojiler, üretim süreçlerinin daha hassas, verimli ve çevre dostu şekilde yönetilmesine olanak sağlamaktadır. Bu dönüşümün temelini oluşturan teknolojiler arasında çok kaynaklı konumlandırma bütünleştirme yöntemleri, çok spektrumlu görüntüleme sistemleri, yapay zekâ destekli veri analizi, modüler robotik sistemler ve biyolojik ilhamlı algoritmalar yer almaktadır.

Çok kaynaklı konumlandırma bütünleştirme; GPS, kamera, LiDAR ve IMU (atalet ölçüm birimi) gibi farklı sensörlerden elde edilen verilerin bir araya getirilerek tek bir sensörün sınırlamalarını aşan, daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlayan konum tahminlerinin elde edilmesi sürecini ifade etmektedir. Bununla birlikte çok spektrumlu görüntüleme teknolojileri ve derin öğrenme algoritmalarını kullanan akıllı algılama sistemleri, bitki sağlığının izlenmesi, yabancı otların tespiti ve hedefe yönelik tarımsal uygulamaların gerçekleştirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Görüntü işleme tabanlı karar destek sistemleri kullanılarak geliştirilen değişken düzeyli ilaçlama uygulamaları, bitki örtüsünün mekansal değişkenliğini dikkate alarak yalnızca ihtiyaç duyulan

bölgelere hassas püskürtme yapılmasına imkan tanımakta ve kimyasal kullanımını önemli ölçüde azaltmaktadır (Saleem ve ark., 2023; Tewari ve ark., 2021; Karadöl ve ark., 2020).

Modüler robotik sistemler ve biyolojik ilhamlı algoritmalar aracılığıyla geliştirilen adaptif kontrol sistemleri ise değişken tarla koşullarına uyum sağlayabilen esnek üretim süreçlerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca yapay zekâ destekli veri analizi sayesinde kaynak kullanımının optimize edilmesi, üretim planlamasının daha etkin bir şekilde yapılması ve karar destek sistemlerinin geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir.

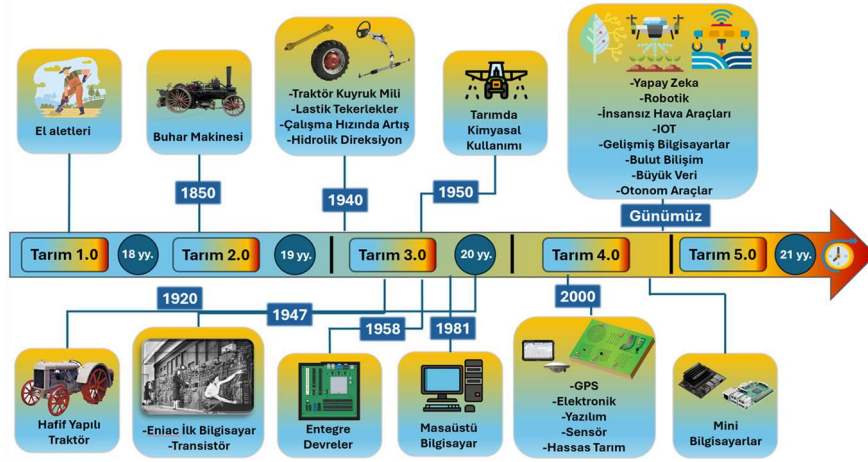
Söz konusu teknolojik gelişmeler birçok uygulama alanında somut sonuçlar ortaya koymaktadır. Örneğin, günümüzde geliştirilen otonom tarla makinalarında yanal navigasyon hatalarının 6 cm'nin altına kadar düşürülebildiği bildirilmektedir. Benzer şekilde, hedefe yönelik tarımsal ilaç uygulamaları gerçekleştirebilen insansız hava araçları (İHA) sayesinde pestisit kullanımında yaklaşık %40 oranında azalma sağlanabilmektedir. Akıllı sera sistemleri ise mikro iklim koşullarını $\pm 0,1$ °C hassasiyetle kontrol edebilmekte ve böylece bitki gelişimi için optimum üretim ortamı oluşturulabilmektedir. Bu teknolojik yenilikler; üretim verimliliğinin artırılmasına, su, gübre ve enerji gibi kritik kaynakların daha etkin kullanılmasına ve tarım sektöründe giderek artan işgücü eksikliğinin azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Bununla birlikte, söz konusu teknolojilerin yaygın olarak uygulanmasının önünde bazı önemli zorluklar da bulunmaktadır. Özellikle farklı tarım ortamlarında ortaya çıkan teknolojik heterojenlik, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri, dinamik saha koşullarına uyum sağlama konusundaki sınırlılıklar ve gelişmekte olan ülkelerde görülen teknoloji benimseme engelleri bu sürecin başlıca kısıtları arasında yer almaktadır. Bu nedenle gelecekteki gelişmelerin; temel bilgi işlem çözümlerinin geliştirilmesi, çoklu

enerji tamamlayıcı sistemlerin (güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyoenerji gibi) entegrasyonu, dağıtılmış ve paylaşımcı kontrol sistemlerinin oluşturulması ile yapay zekâ tabanlı optimizasyon yaklaşımlarının hayvancılıkta sürü yönetimi gibi uygulamalara uyarlanması gibi alanlara odaklanması gerekmektedir. Bu teknolojilerin küresel ölçekte etkin bir şekilde uygulanabilmesi için teknolojik evrim süreçlerinin ve disiplinler arası iş birliklerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi, aynı zamanda sıfır açlık ve sorumlu üretim hedeflerini içeren “Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri” ile uyumlu tarımsal yenilik stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Jiang & ark., 2025).

Tarımdaki mekanizasyon gelişimi tarihsel süreç içerisinde yaklaşık iki yüzyıllık bir zaman diliminde önemli değişimler göstermiştir. Yapılan çalışmalar, bu gelişim sürecinin genellikle Tarım 1.0’dan Tarım 5.0’a kadar uzanan beş temel aşama çerçevesinde değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. Bu aşamalar, tarımsal üretimde mekanizasyon düzeyinin artması, dijital teknolojilerin entegrasyonu ve akıllı üretim sistemlerinin gelişmesi ile karakterize edilmektedir. Tarımın teknolojik dönüşüm sürecine ilişkin önemli aşamalar Şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1. Tarım 5.0 a giden yolda önemli aşamalar



Son yıllarda yaşanan hızlı teknolojik gelişmeler doğrultusunda, tarım makinaları alanındaki ileri teknoloji uygulamalarının belirlenmesi ve geleceğe yönelik yol haritalarının oluşturulması amacıyla kapsamlı Ar-Ge faaliyetleri yürütülmektedir. Tarım makinaları sektöründe küresel ölçekte olumlu büyüme verileri gözlenmekle birlikte, sektörün büyüme hızının zaman zaman girdi maliyetlerindeki artışlar nedeniyle dalgalanmalar gösterdiği görülmektedir. Özellikle yeni teknolojilerin makina üretim maliyetlerini artırması, satış hacimleri üzerinde sınırlayıcı bir etki yaratabilmektedir. Bununla birlikte tarımsal mekanizasyon sektörü ile teknoloji şirketleri arasındaki entegrasyonun giderek artması, pazar dinamiklerinin ve geleceğe yönelik tahminlerin farklılaşmasına yol açan önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

3. Teknolojik Süreçlerde Güncel En Önemli Eğilimler (Trendler)

Günümüzde sürdürülebilir tarım ve tarımsal mekanizasyon alanında yaşanan teknolojik dönüşüm, üretim süreçlerini daha verimli, çevreye duyarlı ve veri odaklı hale getirmektedir. Tarım sektöründe ortaya çıkan bu dönüşüm doğrultusunda, özellikle son yıllarda sürdürülebilir üretim hedeflerini destekleyen bazı temel eğilimler ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir tarım ve mekanizasyon alanında dört temel teknolojik eğilim (trend) dikkat çekmektedir.

Trend 1: Sürdürülebilir Tarım ve Mekanizasyon

Doğal kaynakların giderek azalması, su kaynaklarına erişimde yaşanan zorluklar ve toprak kalitesinde meydana gelen bozulmalar, tarım makinaları üreticilerini daha gelişmiş ve çevreye duyarlı teknolojiler geliştirmeye yönlendirmektedir. Tarımsal üretimde verimliliğin artırılması ve kaynak kullanımının optimize

edilmesi, önümüzdeki yıllarda da sektörde belirleyici eğilimlerden biri olmaya devam edecektir.

Küresel ölçekte artan nüfus ve buna bağlı olarak yükselen gıda talebi, tarımsal üretimin sürdürülebilir yöntemlerle gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak tarımsal faaliyetlerin çevresel etkileri dikkate alındığında, bu talebin karşılanması giderek daha karmaşık bir süreç haline gelmektedir. Bu nedenle tarım makinaları sektöründe önemli bir teknolojik dönüşüm yaşanması beklenmektedir. Bu dönüşüm kapsamında daha önce sınırlı düzeyde kullanılan veya henüz yaygınlaşmamış bazı ekipman ve teknolojilerin ön plana çıkacağı öngörülmektedir.

Birçok ülkede hükümetler, sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemek amacıyla tarım ekipmanlarında teknoloji kullanımını teşvik eden politika ve destek mekanizmaları geliştirmektedir. Tarım sektörü, birçok ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınma stratejilerinde öncelikli alanlardan biri olarak görülmekte; gıda güvenliği, kırsal kalkınma ve sanayi sektörleriyle olan güçlü bağlantıları nedeniyle stratejik önem taşımaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir tarım ekipmanlarının geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Benzer şekilde Türkiye’de de tarım politikalarının sürdürülebilir mekanizasyon teknolojilerini destekleyecek şekilde geliştirilmesi önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Trend 2: Hassas Tarım Teknolojilerinin Yaygınlaşması

Tarım makinaları sektörü, teknolojik yeniliklerin uygulanması açısından öncü sektörlerden biri haline gelmiştir. Bu bağlamda hassas tarım teknolojilerinin giderek daha yaygın bir şekilde benimsenmesi dikkat çekici bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. Her ne kadar bu teknolojilerin uygulanması belirli düzeyde yatırım maliyetleri gerektirse ve ileri teknoloji ekipmanlarının kullanımında teknik bilgi ihtiyacı bulunsa da, birçok

Üretici bu dönüşüme uyum sağlamaya başlamıştır. Dijitalleşme ve otomasyon temelli tarımsal mekanizasyon çözümleri, üretim süreçlerinde hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır (Zhang & ark., 2002; Wolfert & ark., 2017).

Traktör hız bilgisine bağlı oransal doz ayarlama sistemleri, uydu tabanlı konumlandırma sistemleri ve insansız hava araçları gibi teknolojiler sayesinde çiftçiler üretim alanlarını daha detaylı bir şekilde izleyebilmekte, bitki gelişimi, toprak özellikleri ve çevresel koşullar hakkında daha kapsamlı veri elde edebilmektedir (Karadöl % ark., 2024; Zhang & Kovacs, 2012; Gebbers & Adamchuk, 2010). Bu veriler; verimlilik artışı, girdi kullanımının optimize edilmesi ve üretim planlamasının daha etkin yapılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Elde edilen veri setleri aynı zamanda ürün dağılımı, toprak verimliliği ve üretim performansının iyileştirilmesine yönelik stratejik kararların alınmasına da katkı sunmaktadır.

Bu bağlamda hassas tarım uygulamaları geleceğin tarım üretim modellerinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Veriye dayalı yönetim anlayışı, değişken oranlı uygulamalar ve akıllı ilaçlama teknolojileri sayesinde hem üretim maliyetleri azalmakta hem de çevresel etkiler sınırlandırılmaktadır. Tarımsal uygulama teknolojilerindeki sürekli gelişim, günümüz tüketici taleplerini karşılamak ve yeterli gıda arzını güvence altına almak açısından kritik öneme sahip geniş bir teknoloji yelpazesinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Türkiye’de de özellikle son yirmi yıl içerisinde bu alanda önemli gelişmeler kaydedilmiş ve hassas tarım teknolojilerinin kullanımı giderek artmıştır. Ulusal ölçekte yürütülen mekanizasyon ve dijital tarım yatırımları, üretimde modern teknolojilerin yaygınlaşmasını hızlandırmıştır (Akdemir, 2019).

Trend 3: Tarımda Robotik Sistemlerin Kullanımı

Robotik teknolojiler, tarım makinaları alanında giderek daha fazla önem kazanan bir diğer gelişme alanıdır. Günümüzde robotik uygulamaların yaygın kullanımı çoğunlukla büyük ölçekli işletmelerle sınırlı olsa da, teknolojik gelişmelerin ilerlemesiyle birlikte bu sistemlerin daha geniş kullanım alanlarına yayılması beklenmektedir.

Birçok ülkede tarım makinalarının fiziksel büyüklüğü ve kapasitesi belirli bir sınır seviyesine ulaşmış durumdadır. Bu durum, mekanik büyüme yerine dijital ve akıllı sistemlere dayalı yeni teknolojik yönelimlerin ön plana çıkmasına neden olmuştur. Bu kapsamda makine öğrenmesi ve yapay zekâ uygulamalarıyla desteklenen robotik sistemler, tarımsal operasyonların daha hassas ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Robotik sistemler; ekim, bakım, hasat ve ürün izleme gibi çeşitli tarımsal faaliyetlerin otomatik olarak gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu sistemlerin 7/24 kesintisiz çalışabilmesi, üretim süreçlerinin hızlandırılması ve işgücü maliyetlerinin azaltılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca küresel pazarlarda artan gıda talebi ve sektördeki yoğun rekabet, üreticileri verimlilik artırıcı robotik çözümleri benimsemeye yönlendirmektedir. Bu bağlamda Türkiye’de de robotik ve akıllı tarım teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik önemli akademik ve kurumsal girişimler bulunmaktadır. Nitekim Yükseköğretim Kurulu tarafından bazı üniversitelerde hassas tarım ve robotik sistemler alanında eğitim ve araştırma faaliyetleri başlatılmıştır.

Trend 4: Uzaktan Yönetim ve Dijital Çözümler

Tarım sektöründe dijitalleşmenin hız kazanmasıyla birlikte uzaktan yönetim ve veri tabanlı çalışma modelleri de önem kazanmaktadır. Gelişmiş iletişim teknolojileri ve veri paylaşım

platformları sayesinde tarımsal üretim süreçlerinin uzaktan izlenmesi ve yönetilmesi mümkün hale gelmektedir.

Otonom sistemler, bulut tabanlı veri yönetimi ve uzaktan kontrol teknolojileri sayesinde üretim süreçlerinde daha esnek ve verimli yönetim modelleri geliştirilebilmektedir. Bu sistemler, çiftçilere ve tarım işletmelerine üretim süreçlerini gerçek zamanlı olarak takip etme, analiz etme ve optimize etme imkânı sunmaktadır. Ayrıca dijital platformlar aracılığıyla veri paylaşımı ve uzaktan karar destek sistemlerinin kullanılması, üretim yönetiminde yeni yaklaşımların ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır.

Bu teknolojik altyapı hem bitkisel üretim hem de hayvansal üretim sistemlerinde de etkin biçimde kullanılmaktadır. Bu üretim sistemlerinde sensör ağları ve bulut tabanlı kontrol platformları kullanılarak çevresel koşullar (sıcaklık, bağıl nem, ışık şiddeti, CO₂ seviyesi ve sulama parametreleri vb.) gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve otomatik olarak optimize edilebilmektedir (Gupta & ark., 2025; Ahmed & ark., 2022; Karadöl & ark., 2020; Li & ark., 2015). Bu sistemler üretim sürekliliğini artırırken enerji ve su kullanım verimliliğinin iyileştirilmesine de katkı sağlamaktadır.

Bu gelişmeler doğrultusunda birçok sektörde olduğu gibi tarım sektöründe de uzaktan çalışma ve uzaktan yönetim çözümlerinin daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Türkiye’de de tarımsal mekanizasyon alanında çalışan araştırmacılar ve sektör temsilcileri, farklı disiplinlerle iş birliği içerisinde bu teknolojilerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütmektedir. Dijital tarım ekosisteminin güçlendirilmesi; üretim verimliliği, kaynak kullanım etkinliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından stratejik önem taşımaktadır.

4. Tarım Makinalarında Güncel Teknolojilerin Karşılaştırılması

Tarım makinaları sektörü yalnızca modern teknolojilere uyum sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda küresel gıda güvenliği ve iklimle duyarlı tarım uygulamalarının geleceğini şekillendiren önemli bir alan olarak öne çıkmaktadır. Tarımsal üretimde verimliliğin artırılması, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi amacıyla geliştirilen yeni teknolojiler, sektörün dönüşümünde belirleyici rol oynamaktadır.

2025 yılı itibarıyla tarım makinaları alanında öne çıkan altı önemli teknolojik yenilik belirlenmiş ve bu teknolojiler belirli değerlendirme kriterleri çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Söz konusu teknolojiler; işlevsellik, tahmini verimlilik artışı (%), çevresel etki, otomasyon seviyesi ve tahmini piyasa benimseme oranı gibi beş temel kriter kapsamında analiz edilmiştir. Bu kriterler doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, ilgili teknolojilerin tarımsal üretim süreçleri üzerindeki potansiyel etkilerini ve sektördeki önem derecelerini ortaya koymaktadır. Bu karşılaştırmalı değerlendirmeye ilişkin bulgular Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Tarım makinalarında önemli yeniliklerin karşılaştırma tablosu

Yenilik (Inovasyon) Adı	İşlevsellik	Tahmini Verimlilik Artışı (%)	Çevresel Etki	Otomasyon Seviyesi	Tahmini Piyasa Benimsenme Oranı (2025)
Yapay Zekâ Destekli Traktörler	Otonom navigasyon, gerçek zamanlı toprak ve mahsul izleme, VRT uygulaması	%15-25	Yakıt tüketimini azaltır, sıkıştırılmayı düşürür, girdileri optimize eder.	Yarı özerk /Özerk	Yüksek
Otonom Drone'lar	Havadan görüntüleme, girdi ilaçlaması,	%10-20	Kimyasal kullanımının azaltılması, sorunların erken tespiti	Tamamen otonom	Orta-Yüksek

	bitki sağlığı gözlemi				
Hassas Tohum Ekme Makinaları (VRT)	Toprak/ürün analizi kullanılarak alana özğü tohum ekimi	%15-20	Tohum ve gübre atıklarını azaltır.	Yarı özerk	Ilıman
Elektrikli Traktörler ve Hasat Makinaları	Sıfır egzoz emisyonu, hafif tasarım	%10-15	Sıfıra yakın emisyon, daha az sıkıştırma	Yarı otomatik	Orta- Hızlanan
Bağlantılı Sulama Kontrol Cihazları	Otomatik nem, hava ve besin algılama ve kontrolü	%10-18	Su tüketiminde önemli azalma	Yarı otonom /Tam otomatik	Yüksek
Blok Zinciri İzlenebilirlik Araçları	Makina kayıtlarının tutulması, mevzuata uyum, yaşam döngüsü takibi	—	Şeffaflığı sağlar, dolandırıcılığı azaltır.	Otomatik	

Kaynak: URL, 2025a

4. Türkiye’de Tarım Alanları, Hayvancılık ve Tarım Makinalarının Güncel Görünümü

Tarım ve Türkiye’de tarımsal üretim potansiyeli, sahip olduğu geniş arazi varlığı ve uygun agro-ekolojik koşullar sayesinde önemli bir düzeydedir. Tarım ve Orman Bakanlığı ile Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ)’nin 2023 yılı faaliyet raporuna göre Türkiye’nin yaklaşık 78 milyon hektar olan toplam yüzölçümünün yaklaşık üçte birini oluşturan 24 milyon hektarlık alan ekilebilir tarım arazisi niteliğindedir. Bu alanın ekonomik olarak sulanabilir kısmı yaklaşık 8,5 milyon hektar olarak belirlenmiştir. Ülkemizde ekonomik olarak sulanabilecek 8,5 milyon hektarlık tarım alanının yaklaşık %83,5’inin sulanabildiği belirtilmektedir.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, kuruluşundan günümüze kadar söz konusu 8,5 milyon hektarlık sulanabilir tarım alanının yaklaşık %56,6'sını suya kavuşturmuştur. Bu kapsamda sulamaya açılan 4,81 milyon hektarlık alan, Türkiye'nin toplam tarım alanının (24 milyon hektar) yaklaşık %20,04'ünü oluşturmaktadır. 2023 yılı sonu itibarıyla diğer kurumlar tarafından gerçekleştirilen sulama yatırımlarıyla birlikte toplam sulanan tarım alanı yaklaşık 7,1 milyon hektara ulaşmıştır (URL, 2025b). Bu büyüklükteki tarım alanlarının dijital tarım teknolojileri ve akıllı sulama sistemleri ile yönetilmesi, sürdürülebilir toprak ve su kaynakları kullanımının sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu tür dijital kontrol sistemleri, üretim süreçlerinin daha etkin yönetilmesine katkı sağlayarak ürün kayıplarının azaltılmasına da yardımcı olabilmektedir.

Türkiye'de hayvancılık sektörü de tarımsal üretimin önemli bileşenlerinden biridir. Tarım ve Orman Bakanlığı (TOB)'nın 2025 yılı verilerine göre büyükbaş hayvan varlığı içerisinde sığır sayısı 17 milyon 544 bin 200 baş, manda sayısı ise 164 bin 785 baş olarak belirlenmiştir. Küçükbaş hayvancılıkta ise koyun sayısı 46 milyon 688 bin 813 baş, keçi sayısı ise 11 milyon 185 bin 505 baş olarak kaydedilmiştir (URL, 2025c). Bu veriler, Türkiye'nin hayvansal üretim potansiyelinin önemli bir büyüklüğe sahip olduğunu ve sürdürülebilir hayvancılık yönetimi açısından teknolojik çözümlerin giderek daha fazla önem kazandığını göstermektedir.

Tarım sektöründe dijitalleşme sürecinin hız kazanmasıyla birlikte üreticiler, akıllı teknolojileri kullanarak üretim süreçlerini daha etkin şekilde yönetmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda akıllı araç takip sistemleri, traktör ve hasat makinalarının operasyonel performansını izlemek, yakıt tüketimini kontrol etmek ve tarımsal faaliyetlerin verimliliğini artırmak amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Traktör ve hasat makinalarında kullanılan bu tür

dijital takip çözümleri, modern tarım uygulamalarının önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

Türkiye genelinde tarım makinalarında kullanılan dijital takip sistemlerinin kullanım oranına ilişkin resmi ve kapsamlı bir istatistik bulunmamaktadır. Bununla birlikte özellikle büyük ölçekli tarım işletmeleri ve profesyonel üreticiler arasında traktör ve biçerdöverlerde yakıt tüketimi izleme, iş verimliliği analizi ve GPS tabanlı rota takibi gibi teknolojilerin kullanımının giderek arttığı gözlenmektedir. Bu sistemlerin kullanım oranının söz konusu işletmelerde yaklaşık %10-20 seviyelerine ulaştığı tahmin edilmekle birlikte, Türkiye’deki toplam traktör parkı dikkate alındığında bu oranın henüz sınırlı düzeyde olduğu değerlendirilmektedir.

Son yıllarda tarımsal üretimde insansız hava araçlarının (drone) kullanımı da dikkat çekici bir gelişme olarak ortaya çıkmaktadır. “Tarımsal üretimde dron teknolojisi ve Türkiye’deki bazı uygulamaları” başlıklı çalışmada, özellikle Doğu Akdeniz Bölgesi’nde drone teknolojisinin bitki koruma uygulamaları, ürün izleme ve verimlilik artırma açısından önemli katkılar sağladığı ifade edilmektedir (Bilgili & Aybek, 2025). Bu teknolojilerin kullanımı sayesinde hem girdi maliyetlerinin azaltılması hem de üretim süreçlerinin daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi mümkün hale gelmektedir.

Türkiye’de tarımsal mekanizasyon düzeyinin değerlendirilmesinde tarım alet ve makina parkının büyüklüğü önemli bir göstergedir (Aybek ve ark., 2021). 2024–2025 yılları arasındaki verilere göre Türkiye’deki tarım alet ve makina varlığı 2024 yılına kıyasla 2025 yılında %2,82 oranında artarak 13 460 339 adede ulaşmıştır. Aynı dönemde toplam traktör sayısı bir önceki yıla göre %0,7 oranında artış göstererek 1 milyon 610 bin 133 adet olarak kaydedilmiştir. Biçerdöver sayısı 21 bin 116 adet olarak belirlenirken, diğer tarım alet ve makinalarının sayısı ise 11 milyon 829 bin 090 adet olarak gerçekleşmiştir (URL, 2025d). Türkiye’deki

tarım alet ve makina parkına ilişkin bu veriler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Tarımsal alet ve makina sayıları, 2024-2025

Cinsi	2024 (Adet)	2025 (Adet)	Değişim (%)
Traktör	1 598 659	1 610 133	0,7
Biçerdöver	20 783	21 116	1,6
Diğer	11 471 579	11 829 090	3,1
Toplam	13 091 021	13 460 339	2,8

Kaynak: URL, 2025d

Türkiye’de, 35-70 beygir gücü arası olan traktör sayıları, toplam traktör sayılarının %71’ini oluşturmaktadır. Traktör sayısı son 10 yılda %28 artmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Gücüne (BG) göre traktör sayıları

Traktör tipi ve gücü	Sayı (Adet)	Oran (%)
Paletli (Tırtıllı)	130	0,0
Tek Akslı (1-5 BG)	21 971	1,3
Tek Akslı (5 BG'den fazla)	92 850	5,8
İki Akslı (1-10 BG)	6 565	0,4
İki Akslı (11-24 BG)	19 485	1,2
İki Akslı (25-34 BG)	67 259	4,2
İki Akslı (35-50 BG)	532 215	33,1
İki Akslı (51-70 BG)	602 940	37,4
İki Akslı (70 BG'den fazla)	266 718	16,6
Toplam	1 610 133	100,0

Kaynak: URL, 2025d

Türkiye’de, 10 yaş ve altı biçerdöver sayıları toplam biçerdöver sayılarının %49,3’ünü oluşturmaktadır. Biçerdöver sayısı son 10 yılda %32 oranında artmıştır (Tablo 4).

Tablo 4. Yaşına göre biçerdöver sayıları

Biçerdöver yaşı	Adet	Pay %
0-5	5 290	25,1
6-10	5 124	24,3
11-20	5 314	25,2
21 Yaş ve Üzeri	5 388	25,5
TOPLAM	21 116	100,0

Kaynak: URL, 2025d

Tarım makinalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve takip sistemleri; traktör, biçerdöver ve akıllı ekipmanların konumunu, çalışma verimini ve rota hassasiyetini anlık izleyerek %30'a varan girdi tasarrufu (gübre, tohum, ilaç) ve %20-40 arası operasyonel verimlilik artışı sağladığı bilinmektedir. CBS; konum bilgisiyle ilişkili verilerin toplanmasını, depolanmasını, analiz edilmesini, yönetilmesini ve görselleştirilmesini sağlayan bütünleşik sistemlerdir (Şekil 2). Ayrıca, küresel konumlandırma sistemleri (GNSS), uzaktan algılama verileri ve sensör tabanlı ölçümler CBS ortamında bütünleştirilerek ekim, gübreleme, sulama ve ilaçlama işlemleri mekansal değişkenliğe göre optimize edilebilmektedir (Mathenge & ark., 2022; Zhang & ark., 2019; Wilson 1999).

Şekil 2. Hassas tarımda dijital teknoloji kullanım alanları



Kaynak: URL, 2025e

Otomatik dümenleme (OD) sistemleri, tarla sürümü ve ekim işlemleri sırasında makinaların belirlenen hat üzerinde doğru bir şekilde ilerlemesini sağlayarak, arazinin şekline ve kontur yapısına uygun hareket edebilme kabiliyeti sunmaktadır. Geleneksel markör sistemlerinde istikamet hatası yaklaşık %10 düzeyinde iken, otomatik dümenleme sistemlerinde bu hata oranı %1,5-5 aralığına kadar düşmektedir.

Tarımsal üretimde özellikle üst üste bindirmeler ve işlenmemiş alanların oluşması, önemli düzeyde girdi kayıplarına neden olmaktadır. Örneğin şeker pancarı üretiminde, örtüşmeler ve boşluklardan kaynaklanan toplam girdi kaybının yaklaşık %13 seviyesinde olduğu bilinmektedir. Otomatik dümenleme teknolojilerinin kullanılmasıyla birlikte yakıt, ilaç, tohum, gübre, işçilik ve zaman gibi temel üretim girdilerinde %5-30 arasında tasarruf sağlanabildiği bildirilmektedir (URL, 2025g).

5. 2025 Yılında Tarımı Dönüştüren En İyi 10 Tarım Ekipmanı İnovasyonu

Tarım ekipmanlarında yaşanan teknolojik gelişmeler, tarımsal üretim uygulamalarında önemli bir dönüşüm sürecini beraberinde getirmektedir. Günümüzde geliştirilen yenilikçi teknolojiler yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çiftçilerin tarımsal işletmelerini yönetme biçimlerini de köklü bir şekilde değiştirmektedir. Bu teknolojik yenilikler; üretim süreçlerinin daha etkin yönetilmesini, işçilik maliyetlerinin azaltılmasını ve tarımsal üretimin genel verimliliğinin artırılmasını hedeflemektedir. Böylece artan küresel gıda talebinin sürdürülebilir bir şekilde karşılanmasına önemli katkılar sağlanmaktadır.

Tarım sektöründe dönüşüm yaratma potansiyeline sahip olan ve “en önemli 10 tarım ekipmanı inovasyonu” olarak değerlendirilebilecek teknolojiler; otonom makinalardan hassas tarım araçlarına kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Bu yeniliklerin her biri, modern tarım işletmelerinin karşı karşıya olduğu işgücü yetersizliği, kaynak verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi temel sorunlara çözüm üretmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu bağlamda söz konusu teknolojilerin incelenmesi, tarım ekipmanlarının tarımsal üretimde ilerlemeyi desteklemedeki rolünü ve gelecek nesiller için gıda güvenliğinin sağlanmasına yönelik katkılarını ortaya koyması açısından önem taşımaktadır. Ayrıca bu teknolojilerin yalnızca verimlilik artışı sağlamadığı, aynı

zamanda daha sürdürülebilir ve dayanıklı bir tarım sisteminin oluşturulmasına da katkıda bulunduğu görülmektedir (URL, 2025h).

Otonom Traktörlerin Yükselişi: Tarlalarda Verimlilik ve Hassasiyetin Artırılması

Tarım sektöründe teknolojinin hızla gelişmesi, otonom traktörlerin öncülük ettiği yeni bir üretim döneminin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Otonom traktörler, insan müdahalesine ihtiyaç duymadan çalışabilecek şekilde tasarlanmış olup gelişmiş sensör sistemleri, uydu tabanlı konumlandırma teknolojileri ve yapay zekâ algoritmaları ile donatılmıştır. Bu sistemler sayesinde tarımsal faaliyetler daha yüksek hassasiyetle gerçekleştirilebilmekte ve üretim süreçleri önemli ölçüde optimize edilebilmektedir.

Otonom traktörlerin en önemli avantajlarından biri, günün 24 saati kesintisiz çalışabilme kapasitesidir. Bu durum özellikle ekim, bakım, hasat ve ürün izleme gibi faaliyetlerde iş gücü ihtiyacının azaltılmasına ve operasyonel verimliliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu teknolojinin kullanımı sayesinde çiftçiler, işçilik maliyetlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlarken aynı zamanda üretim süreçlerinin daha planlı ve etkin bir şekilde yürütülmesini sağlayabilmektedir.

Otonom traktörler sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesine de önemli katkılar sunmaktadır. GPS tabanlı konumlandırma sistemleri ve veri analizi araçları ile donatılan bu makineler; tohum, gübre ve su gibi girdilerin doğru miktarlarda ve doğru zamanlarda uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Bu hedef odaklı uygulama yaklaşımı, girdi kullanımındaki israfın azaltılmasına ve geleneksel tarım uygulamalarının çevresel etkilerinin minimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte tarımsal üretimin daha verimli, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşması beklenmektedir.

Bitki Yönetiminde Yeni Yaklaşımlar: Akıllı Sensörler ve Gerçek Zamanlı Veri Analizi

Tarım teknolojilerinde yaşanan gelişmeler doğrultusunda akıllı sensör sistemleri ve gerçek zamanlı veri analizi uygulamaları, ürün yönetiminde önemli yenilikler ortaya koymaktadır. Bu sistemler sayesinde çiftçiler, üretim alanlarını yüksek hassasiyetle izleyebilmekte ve toprak sağlığı, nem düzeyi, sıcaklık değişimleri ve bitki gelişimi gibi önemli parametreler hakkında kapsamlı veri elde edebilmektedir.

Farklı sensör sistemlerinden elde edilen verilerin analiz edilmesi sayesinde sulama, gübreleme ve bitki koruma uygulamalarına ilişkin kararlar daha bilimsel ve veri temelli bir şekilde alınabilmektedir. Bu durum hem üretim verimliliğinin artırılmasına hem de kaynak kullanımının optimize edilmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

Gerçek zamanlı veri analizi uygulamaları, aynı zamanda hastalık riskleri veya olumsuz çevresel koşullar nedeniyle ortaya çıkabilecek potansiyel kayıpların azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. Örneğin sensör sistemleri sıcaklık veya nem seviyelerinde bitki gelişimini olumsuz etkileyebilecek bir anormallik tespit ettiğinde, üreticiler hızlı bir şekilde müdahale ederek gerekli önlemleri alabilmektedir. Bu proaktif yönetim yaklaşımı yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesine de katkı sağlamaktadır.

Sürdürülebilir Tarım Çözümleri: Yenilenebilir Enerji Kullanımındaki Yenilikler

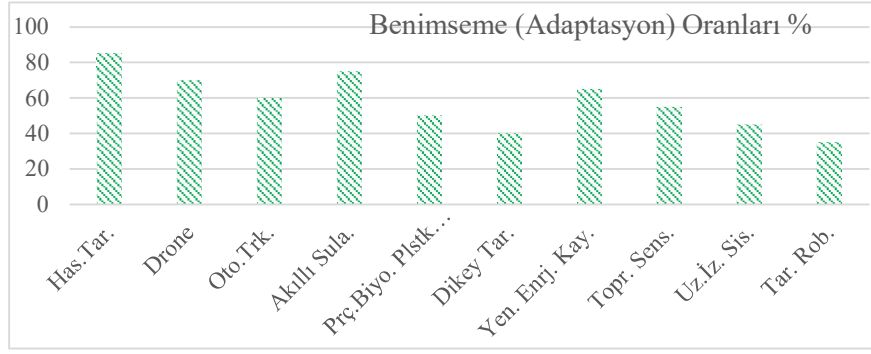
Son yıllarda tarım sektöründe sürdürülebilir üretim sistemlerine yönelik ilgi giderek artmaktadır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarının tarım uygulamalarında kullanımı önemli bir gelişme alanı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle 2025 yılı

itibarıyla birçok çiftçi, sulama sistemleri ve tarım ekipmanlarının çalıştırılmasında güneş enerjisi sistemlerinden yararlanmaya başlamıştır. Güneş enerjisi kullanımının yaygınlaşması, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltırken aynı zamanda işletme maliyetlerinin düşürülmesine de katkı sağlamaktadır.

Bunun yanı sıra küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin tarım işletmelerinde kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Çiftliklerde elektrik üretimi amacıyla kurulan bu sistemler, tarım işletmelerinin enerji ihtiyacını karşılamada sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Bu gelişmeler sayesinde çiftçiler enerji açısından daha bağımsız hale gelmekte, karbon emisyonlarını azaltmakta ve tarımsal üretim faaliyetlerinin çevresel sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

Sürdürülebilir tarım çözümlerine yönelik teknolojilerin benimsenme oranları incelendiğinde, hassas tarım uygulamalarının %85 ile ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Bunu sırasıyla akıllı sulama sistemleri (%75), insansız hava araçları veya drone teknolojileri (%70), yenilenebilir enerji kaynakları (%65), otonom traktörler (%60), toprak sensörleri (%55), biyolojik olarak parçalanabilir ekipman ve plastikler (%50), uzaktan izleme sistemleri (%45) ve dikey tarım uygulamaları (%40) izlemektedir. Tarım robotları ise %35'lik benimsenme oranı ile bu sıralamada yer almaktadır. Söz konusu teknolojilerin benimsenme oranları Şekil 3'te gösterilmektedir.

Şekil 3. Sürdürülebilir tarım çözümlerindeki yeniliklerin benimsenme oranı



Kaynak: URL, 2025h

Yapay Zekâ Destekli Analitiğin Verim Tahmini ve Karar Verme Süreçleri Üzerindeki Etkisi

Tarım sektöründe yapay zekâ destekli analitik sistemlerin kullanımı, verim tahmini ve karar alma süreçlerinde önemli dönüşümler yaratmaktadır. Özellikle hassas tarım uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte çiftçiler, üretim süreçlerini yönetirken gerçek zamanlı veri analitiğinden daha etkin biçimde yararlanabilmektedir. Makine öğrenmesi algoritmaları sayesinde tarımsal üretime ilişkin büyük veri setleri analiz edilerek daha doğru ve güvenilir tahminler yapılabilmektedir. Bu durum, çiftçilerin ürün yönetimi, girdi kullanımı ve kaynak tahsisi gibi konularda daha bilinçli ve veri temelli kararlar almalarına olanak sağlamaktadır. Sonuç olarak bu teknolojiler, üretim verimliliğinin artırılmasına ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

Bunun yanı sıra yapay zekâ teknolojilerinin tarımsal üretim üzerindeki etkisi yalnızca verim tahmini ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda iklim değişikliğine karşı tarımsal sistemlerin dayanıklılığını artırmada da önemli bir rol oynamaktadır. İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin giderek artması,

Üreticilerin daha esnek ve uyarlanabilir üretim stratejileri geliştirmelerini gerekli kılmaktadır. Yapay zekâ tabanlı tahmine dayalı modelleme sistemleri, sıcaklık, yağış, toprak nemi ve diğerk çevresel değışkenleri analiz ederek üreticilere geleceğe yönelik öngörüler sunabilmektedir. Bu sayede çiftçiler üretim uygulamalarını önceden planlayarak olası iklim dalgalanmalarına karşı daha hızlı ve etkili önlemler alabilmektedir.

Bu tür uyarlanabilir ve veri odaklı yönetim yaklaşımları, iklim değışikliğinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla yapay zekâ teknolojileri, modern tarım uygulamalarında yalnızca üretim verimliliğini artıran bir araç olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve dirençli tarım sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlayan stratejik bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Bu gelişmeler sayesinde tarım sektörü, üretim performansını iyileştirirken aynı zamanda küresel ölçekte sürdürülebilirlik hedefleriyle daha uyumlu bir yapıya kavuşmaktadır. Tablo 5'te Yeni teknolojilerin (10 inovasyonun) tarımda etkisi ve geleceği hakkında bazı bilgiler sunulmuştur.

Tablo 5.Yeni teknolojilerin tarımda etkisi ve geleceği

No	İnovasyon	Tanım	Verim Tahmini zerindeki Etki	Karar Verme Geliştirme
1	Yapay Zekâ Destekli Toprak Analizi	Toprak sağlığını ve besin seviyelerini analiz etmek için makina öğreniminden yararlanır.	Toprak koşullarına bağlı olarak verim tahminlerinin doğruluğunu artırır.	Hedeflenen besin yönetimi kararlarını kolaylaştırır.
2	Hassas Sulama Sistemleri	Su kullanımını optimize eden akıllı sulama teknolojisi.	Optimum nem seviyelerini koruyarak ürün verimi tahminlerini iyileştirir.	Hava koşullarına bağlı olarak sulama miktarının zamanında ayarlanmasına olanak tanır.
3	Drone ile Bitki İzleme	Drone'lar havadan görüntüleme yoluyla	Mahsul verimini tahmin etmek için	Haşere ve hastalık tehditlerine hızlı

No	İnovasyon	Tanım	Verim Tahmini Üzerindeki Etki	Karar Verme Geliştirme
		mahsul sağlığı hakkında veri topluyor.	gerçek zamanlı veri sağlar.	müdahale imkânı sağlar.
4	Otomatik Dikim Sistemleri	Tohumların hassas bir şekilde yerleştirilmesi için robotik teknoloji.	Ekim verimliliğini en üst düzeye çıkararak daha iyi verim sonuçları elde edilmesini sağlar.	Tahminlere dayalı olarak ekim programlarının optimize edilmesine yardımcı olur.
5	Akıllı Gübre Uygulaması	Gübrelerin daha verimli uygulanması için sensörler ve yapay zekâ.	Besin alım oranlarını dikkate alarak tahmin modellerini iyileştirir.	Besin maddesi uygulama zamanlaması için veriye dayalı kararları destekler.
6	Tedarik Zinciri Şeffaflığı için Blockchain	Tarımsal tedarik zincirinde izlenebilirliği ve şeffaflığı sağlar.	Verim verilerinin doğruluğuna olan güveni artırır.	Gerçek zamanlı verilere dayalı olarak daha iyi pazarlama stratejileri geliştirilmesini kolaylaştırır.
7	Yapay Zekâ Destekli Haşere Tahmini	Veri analizi yoluyla zararlı böcek salgınlarını tahmin eder.	Çiftçilerin verim tahminlerini öngörmelerine ve buna göre uyarlamalarına olanak tanır.	Haşere kontrolüne ilişkin gerçek zamanlı karar alma süreçlerini iyileştirir.
8	İklim Uyumlu Tarım	İklim verilerine dayanarak tarım uygulamalarını düzenler.	Değişen iklim koşullarında verim tahminlerini iyileştirir.	Mahsul seçimi ve ekim zamanlaması konusunda bilinçli kararlar alınmasını destekler.
9	Uzaktan Algılama Teknolojisi	Mahsullerin durumuyla ilgili verileri uzaktan toplar.	Daha doğru verim tahminleri için bilgiler sunar.	Bitkisel ürün yönetimi için stratejik planlamaya yardımcı olur.
10	Dikey Tarım Teknolojileri	Kentsel ortamlarda tarımı mümkün kılan yenilikler.	Şehirde çiftçilik yapanlar için alternatif verim tahminleri sunar.	Kentsel tarımsal karar alma süreçleri için veri sağlar.

Kaynak: URL, 2025h

Yeni Nesil Sulama Sistemleri: Modern Tarım İşletmeleri İçin Su Tasarrufu Teknolojileri

Artan su kıtlığı ve iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkileri dikkate alındığında, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesi açısından sulama sistemlerinin modernizasyonu büyük önem taşımaktadır. Tarım sektörü küresel ölçekte su kaynaklarının en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Bu kapsamda damla sulama sistemleri ve akıllı sulama teknolojileri, su tasarrufu sağlamak amacıyla geliştirilen en önemli uygulamalar arasında yer almaktadır. Akıllı sulama teknolojileri, sulamada %50'den fazla tasarrufu ve %30-40 enerji tasarrufu sağlayabilmektedir (Esular, 2025). Akıllı vana kontrolleri, hava durumu sensörleri, toprak sensörleri, havuz su seviyesi sensörleri ve çeşitli denetleyiciler içerir. Sensör, mevcut hava koşullarını, havuz veya kuyu su seviyesini ölçer, toprak nemini izler, su vanasının açılıp kapanmasını kontrol eder.

Ayrıca, damla sulama sistemleri, suyun doğrudan bitki kök bölgesine iletilmesini sağlayarak geleneksel yüzey sulama yöntemlerine kıyasla su kullanımını %50'ye kadar azaltabilmektedir. Bunun yanı sıra sensör teknolojileri ve otomatik kontrol sistemlerinin sulama altyapılarına entegre edilmesi, çiftçilerin toprak nem düzeylerini gerçek zamanlı olarak izleyebilmesine olanak tanımakta ve sulama uygulamalarının daha hassas bir şekilde planlanmasını sağlamaktadır.

Geleneksel sulama yöntemlerine ek olarak toprak nem sensörleri, meteorolojik veriye dayalı sulama kontrolörleri ve veri tabanlı karar destek sistemleri gibi gelişmiş su yönetimi teknolojileri modern tarım işletmelerinde giderek daha yaygın hale gelmektedir. Dünya Bankası tarafından yayımlanan raporlara göre akıllı sulama sistemlerinin uygulanması, uygun koşullarda ürün veriminde %30'a kadar artış sağlayabilmektedir.

Öte yandan küresel nüfus artışı ve değişen tüketim alışkanlıkları, tarımsal üretim sistemleri üzerindeki baskıyı giderek artırmaktadır. Yapılan tahminlere göre artan dünya nüfusunun gıda ihtiyacını karşılayabilmek için 2050 yılına kadar küresel gıda üretiminin yaklaşık %68 oranında artırılması gerekmektedir (Marr, 2022). Bununla birlikte küresel orta sınıf nüfusunun artması, tahıl ve baklagil gibi temel gıda ürünlerine kıyasla et tüketimine olan talebin de yükselmesine neden olmaktadır. Bu durum tarımsal üretim sistemleri üzerinde ek bir baskı oluşturmaktadır.

Gıda talebindeki bu artışın karşılanması, özellikle küresel gıda sisteminin toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %26'sından sorumlu olduğu dikkate alındığında, çevresel açıdan önemli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu emisyonların yaklaşık %18,4'ü doğrudan tarım, ormancılık ve arazi kullanımından kaynaklanırken, geri kalan kısmı ise gıda ürünlerinin işlenmesi, ambalajlanması, soğutulması ve taşınması gibi süreçlerden ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle su tasarrufu sağlayan ve çevresel etkileri azaltan yeni nesil sulama teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, hem sürdürülebilir tarım uygulamalarının desteklenmesi hem de küresel iklim hedeflerine ulaşılması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Şekil 4. Akıllı sulama sistemleri



Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verilerine göre, dünya genelinde yılda yaklaşık iki milyon ton pestisit kullanılmasına rağmen küresel tarımsal üretimde %20–40 oranında ürün kaybı zararlılar ve bitki hastalıkları nedeniyle meydana gelmektedir. Robotik sistemler, insansız hava araçları (drone) ve akıllı algılama teknolojileri gibi yeni nesil tarım teknolojileri, zararlı ve hastalıkların daha erken aşamalarda tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede pestisit kullanımının azaltılması ve bitki koruma uygulamalarının daha hedefe yönelik gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir (URL, 2025j).

Bununla birlikte küresel gıda sistemlerinde önemli miktarda gıda kaybı ve israfı da meydana gelmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından yayımlanan 2024 yılı tahminlerine göre, tüketicilere sunulan gıdanın yaklaşık %19'u perakende, gıda hizmeti ve hane halkı düzeyinde israf edilmektedir. Buna ek olarak küresel gıda üretiminin yaklaşık %13,2'si ise tedarik zincirinin farklı aşamalarında kaybolmaktadır. FAO'ya göre bu düzeydeki gıda kaybı ve israfı, yalnızca gıda güvenliği açısından kaçırılmış bir fırsat değil, aynı zamanda önemli bir çevresel yük oluşturmaktadır (URL, 2025k).

Toprak kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi de tarımsal üretimin geleceği açısından kritik öneme sahiptir. Yapılan değerlendirmeler, dünya genelinde yaklaşık 1,7 milyar insanın insan kaynaklı toprak bozulmasının etkilerinin görüldüğü bölgelerde yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu bölgelerde tarımsal üretim veriminin ortalama olarak yaklaşık %10 oranında daha düşük olduğu tahmin edilmektedir (URL, 2025l). Bu durum, toprak kaynaklarının korunmasına yönelik sürdürülebilir tarım uygulamalarının ve yenilikçi üretim teknolojilerinin geliştirilmesinin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

6. Sonuç ve Değerlendirme

Artan dünya nüfusu, iklim değişikliği, doğal kaynakların sınırlılığı ve gıda güvenliği konusundaki küresel kaygılar, tarım sektöründe sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Bu süreçte tarımsal mekanizasyon alanında yaşanan teknolojik gelişmeler, tarımsal üretimin daha verimli, çevreye duyarlı ve veri odaklı bir yapıya dönüşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Yapay zekâ, nesnelerin interneti, büyük veri analitiği, robotik sistemler, sensör teknolojileri ve uzaktan algılama gibi ileri teknolojilerin tarım makinalarına entegre edilmesi, modern tarım uygulamalarının temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

Çalışmada ele alınan teknolojik gelişmeler, özellikle sürdürülebilir tarım hedeflerine ulaşılması açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Hassas tarım uygulamaları, akıllı sensör sistemleri, otonom tarım makinaları ve dijital yönetim platformları sayesinde üretim süreçleri daha hassas bir şekilde planlanabilmekte ve kaynak kullanımı optimize edilebilmektedir. Bu teknolojiler; su, gübre, pestisit ve enerji gibi kritik girdilerin daha verimli kullanılmasını sağlarken aynı zamanda üretim maliyetlerinin azaltılmasına ve çevresel etkilerin minimize edilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca robotik sistemler ve otonom makinalar, tarım sektöründe giderek artan iş gücü eksikliğinin azaltılması ve üretim süreçlerinin daha etkin bir şekilde yönetilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Çalışmada ayrıca sürdürülebilir tarım ve mekanizasyon alanında öne çıkan dört temel teknolojik eğilim belirlenmiştir. Bunlar; sürdürülebilir tarım odaklı mekanizasyon uygulamaları, hassas tarım teknolojilerinin yaygınlaşması, robotik sistemlerin tarımsal üretimde artan kullanımı ve dijitalleşmeye dayalı uzaktan yönetim çözümleridir. Bu eğilimler, tarım sektörünün gelecekte daha akıllı, veri temelli ve otomasyon odaklı bir yapıya dönüşeceğini

göstermektedir. Özellikle otonom traktörler, drone teknolojileri, akıllı sulama sistemleri ve yapay zekâ destekli karar destek sistemleri, tarımsal üretimde verimlilik artışı sağlayan yenilikçi teknolojiler arasında öne çıkmaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde ise tarım sektörü sahip olduğu geniş tarım arazileri, önemli hayvansal üretim kapasitesi ve gelişen tarım makinaları sektörü ile önemli bir potansiyele sahiptir. Son yıllarda tarımsal mekanizasyon düzeyinde gözlenen artış ve dijital tarım teknolojilerine yönelik ilginin yükselmesi, sektörün teknolojik dönüşüm sürecine uyum sağlama potansiyelini göstermektedir. Bununla birlikte dijital tarım teknolojilerinin kullanım oranının özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde henüz sınırlı düzeyde olduğu görülmektedir. Bu nedenle teknolojiye erişimin artırılması, çiftçilerin teknik bilgi ve eğitim düzeylerinin geliştirilmesi ve uygun destek mekanizmalarının oluşturulması büyük önem taşımaktadır.

Gelecekte tarımsal üretim sistemlerinin daha sürdürülebilir hale getirilebilmesi için tarım makinalarında dijitalleşme, otomasyon ve veri temelli yönetim yaklaşımlarının daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının tarım makinalarında kullanımı, akıllı sulama sistemlerinin geliştirilmesi, robotik uygulamaların yaygınlaştırılması ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemlerinin üretim süreçlerine entegrasyonu bu dönüşümün temel unsurları arasında yer almaktadır. Ayrıca kamu politikaları, üniversiteler, araştırma kurumları ve özel sektör arasında geliştirilecek iş birlikleri, tarımsal mekanizasyon alanındaki teknolojik yeniliklerin yaygınlaşmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak tarım makinalarında yaşanan teknolojik gelişmeler, yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilir ve dirençli tarım sistemlerinin oluşturulmasına da önemli katkılar sunmaktadır. Bu doğrultuda

dijital teknolojiler, robotik sistemler ve akıllı tarım uygulamalarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, hem küresel gıda güvenliğinin sağlanması hem de doğal kaynakların korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle sürdürülebilir tarım hedeflerine ulaşılabilmesi için tarımsal mekanizasyon alanındaki teknolojik gelişmelerin desteklenmesi ve bu teknolojilerin üretim sistemlerine etkin bir şekilde entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Kaynakça

- Ahmed, M. A., Gallardo, J. L., Zuniga, M. D., Pedraza, M. A., Carvajal, G., Jara, N., & Carvajal, R. (2022). LoRa based IoT platform for remote monitoring of large-scale agriculture farms in Chile. *Sensors*, 22(8), 2824. <https://doi.org/10.3390/s22082824>
- Aybek. A., Kuzu, H., Karadöl., H., (2021) Türkiye'nin ve Tarım Bölgelerinin Tarımsal Mekanizasyon Düzeyindeki Değişimlerin Son On Yıl (2010-2019) ve Gelecek Yıllar (2020-2030) İçin Değerlendirilmesi. *KSÜ Tarım ve Doğa Derg* 24 (2): 319-336.
- Bilgili, M. E., Aybek, A., 2025. Tarımsal üretimde dron teknolojisi ve Türkiye'deki bazı uygulamaları. Tarım biliminde güncel yaklaşımlar. 1-14. BİDGE Yayınları. www.bidgeyayinlari.com.tr. ISBN: 978-625-372-743-7. Sertifika No: 71374.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831.
- Gupta, S., Chowdhury, S., Govindaraj, R., Amesho, K. T., Shangdiar, S., Kadhila, T., & Iikela, S. (2025). Smart agriculture using IoT for automated irrigation, water and energy efficiency. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101081. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101081>

- Jiang, L., Xu, B., Husnain, N., Wang, Q., 2025. Overview of agricultural machinery automation technology for sustainable agriculture. *Agronomy*, 15(6), 1471. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061471>
- Karadöl, H., Aybek, A., & Üçgül, M. (2020). Development of an automatic system to detect and spray herbicides in corn fields. *Journal of Agricultural Sciences*, 26(2), 190-200. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.495903>
- Karadöl, H., Aybek, A., Ucgul, M., Kuzu, H., & Gunes, M. (2024). Field sprayer with application rate control using fast response proportional valves under variable speed conditions. *Agriculture*, 14(3), 361. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030361>
- Karadöl, H., Çaylı, A., Akyüz, A., & Üçok, S. (2023). Etlik Piliç Yetiştiriciliğinde Çevre Koşullarının İzlenmesine Yönelik Web Tabanlı Bir Uzak İzleme Sisteminin Geliştirilmesi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 6(4), 426-433. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1339165>
- Li, H., Wang, H., Yin, W., Li, Y., Qian, Y., & Hu, F. (2015). Development of a remote monitoring system for henhouse environment based on IoT technology. *Future Internet*, 7(3), 329-341. <https://doi.org/10.3390/fi7030329>
- Marr, B., 2022. The biggest future trends in agriculture and food production. Obtained from <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2022/01/28/the-biggest-future-trends-in-agricultureand-food-production>.
- Mathenge, M., Sonneveld, B. G., & Broerse, J. E. (2022). Application of GIS in agriculture in promoting evidence-informed decision making for improving agriculture sustainability: A systematic review. *Sustainability*, 14(16),

9974.

<https://doi.org/10.3390/su14169974>

Özgüven, M.M., Eminoğlu, M.B., Çolak, A., 2024. Tarımda otonom araçlarının kullanımı. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi/Journal of Agricultural Machinery Science. 20(3): 218-234.

Saleem, S. R., Zaman, Q. U., Schumann, A. W., & Naqvi, S. M. Z. A. (2023). Variable rate technologies: Development, adaptation, and opportunities in agriculture. In *Precision agriculture* (pp. 103-122). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18953-1.00010-6>

Tewari, V. K., Pareek, C. M., Lal, G., Dhruw, L. K., & Singh, N. (2020). Image processing based real-time variable-rate chemical spraying system for disease control in paddy crop. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.01.002>

URL 2025a. <https://farmonaut.com/blogs/agricultural-machineryindustry-trends-2025-top-innovations#comparison-table>

URL 2025b. DSİ Genel Müdürlüğü, Tarım ve sulama, <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/720>.

URL 2025c. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, <https://istatistik.tarimorman.gov.tr/Sayfa/Detay/2222>.

URL 2025d. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, İstatistik Bülteni, Tarımsal Alet ve Makine İstatistikleri, Yayımlanma Tarihi: 05 Mart 2026. Sayı: 054. <https://istatistik.tarimorman.gov.tr/Sayfa/Detay/2260>

URL 2025e. Hassas tarımda dijital teknoloji kullanım alanları, <https://www.agsrt.com/post/gis-applications-in-precision-agriculture-including-soil-and-crop-health-monitoring-gis-blogs>

- URL 2025f. Otonom traktör kullanım alanları, <https://eos.com/blog/gis-in-agriculture/>
- URL 2025g. Tarım Makinaları Sanayi Etkileşim Raporu, 2022. <https://www.makfed.org/pdf/raporlar/Tarim-Makine-Raporu.pdf>.
- URL 2025h. Tarımı dönüştüren en iyi 10 tarım ekipmanı İnovasyonu,. <https://www.stygoldmachine.com/blog/2025-top-10-innovations-transforming-agriculture/>
- URL 2025i. Dikey tarımın doğaya faydası, <https://www.dwih-newyork.org/en/2020/10/01/the-worlds-largest-indoor-vertical-farm/>
- URL 2025i. Esular, <https://store.esular.com/akilli-su-kontrol-teknolojileri>
- URL 2025j. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) pestisit yönetimi, <https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/about/understanding-the-context/en/>
- URL 2025k. FAO, Gıda israfı. <https://www.un.org/en/observances/end-food-waste-day>
- URL 2025l. FAO, Sürdürülebilir toprak kullanımı, <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-report--1.7-billion-people-experience-lower-crop-yields-due-to-land-degradation/en>
- Wilson, J. P. (1999). Local, national, and global applications of GIS in agriculture. *Geographical information systems: Principles, techniques, management, and applications*, 981-998.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712. [10.1007/s11119-012-9274-5](https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5)

Zhang, F., & Cao, N. (2019, July). Application and research progress of geographic information system (GIS) in agriculture. In *2019 8th international conference on agro-geoinformatics (agro-geoinformatics)* (pp. 1-5). IEEE. [10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820476](https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820476)

BÖLÜM 3

PÜLVERİZATÖR NOZUL TİPLERİ: ÇALIŞMA PRENSİPLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

HAMZA KUZU¹

HAYRETTİN KARADÖL²

Giriş

Kimyasal mücadele, bitkisel üretimde zararlı, hastalık ve yabancı ot kontrolünün sağlanmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Özellikle geniş alanlarda yapılan tarımsal üretimde pestisit uygulamalarının etkinliği, kullanılan pülverizatör sistemlerinin doğru kalibrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Uygulama dozunun hedeflenen seviyede ve homojen dağılımla verilmemesi, hem biyolojik etkinliğin azalmasına hem de gereksiz kimyasal kullanımına yol açmaktadır. Bu durum üretim maliyetlerini artırırken, çevresel kirlilik ve insan sağlığı açısından da önemli riskler oluşturmaktadır.

Pülverizatör sistemlerinde nozul tip ve boyut seçimi, tarımsal ilaçlama sürecinin başarısını ve etkinliğini belirleyen önemli

¹ Arş. Gör. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-8585-4467

² Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-5062-0887

faktörlerden biridir (Johnson & Swetnam, 1996; Sumner, 2009). Bir nozul; sıvıyı damlacıklara parçalamak (atomizasyon), belirli bir püskürtme deseni oluşturmak ve bu damlacıkları hedeflenen yöne sevk etmek gibi temel işlevleri yerine getirir. Pülverizatör sistemlerinde kalibrasyon; birim alana uygulanacak ilaç miktarının doğru belirlenmesi, nozul debilerinin eşitliği, çalışma basıncının uygunluğu ve ilerleme hızının doğru ayarlanması gibi temel parametrelerin kontrolünü kapsamaktadır. Özellikle değişken arazi koşulları, traktör hızındaki dalgalanmalar ve ekipman aşınmaları, uygulama normunun sapmasına neden olabilmektedir (Karadol & ark., 2024). Diğer taraftan, pülverizatörler ileri düzey yazılım ve elektronik sistemlerle donatılsa dahi, tüm bu teknoloji ancak nozulun istenen performansı sergilemesiyle değer kazanmaktadır. Çünkü nozul, ilacın makineden çıkıp hedefe ulaştığı son kontrol noktasıdır (Whitford & ark., 2025). Bu nedenle nozul, yalnızca mekanik bir akış bileşeni değil; uygulama doğruluğunu, biyolojik başarıyı ve çevresel güvenliği aynı anda etkileyen stratejik bir karar unsurudur. Hassas tarım uygulamalarının yaygınlaştığı günümüzde, değişken oranlı ilaçlama, hedefe yönelik uygulama ve akıllı kontrol sistemleri gibi yenilikçi yaklaşımların sahadaki gerçek performansı büyük ölçüde nozul karakteristiklerine bağlıdır.

Nozul performansını tanımlayan temel bileşenler, damlacık boyutu dağılımı, damlacık hızı, püskürtme yapısı ve hacimsel dağılım desenidir. Bu fiziksel parametrelerin etkileşimi, ilacın hedef yüzeyde ne kadar tutunacağını (retention), biyolojik etkinliğini ve çevre için büyük bir risk teşkil eden rüzgar sürüklenmesi (drift) miktarını doğrudan belirlemektedir (Miller & Butler Ellis, 2000; Nuytens & ark., 2007). İdeal bir nozul ve basınç kombinasyonu, hedefteki zararlıya etkili bir dozu ulaştırırken, hedef dışı alanlara olan ilaç kaybını ve kullanıcı maruziyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle nozul performansı, bitki koruma

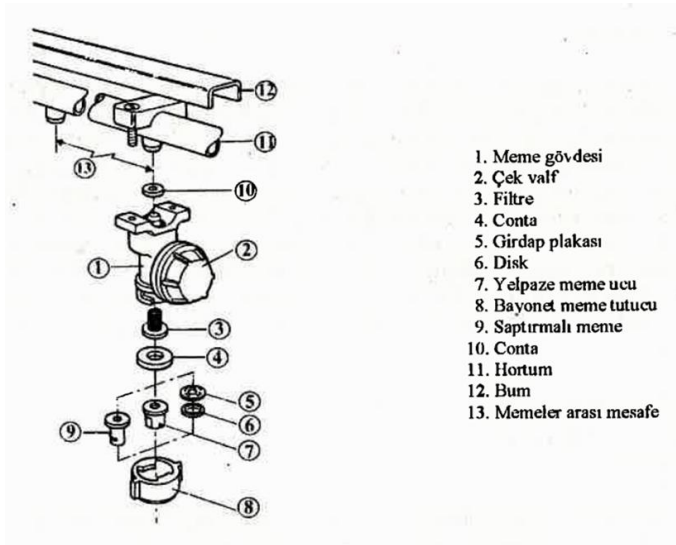
ürünlerinin ekonomik verimliliği, operatör sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir yere sahiptir.

Farklı pestisit türleri, en iyi sonucu almak için belirli damlacık spektrumlarına ihtiyaç duymaktadır. Örneğin, fungusitler genellikle bitki yüzeyini tamamen kaplamak ve kanopiye nüfuz etmek için daha ince damlacıklara gereksinim duyarken, sistemik herbisitler sürüklenme riskini azaltmak ve yaprak yüzeyinde emilim gerçekleşene kadar daha uzun süre sıvı formda kalmak için daha iri damlacıklarla daha iyi sonuç verebilir (Sumner, 2009; Whitford & ark., 2025). Ayrıca, pülverizatörün ilerleme hızı ve çalışma basıncı gibi değişkenler de damlacık özelliklerini ve sürüklenme potansiyelini doğrudan değiştirdiğinden, her uygulama senaryosu için optimize edilmiş bir nozul konfigürasyonu seçilmesi zorunludur (van de Zande & ark., 2005). Buna ek olarak, hedef organizmanın biyolojisi, bitki morfolojisi, kanopi yoğunluğu, meteorolojik koşullar ve uygulama zamanı gibi faktörler de nozul seçim sürecine entegre edilmelidir. Örneğin; yoğun ve çok katmanlı bitki örtüsünde penetrasyon öncelik kazanırken, açık alan uygulamalarında sürüklenme kontrolü daha belirleyici hale gelmektedir. Benzer şekilde düşük rüzgar hızlarında ince damlacıklar avantaj sağlayabilirken, değişken rüzgar koşullarında düşük sürüklenme potansiyeline sahip nozul tasarımları tercih edilmelidir. Ayrıca, uygun ve homojen bir kaplama elde edilebilmesi için tüm nozulların yerden yüksekliğinin eşit olması büyük önem taşımaktadır. Püskürtme yüksekliğindeki değişimler, hüzmeye örtüşmesini ve birim alana düşen ilaç miktarını doğrudan etkileyerek dağılım düzgünlüğünü bozabilmektedir. Tarla yüzeyindeki engebeler ve makine titreşimleri ise püskürtme çubuğunun (boom) paralellliğini olumsuz etkileyen başlıca faktörlerdir. Bu nedenle modern pülverizatörlerde, püskürtme çubuğunun hedef yüzeye paralel konumunu otomatik olarak koruyabilen aktif bum yükseklik kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler; ultrasonik sensörler,

ivmeölçerler ve elektronik kontrol üniteleri aracılığıyla çubuk yüksekliğini anlık olarak ayarlayarak hem kaplama homojenliğini artırmakta hem de sürüklenme riskini azaltmaktadır (Karadöl & ark., 2017).

Nozulların püskürtme çubuğuna hangi aralıklarla yerleştirileceği; nozulun hüzmeye açısına ve hedef yüzeye olan püskürtme yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Mekanik tarla pülverizatörlerinde yaygın olarak kullanılan hidrolik nozullar genellikle 65°, 80° ve 110° püskürtme açılarıyla üretilmektedir. Uygulamada birçok imalatçı, düzgün kaplama ve örtüşme sağlamak amacıyla nozulları püskürtme çubuğuna 50 cm aralıklarla monte etmektedir (Bayat, 2022). Şekil 1’de bir nozulu oluşturan parçalar sunulmuştur.

Şekil 1. Nozul parçaları



Kaynak: Kasap & ark., 1999

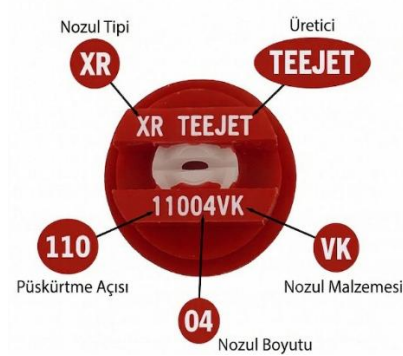
İmalatçılar ve çeşitli araştırma enstitüleri, nozul özelliklerinin tanımlanması ve karşılaştırılmasını sağlamak üzere farklı kodlama ve sınıflandırma sistemleri geliştirmişlerdir. Bu

sistemler; nozul performansının karakterize edilmesini, doğru nozul seçimini ve farklı üreticiler arasında tutarlı karşılaştırmalar yapılmasını mümkün kılmaktadır. Çoğunlukla kabul gören uluslararası kodlama sistemlerinde, bir nozulun dört temel özelliği açıkça belirtilmekte ve standartlaştırılmaktadır:

- a. **Nozul Tipi/Geometrisi:** Sprey desenini ve akış karakterini belirleyen temel parametredir. Örneğin flat fan (yelpaze), hollow cone (içi boş konik), full cone (tam konik), air-induction (hava karışımı) gibi tipler nozulun atomizasyon mekanizmasını ve damlacık dağılımını etkilemektedir. Bu sınıflandırma, uygulama amacına uygun nozul tipinin seçimi açısından önemlidir.
- b. **Hüzme Açısı (Spray Angle):** Nozuldaki çıkış jetinin geometrik yayılımını ifade etmektedir. Genellikle derece ($^{\circ}$) cinsinden belirtilen farklı hüzme açıları, püskürtme çubuğunda gerekli örtüşme oranını belirlemektedir. Standart yelpaze nozulları için yaygın açı değerleri 65° , 80° ve 110° 'dir. Daha geniş açılar düşük bum yüksekliğinde geniş bir örtüşme sağlarken, daha dar açılar yüksek hız veya dar sıra aralıklarında avantaj sağlamaktadır.
- c. **Debi (Flow Rate):** Belirli bir basınç altında nozuldaki akış miktarını (örneğin L/dak veya gal/dak) ifade etmektedir. Debi kodlaması, genellikle belirli bir çalışma basıncıyla ilişkilendirilir ve nozul performansını değerlendirmek için temel bir parametredir. ISO ve ASABE standartları, debi ölçümlerinin hangi referans basınçta yapılacağını belirleyerek karşılaştırma tutarlılığını artırmaktadır.
- d. **Damlacık Sınıfı/Damlacık Spektrumu:** Atomizasyon sonucu oluşan damlacıkların karakteristiğini

tanımlamaktadır. Bu sınıflandırma, damlacıkların hacimsel orta çapı (VMD, Volume Median Diameter) ve dağılım genişliği temel alınarak yapılmaktadır. Kodlama sistemlerinde damlacık sınıfları genellikle “very fine” (çok ince), “fine” (ince), “medium” (orta), “coarse” (iri) ve “very coarse” (çok iri) gibi ifadelerle gösterilmektedir. Bunun yanında ASABE tarafından önerilen VF, F, M, C, VC, XC gibi standart damlacık sınıf etiketleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart bir nozulun tanımlama ve kodlama yapısı Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2. Standart bir nozulun tanımlama ve kodlama yapısı



Kaynak: Teejet, 2026a

Burada;

Nozul tipi: XR - Extended Range (Genişletilmiş basınç aralıklı yelpaze hüzmeli nozul)

Püskürtme açısı: 110° (derece cinsinden püskürtme hüzmeye açısı)

Nozul boyutu/debi kodu: 04 Bu kod, standart referans basınçta (40 psi / 2.76 bar) 0.4 galon/dakika (GPM) debiye karşılık gelmekte ve yaklaşık 1.51 L/dak akış sağlamaktadır.

Malzeme veya özel seri kodu: VK, VS vb. kısaltmalar nozulun üretim malzemesini veya üreticiye özgü seri/özellik sınıfını belirtmektedir. (seramik uç, paslanmaz çelik uç, aşınmaya dayanıklı polimer gövde vb.)

1. Yelpaze Hüzmeli Nozullar (Flat Fan Nozzles)

Tarımsal ilaçlamada çok yaygın kullanılan bu tip nozullar, damlacıkları iki boyutlu ve üçgen bir hüzmeye deseni oluşturacak şekilde püskürtmektedir (Whitford & ark., 2025). Tarla pülverizatörlerinin standart donanımı haline gelmiş olmalarının temel nedeni; farklı ilaçlama hacimlerine, ilerleme hızlarına ve tarla koşullarına uyum sağlayabilen çok sayıda varyasyona sahip olmalarıdır. Özellikle geniş alan uygulamalarında sağladıkları öngörülebilir dağılım paterni, kalibrasyon ve uygulama doğruluğunu kolaylaştırmaktadır.

Standart Yelpaze Nozullar

Şekil 3'te gösterilen bu nozulda, genellikle oval bir püskürtme deseni oluşmakta ve kenarlara doğru sıvı miktarı azalmaktadır (tapered edge). Bu nedenle, tarla pülverizatörlerinde homojen bir dağılım sağlamak için komşu nozulların hüzmelerinin belirli bir oranda (genellikle %50 - %100) üst üste binmesi (overlap) gerekmektedir (Sumner, 2009). Normal çalışma basınçları 20 ile 60 psi (1.5 - 4 bar) arasındadır (Johnson & Swetnam, 1996). Bu nozullar, orta büyüklükte damlacık spektrumu üretmeleri nedeniyle genel amaçlı ilaçlamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Basit hidrolik tasarımları sayesinde bakım gereksinimleri düşüktür ve maliyet etkin çözümler sunmaktadır. Ancak yüksek basınçta çalıştırıldıklarında ince damlacık oranı artarak sürüklenme riski yükselmektedir. Bu nedenle rüzgârlı koşullarda dikkatli kullanılmaları gerekmektedir.

Şekil 3. Standart yelpaze nozul



Kaynak: Teejet, 2026b

Genişletilmiş Basınç Aralıklı Nozullar (Extended Range - XR)

Şekil 4'te gösterilen bu nozullar, modern debi kontrol üniteleriyle (rate controllers) en uyumlu çalışan tiptir. Düşük basınçlarda (15 psi) desenini koruyarak sürüklenmeyi azaltan iri damlalar üretirken, basınç arttıkça kanopiye nüfuz eden daha ince damlalar üretme esnekliğine sahiptir. Bu geniş çalışma aralığı, değişken hızlı uygulamalarda ve değişken oranlı ilaçlama sistemlerinde önemli avantaj sağlamaktadır. Aynı nozul ile farklı uygulama hacimlerinin karşılanabilmesi, saha operasyonlarında nozul değiştirme ihtiyacını azaltmakta ve iş verimliliğini artırmaktadır. Özellikle hassas tarım uygulamalarında sensör verilerine bağlı gerçek zamanlı debi ayarlamalarında kararlı püskürtme deseni sunmaları kritik bir üstünlüktür.

Şekil 4. Genişletilmiş basınç aralıklı nozul



Kaynak: Teejet, 2026c

Eşit Dağılımlı Nozullar (Even Flat Fan)

Şekil 5’te gösterilen bu nozul tipi, standart yelpaze nozulların aksine, püskürtme deseninin her noktasında eşit miktarda sıvı dağıtmaktadır. Bu nedenle üst üste bindirme gerektirmezler ve genellikle sadece belirli bir bant üzerine (sıra üzeri) ilaçlama yapılan uygulamalarda kullanılmaktadır (Sumner, 2009). Bant ilaçlamasında homojen doz kontrolü sağladıkları için özellikle sıra arası işlenen bitkilerde kimyasal tasarrufuna katkı sunmaktadır. Hedef dışı alanlara ilaç temasını azaltmaları çevresel sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır.

Şekil 5. Eşit dağılımlı nozul



Kaynak: Teejet, 2026d

2. Sürüklenmeyi Azaltan Nozullar (Drift Reduction Nozzles)

Bu nozullar, rüzgar sürüklenmesi riskini minimize etmek için fiziksel tasarımı değiştirilmiş özel tiplerdir. İnce damlacık (driftable fines) oluşumunu sınırlamaya yönelik akış düzenleme ve enerji sönmüleme prensipleriyle çalışmaktadır. Damlacık çapının büyütülmesi, başlangıç hızının kontrol edilmesi ve spreynin enerjisinin dengelenmesi sayesinde hedef dışı taşınım önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle çevresel regülasyonların sıkı olduğu bölgelerde ve hassas alanlara komşu uygulamalarda tercih edilmektedir. Sürüklenme kontrolü; yalnızca çevre koruma açısından değil, aktif maddenin hedefte kalmasını sağlayarak ekonomik etkinliği artırması bakımından da kritik öneme sahiptir (Herbst & Ganzelmeier, 2000; Hewitt, 2000).

Hava Karışımli (Venturi/Air Induction) Nozullar

Bu tasarımda, Venturi prensibiyle nozulun içine hava emilerek sıvı ile karıştırılmaktadır. Sonuç olarak, içinde hava kabarcıkları hapsolmuş daha iri damlacıklar oluşmaktadır. Bu damlalar, yüksek kütleleri sayesinde sürüklenmeye karşı çok dirençlidir ve hedef yüzeye çarptıklarında patlayarak ikincil bir kaplama sağlarlar (Miller & Butler Ellis, 2000; Whitford & ark., 2025). Ancak bu nozullar, geleneksel hidrolik nozullara göre ilaç formülasyonu değişikliklerine karşı daha hassastırlar (Miller & Butler Ellis, 2000). Hava indüksiyonlu tasarım, damlacık spektrumunu “orta-iri” sınıfa kaydırarak atmosferik taşınımı belirgin biçimde azaltmakta ve birçok ülkede düşük sürüklenme kategorisinde sınıflandırılmaktadır. Hedef yüzeye çarpma anında hava kabarcıklarının patlamasıyla oluşan ikincil damlacıklar, iri damla kullanımına rağmen yüzey kaplama performansını desteklemektedir. Şekil 6’da gösterilen bu nozullar, özellikle sistemik herbisit uygulamalarında biyolojik etkinlik ile çevresel güvenlik arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte, viskozitesi yüksek veya yüzey gerilimi değiştirilmiş formülasyonlarda damlacık oluşum dinamiği değişebileceğinden performans kalibrasyonu önemlidir (Hewitt, 2000; Ferguson & ark., 2016).

Şekil 6. Hava karışımli nozul



Kaynak: Teejet, 2026e

Ön Orifisli (Pre-orifice) Nozullar

Şekil 7’de verilen bu nozulda, sıvı çıkış deliğine ulaşmadan önce küçük bir giriş deliğinden (ön orifis) geçmektedir. Bu durum nozul içindeki basıncı düşürerek, sürüklenmeye neden olan çok ince damlacıkların (driftable fines) oluşumunu önemli ölçüde azaltmaktadır (Sumner, 2009). Ön orifis yapısı, akış enerjisini kademeli olarak düşürerek atomizasyon şiddetini sınırlamakta ve daha kontrollü bir damlacık oluşumu sağlamaktadır. Mekanik olarak basit ve dayanıklı olmaları, bu nozulları hava karışımlı sistemlere kıyasla daha ekonomik ve bakım açısından avantajlı hale getirmektedir. Orta düzey sürüklenme kontrolü gerektiren tarla uygulamalarında, özellikle rüzgâr hızının değişken olduğu koşullarda güvenilir performans sunarlar. Ayrıca akış kanallarının nispeten geniş olması, süspansiyon konsantre formülasyonlarda tıkanma riskini azaltmaktadır (Herbst & Ganzelmeier, 2000; Matthews & ark., 2014; Cunha & ark., 2020).

Şekil 7. Ön orifisli nozul



Kaynak: Teejet, 2026f

3. Konik Hüzmeli Nozullar (Cone Nozzles)

Sıvının bir dairesel hareket (girdap) kazandırılarak püskürtülmesi prensibiyle çalışmakta ve genellikle daha yüksek basınçlarda işletilmektedirler (Whitford & ark., 2025). Nozul içerisinde oluşturulan türbülanslı girdap akışı, sıvı filminin merkezkaç kuvvet etkisiyle incelmesine ve çıkışta konik bir sprey

geometrisi oluşmasına neden olmaktadır. Bu akış yapısı, yüksek atomizasyon enerjisi sağlayarak küçük çaplı damlacık üretimini desteklemekte ve özellikle yüzey kaplama gereksinimi yüksek bitki koruma uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Konik nozulların püskürtme açıları, akış odası geometrisi ve orifis tasarımına bağlı olarak değişebildiğinden, farklı kanopi yapıları ve hedef yüzeyler için esnek kullanım olanağı sunmaktadır.

İçi Boş Konik (Hollow Cone)

Sıvı, halkanın dış kenarlarında yoğunlaşmaktadır (Şekil 8). Tüm hidrolik nozullar arasında en ince damlacık spektrumunu üretme kapasitesine sahiptirler (Whitford & ark., 2025). Bu özellikleri nedeniyle, yaprak altı yüzeylerini kaplamak ve bitki kanopisinin derinliklerine ulaşmak gereken fungusit ve insektisit uygulamalarında tercih edilirler (Johnson & Swetnam, 1996; Sumner, 2009). İnce damlacık üretimi sayesinde birim alan başına düşen damla sayısı yüksektir ve temas etkili pestisitlerde biyolojik etkinliği artırmaktadır. Özellikle yoğun ve çok katmanlı kanopilerde oluşturdukları türbülanslı hava akımı, damlacıkların bitki örtüsü içine taşınmasını kolaylaştırır ve gölgelenmiş yüzeylerde kaplama başarısını yükseltir. Bununla birlikte, düşük kütleli damlacıkların atmosferik taşınımına duyarlılığı yüksek olduğundan rüzgâr hızı, sıcaklık ve bağıl nem gibi meteorolojik değişkenlere karşı hassastırlar. Bu nedenle sürüklenme riskinin yüksek olduğu açık alan uygulamalarında dikkatli basınç ve hız optimizasyonu gerektirirler.

Şekil 8. İçi boş konik nozul



Tam Konik (Full Cone)

Püskürtme deseni dairesel alanın tamamını kaplamaktadır (Şekil 9). İçi boş koniklere göre daha iri damlalar üretirler ve genellikle toprak içi uygulamalar veya sürüklenme riskinin yönetilmesi gereken spesifik durumlar için seçilirler (Sumner, 2009). Hacimsel dağılımın daha homojen olması, hedef yüzey üzerinde daha dengeli sıvı birikimi sağlar ve sıvı gübreleme gibi yüksek hacimli uygulamalarda performans avantajı sunar. Daha iri damlacık spektrumu, sürüklenme potansiyelini azaltırken damla kinetik enerjisini artırarak toprak yüzeyine nüfuzu kolaylaştırır. Bu özellikleri sayesinde toprak hedefli herbisit uygulamaları, bant ilaçlamaları ve sıvı besin maddesi uygulamalarında etkin sonuç vermektedirler. Ayrıca daha düşük atomizasyon enerjisi gereksinimi, pompa yükünü azaltarak enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır.

Konik nozullar genel olarak yüksek basınç gereksinimleri nedeniyle enerji tüketimi ve ekipman aşınması açısından yelpaze tiplerine göre daha dikkatli işletilmelidir. Bununla birlikte doğru basınç-debi kombinasyonunda sağladıkları üstün kaplama performansı, onları özellikle meyve bahçeleri, bağ alanları ve yoğun yapraklı bitki örtüsüne sahip üretim sistemlerinde vazgeçilmez kılmaktadır.

Şekil 9. Tam konik nozul

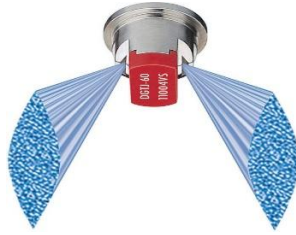


Kaynak: Teejet, 2026h

4. Çift Yelpaze Hüzmeli Nozullar (Twin Flat Fan)

Bu modern tasarımlar, tek bir nozul gövdesinde iki farklı çıkış deliğine sahiptir (Şekil 10). Bu delikler püskürtmeyi genellikle birini ileri (30°), diğerini geri (30°) açıyla yönlendirir (Johnson & Swetnam, 1996; Whitford & ark., 2025). Bu çift açılı yaklaşım, özellikle dikey hedeflere (örneğin buğday başakları veya dik yapraklı yabancı otlar) her iki yönden de temas ederek kaplama kalitesini ve kanopi penetrasyonunu önemli ölçüde artırır

Şekil 10. Çift yelpaze hüzmeli nozul



Kaynak: Teejet, 2026ı

Çift yönlü püskürtme geometrisi, hedef yüzeyle damlacık etkileşimini artırarak gölgelenme etkisini azaltır ve bitki yapılarının ön ve arka yüzeylerinde daha dengeli bir birikim sağlar. Özellikle kontakt etkili pestisitlerde damlacık temas olasılığını yükselttiği için biyolojik etkinliği artırır. Aynı zamanda bitki sıraları boyunca ilerleyen pülverizatör hareketine karşı ileri-geri yönlü püskürtme, damlacıkların hedefle bağıl hızını değiştirerek tutunma verimini iyileştirir (Zhu & ark., 2004; Matthews & ark., 2014).

Kanopi yapısının karmaşık olduğu tahıllar ve sık ekili bitkilerde, çift yelpaze akışı bitki örtüsü içinde daha fazla türbülans oluşturarak penetrasyonu güçlendirir. Bu durum özellikle başak, koçan ve dikey yaprak yüzeylerinin kaplanmasında önemli avantaj sağlar. Araştırmalar, tek yelpaze nozullara kıyasla daha homojen damla dağılımı ve daha yüksek kaplama yüzdesi elde edildiğini göstermektedir (Derksen & ark., 2007; Ferguson & ark., 2016).

Çift yelpaze nozullar farklı damlacık sınıflarında üretilebilmekte olup hem standart hidrolik hem de hava karışıklı (air-induction) versiyonlara sahiptir. Bu çeşitlilik, kullanıcının biyolojik etkinlik ile sürüklenme kontrolü arasında uygulamaya özgü denge kurmasına olanak tanımaktadır. Özellikle düşük sürüklenme gereksinimi olan alanlarda hava indüksiyonlu çift yelpaze nozullar tercih edilmektedir (Hewitt, 2000; Matthews & ark., 2014).

Bununla birlikte iki ayrı püskürtme jetinin oluşturduğu akış etkileşimi, uygun meme aralığı ve bum yüksekliği ayarlarını daha kritik hale getirir. Yanlış yükseklik veya yetersiz örtüşme durumlarında dağılım deseninde düzensizlikler oluşabilir. Bu nedenle kalibrasyon sürecinde püskürtme açısı, çalışma basıncı ve ilerleme hızının birlikte optimize edilmesi gerekir (ISO 5682-1; ASABE S572.3).

Çift yelpaze nozullar, hassas tarım ve hedefe yönelik ilaçlama teknolojileriyle uyumlu çalışarak özellikle değişken oranlı uygulamalarda yüksek kaplama kalitesi sunar. Gelişmiş püskürtme kontrol sistemleriyle birlikte kullanıldığında, bitki gelişim evresine ve hedef zararlının konumuna göre uygulama başarısını belirgin biçimde artırır.

5. Çarpma Hüzmeli Nozullar (Flood/Deflector Nozzles)

Sıvı akışının, nozul çıkışında yer alan düz bir yüzeye (plaka/dil) çarptırılarak bir yelpaze deseni oluşturulması esasına dayanmaktadır. Şekil 11'de gösterilen bu nozullar, geniş çıkış açıklıkları sayesinde tıkanmaya karşı çok dirençlidirler ve düşük basınçlarda (10 - 25 psi) çok iri damlalar üretirler. Genellikle sıvı gübre uygulamaları ve toprak yüzeyine uygulanan (pre-emerge) herbisitler için idealdirler (Johnson & Swetnam, 1996; Whitford & ark., 2025).

Şekil 11. Çarpma hüzmeli nozul



Kaynak: Teejet, 2026i

Çarpma yüzeyine yönlendirilen akış, sıvı jetinin kinetik enerjisini yatay bileşenlere ayırarak geniş açılı ve yüksek debili bir püskürtme deseni oluşturur. Atomizasyon enerjisinin görece düşük olması, çok iri damlacık spektrumu meydana getirir ve bu durum sürüklenme potansiyelini önemli ölçüde azaltır. Özellikle hedefin toprak yüzeyi olduğu uygulamalarda iri damlaların yüksek momentumla yüzeye ulaşması, sıçrama kayıplarını azaltarak uygulama verimliliğini artırır (Hewitt, 2000; Matthews & ark., 2014).

Geniş akış kanalları ve basit iç geometri, süspansiyon konsantr ve partikül içeren formülasyonlarda tıkanma riskini minimize eder. Bu özellikleri nedeniyle sıvı gübreler, yoğun çözeltiler ve yüksek hacimli uygulamalar için operasyonel süreklilik sağlarlar. Düşük basınçta çalışabilmeleri pompa yükünü ve enerji tüketimini azaltırken ekipman aşınmasını da sınırlamaktadır (Herbst & Ganzelmeier, 2000; Matthews & ark., 2014).

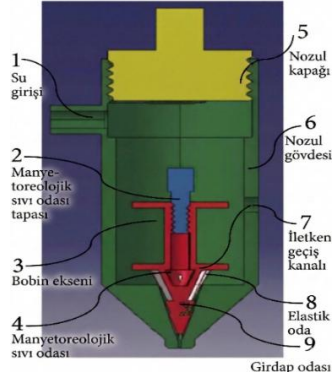
Püskürtme desenleri genellikle geniş açılı ve tam dolu yelpaze formundadır; bu da düşük bum yüksekliğinde bile yeterli yüzey kapsamı sağlar. Tarla yüzeyine yakın çalışmaya uygun olmaları, rüzgâr etkisini azaltarak hedef dışı taşınım riskini daha da düşürür. Bu nedenle toprak yüzeyi herbisitleri, bant uygulamaları ve sıvı besin maddesi dağıtımında güvenli ve etkili bir seçenek olarak öne çıkarlar (Ferguson & ark., 2016; Cunha & ark., 2020).

Bununla birlikte iri damlacık üretimi nedeniyle yaprak yüzey kaplama performansları sınırlıdır ve temas etkili pestisit uygulamalarında biyolojik etkinlik düşebilir. Bu nedenle çarpma hüzmeli nozullar, yüzey kaplamadan ziyade hedefe hacimsel sıvı ulaştırmanın öncelikli olduğu uygulama senaryolarında tercih edilmelidir.

6. Değişken Oranlı Nozullar

Değişken oranlı nozullar, sabit püskürtme delikli nozulların aksine püskürtme deliğinin morfolojisini veya alanını dinamik olarak değiştirerek akış hızının hassas bir şekilde kontrolünü sağlamaktadır (Şekil 12).

Şekil 12. Değişken oranlı nozul yapısı

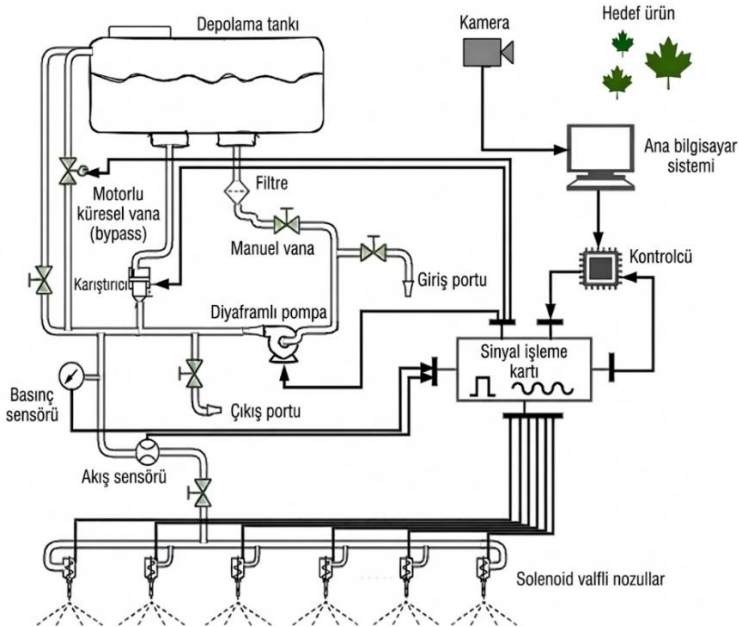


Kaynak: Huang & ark., 2019

Bu sayede; geniş bir akış hızı ayarlama oranı, hızlı tepki süresi ve damlacık parametrelerinin (boyut, dağılım ve püskürtme açısı) kontrol edilebilmesini sağlar (Jiao & ark., 2025). Bu nozullar, ilaçlama veya sulama gibi tarımsal uygulamalarda, traktör hızı veya arazi koşulları değişirken püskürtme miktarını (debi) ve damlacık boyutunu sabit tutmak veya hedefe göre anlık değiştirmek için kullanılan hassas püskürtme başlıklarıdır.

Sabit oranlı uygulama sistemlerinde, tüm arazi yüzeyine aynı miktarda girdi uygulanırken, değişken oranlı sistemler sayesinde uygulama miktarı; bitki yoğunluğu, gelişim durumu, yabancı ot varlığı ve toprak özellikleri gibi parametrelere bağlı olarak dinamik biçimde ayarlanabilmektedir (Guan & ark., 2015). Bu sistemler (Şekil 13), genellikle küresel konumlama sistemleri (GPS), coğrafi bilgi sistemleri (CBS), sensör teknolojileri ve elektronik kontrol üniteleri ile entegre çalışmaktadır. Özellikle sensör tabanlı sistemlerle birlikte kullanıldığında, yalnızca hedef bölgelerin ilaçlanmasına imkan tanıyarak önemli ölçüde kimyasal tasarrufu, maliyetlerinin azaltılması, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve uygulama etkinliğinin artırılması sağlanmaktadır (Hong & ark., 2012; Petrović & ark., 2018; Zhang & ark., 2018; Karadöl & ark., 2020).

Şekil 13. Akıllı hassas ilaçlama sisteminin yapısı

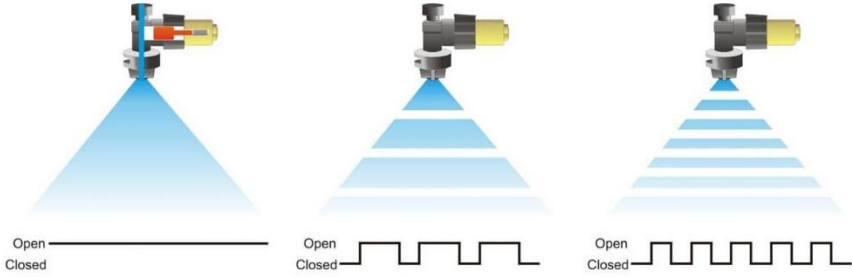


Kaynak: Nasir & ark., 2021

6. PWM Kontrollü Nozulları

PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) kontrollü püskürtme sistemleri, nozul debisinin basınç değiştirilmeden elektronik olarak kontrol edilmesini sağlayan uygulama teknolojileridir. Geleneksel sistemlerde uygulama normu; basınç değişimi veya ilerleme hızına bağlı mekanik ayarlamalarla kontrol edilirken, PWM sistemlerinde her bir nozul üzerine entegre edilen solenoid valfler yüksek frekansta açılıp kapanarak akış süresini düzenlemektedir (Şekil 14). Böylece püskürtme süresi ile kapalı kalma süresi oranı (görev döngüsü, duty cycle) değiştirilerek anlık ve hassas debi kontrolü sağlanmaktadır (Giles & Comino, 1990; Luck & ark., 2010).

Şekil 14. PWM kontrollü nozulların püskürtme desenleri



Kaynak: Wolf, 2021

Tarımsal uygulamalarda günümüzde uygulama hassasiyetini arttırmak amacıyla selenoidlerin çalışma frekansı 20 Hz değerine kadar çıkabilmektedir ve bu değerın önümüzdeki yıllarda daha da artabileceğı düşünölmektedir. 20 Hz frekans değeri nozulu saniyede 20 kez kapatıp açmaktadır. Nozulun "açık" (on) konumda kaldığı sürenin toplam döngü süresine oranına ise görev döngüsü (DC) veya darbe genişliği adı verilmektedir. %100 DC değeri, nozulun tamamen açık olduğu ve kesintisiz püskürtme yaptığı anlamına gelmektedir. %20 DC değeri ise solenoidin toplam sürenin yalnızca %20'sinde açık kaldığı ve sonuç olarak nozulun toplam kapasitesinin

yaklaşık %20'si oranında bir debiyle çalıştığı anlamına gelmektedir. (Wolf, 2021).

PWM teknolojisi, değişken düzeyli uygulama sistemleriyle yüksek uyum içinde çalışabilmektedir. Harita tabanlı ya da gerçek zamanlı görüntüleme sensörleri geri bildirimleri kullanılarak her bir nozulun debisi bağımsız biçimde ayarlanabilmektedir. Böylece arazi içerisindeki farklı bitki yoğunluğu, gelişim düzeyi veya yabancı ot dağılımına göre noktasal doz yönetimi mümkün olabilmektedir. (Zhang & ark., 2018).

Diğer taraftan PWM kontrollü sistemlerin bazı teknik sınırlılıkları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek frekansta çalışan solenoid valfler elektriksel enerji tüketimine bağlı olarak ısınabilmekte, bu durum uzun süreli uygulamalarda bobin performansını ve valf ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir. Mekanik anahtarlama hızına bağlı olarak çok düşük görev döngüsü değerlerinde valf tepkisinde gecikmeler görülebilmekte ve teorik debi ile gerçek debi arasında sapmalar oluşabilmektedir. Ayrıca solenoid valflerin sürekli açma-kapama hareketi mekanik aşınmayı artırmakta ve bakım gereksinimini yükseltmektedir. PWM sistemleri elektronik kontrol ünitesi, kablolama altyapısı ve hassas bileşenler gerektirdiğinden ilk yatırım maliyetleri geleneksel sistemlere kıyasla daha yüksektir (Giles & Comino, 1990; Luck & ark., 2010; Butts & ark., 2019a). Elektronik bileşenlerin nem, titreşim ve toz gibi zorlu tarla koşullarına karşı korunması sistem güvenilirliği açısından kritik önem taşımaktadır (Butts & ark., 2019b).

Sonuç

Pülverizatör sistemlerinde nozul seçimi, bitki koruma uygulamalarının etkinliği, çevresel güvenliği ve ekonomik sürdürülebilirliği açısından belirleyici mühendislik parametrelerinden biridir. Nozullar; püskürtme geometrisini, damlacık boyutu dağılımını, hedef yüzeyle etkileşim

mekanizmalarını ve sıvı birikim karakteristiklerini doğrudan etkilediğinden, biyolojik başarı üzerinde önemli bir yere sahiptir.

Yelpaze hüzmeli nozullar geniş alan uygulamalarında öngörülebilir ve homojen dağılım sunarak kalibrasyon kolaylığı sağlarken, genişletilmiş basınç aralıklı tasarımlar değişken hız ve değişken oranlı uygulamalara daha yüksek operasyonel uyum gösterir. Eşit dağılımlı nozullar bant ilaçlamalarında hassas doz kontrolü sağlarken, çift yelpaze nozullar karmaşık kanopi yapılarında tek yönlü püskürtmeye kıyasla daha dengeli kaplama ve daha güçlü penetrasyon performansına sahiptir.

Sürüklenmeyi azaltan nozullar, geleneksel hidrolik tasarımlara kıyasla damlacık oluşum enerjisini kontrol ederek hedef dışı taşınımı belirgin biçimde sınırlandırır. Hava karışımli sistemler sürüklenmeye karşı en yüksek direnci sağlarken, ön orifisli nozullar daha basit yapıları sayesinde benzer amaçlara daha ekonomik ve dayanıklı çözümler sunar. Konik hüzmeli nozullar yelpaze tiplerine göre daha yüksek atomizasyon enerjisi oluşturarak özellikle yoğun kanopilerde üstün yüzey kaplama sağlar. İçi boş konik tipler maksimum kaplama gerektiren uygulamalarda öne çıkarken, tam konik tipler daha dengeli hacimsel dağılım ve daha düşük sürüklenme riski gerektiren durumlar için uygundur. Çarpma hüzmeli nozullar ise diğer hidrolik tiplere göre çok daha iri damla üretmeleri ve düşük basınçta çalışmaları sayesinde toprak hedefli ve yüksek hacimli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Modern hassas tarım teknolojileriyle birlikte geliştirilen aktif kontrol sistemleri, nozul teknolojisini mekanik bir püskürtme bileşeninden dijital tarım altyapısının akıllı bir uygulama modülüne dönüştürmüştür. Bu kapsamda öne çıkan PWM kontrollü ve değişken orifisli nozullar, değişken oranlı uygulama amacı taşımalarına rağmen debi kontrolünü gerçekleştirme prensipleri bakımından temelde ayrılmaktadır.

PWM kontrollü nozullarda debi ayarı, nozul girişine entegre edilen solenoid valfin yüksek frekansta açılıp kapanmasıyla sağlanır. Akış zamansal olarak kesintiye uğratılır ve nozulun açık kalma süresinin toplam çevrim süresine oranı (görev döngüsü) değiştirilerek ortalama debi düzenlenir. Bu yaklaşımda püskürtme basıncı sabit kaldığından damlacık spektrumu, püskürtme açısı ve dağılım deseni büyük ölçüde korunur. Buna karşılık değişken orifisli nozullarda debi kontrolü zamansal modülasyonla değil, doğrudan akış kesit alanının değiştirilmesiyle sağlanır. Nozul içindeki mekanik bir iğne, piston veya akıllı malzeme tabanlı mekanizma püskürtme deliği açıklığını dinamik olarak ayarlar; akış sürekli kalır ancak çıkış alanı değiştikçe debi farklılaşır.

Bu iki teknoloji arasındaki temel fark, PWM sistemlerinin zamansal akış kontrolü, değişken orifisli sistemlerin ise geometrik akış kontrolü prensibine dayanmasıdır. PWM yaklaşımı sabit basınç altında çalıştığı için damlacık oluşum fiziğini daha kararlı tutar ve damlacık spektrumunun korunması gereken hassas uygulamalarda üstünlük sağlar. Buna karşın değişken orifisli nozullarda orifis geometrisinin değişmesi atomizasyon sürecini doğrudan etkileyebilir; bu durum geniş debi aralığı sağlasa da damlacık spektrumunda PWM sistemlerine kıyasla daha yüksek değişkenliğe yol açabilir. Arazi uygulamaları açısından değerlendirildiğinde PWM sistemleri elektronik kontrol altyapısı gerektiren, yüksek hassasiyetli ve noktasal doz yönetimine uygun çözümler sunmakta, değişken orifisli sistemler ise sürekli akış gerektiren uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Sonuç olarak, nozul tipi, çalışma basıncı, ilerleme hızı ve kontrol sistemleri gibi tüm uygulama parametrelerinin doğru ve entegre biçimde yönetilmesi, ilaçlama etkinliğini önemli ölçüde artıracaktır.

Kaynakça

- Bayat, A. (2022). *Bitki koruma makinaları*.
<https://tarimmakinalari.cu.edu.tr/storage/Serdar%20%C3%B6ztekintin%20ders%20notu/Tar%C4%B1msal%20Mekanizasyon%20bitki%20koruma.pdf>
- Butts, T. R., Luck, J. D., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., & Kruger, G. R. (2019a). Evaluation of spray pattern uniformity using three unique analyses as impacted by nozzle, pressure, and pulse-width modulation duty cycle. *Pest Management Science*, 75(7), 1875-1886. <https://doi.org/10.1002/ps.5352>
- Butts, T.R., Butts, L.E., Luck, J.D., Fritz, B.K., Hoffmann, W.C. & Kruger,G.R. (2019b) Droplet size and nozzle tip pressure from a pulse-width modulation sprayer. *Biosystems Engineering*, 178, 52-69. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.004>
- Cunha, J. P., França, J. A., Alvarenga, C. B. D., Alves, G. S., & Antuniassi, U. R. (2020). Performance of air induction spray nozzle models under different operating conditions. *Engenharia Agrícola*, 40(6), 711-718. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n6p711-718/2020>
- Derksen, R. C., Zhu, H., Fox, R. D., Brazee, R. D., & Krause, C. R. (2007). Coverage and drift produced by air induction and conventional hydraulic nozzles used for orchard applications. *Transactions of the ASABE*, 50(5), 1493-1501. <https://doi.org/10.13031/2013.23941>
- Ferguson, J. C., Hewitt, A. J., & O'Donnell, C. C. (2016). Pressure, droplet size classification, and nozzle arrangement effects on coverage and droplet number density using air-inclusion dual

- fan nozzles for pesticide applications. *Crop Protection*, 89, 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.07.032>
- Giles, D. K., & Comino, J. A. (1990). Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 47, 249-267. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(90\)80045-V](https://doi.org/10.1016/0021-8634(90)80045-V)
- Guan, Y., Chen, D., He, K., Liu, Y., & Li, L. (2015). Review on research and application of variable rate spray in agriculture. *2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (pp. 1575-1580). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2015.7334360>
- Herbst, A., & Ganzelmeier, H. (2000). Classification of sprayers according to drift risk - a German approach. *Aspects of Applied Biology*, 57, 35-40.
- Hewitt, A. J. (2000). Spray drift: impact of requirements to protect the environment. *Crop Protection*, 19, 623-627. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00082-X)
- Hong, S., Minzan, L., & Qin, Z. (2012). Detection system of smart sprayers: Status, challenges, and perspectives. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(4), 10-23. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20120503.002>
- Huang, X., Lan, Y., & Yin, X. (2019). Design and test of an agricultural variable nozzle based on magnetorheological fluid. *Journal of South China Agricultural University*, 40(4), 92-99. <http://dx.doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.201809038>
- Jiao, Y., Zhang, S., Jin, Y., Cui, L., Chang, C., Ding, S., Sun, Z., & Xue, X. (2025). Research progress on intelligent variable-

- rate spray technology for precision agriculture. *Agronomy*, 15(6), 1431. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061431>
- Johnson, M. P., & Swetnam, L. D. (1996). *Sprayer nozzles: Selection and calibration*. University of Kentucky, College of Agriculture, Cooperative Extension Service. <http://gvsafety.com/Documents/SAFETY%20HANDOUTS/Pesticide%20Safety/Sprayer%20Nozzles-Selection%20&%20Calibration.pdf>
- Karadol, H., Aybek, A., Ucgul, M., Kuzu, H., & Gunes, M. (2024). Field sprayer with application rate control using fast response proportional valves under variable speed conditions. *Agriculture*, 14(3), 361. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030361>
- Karadöl, H., Arslan, S., & Aybek, A. (2017). PID control for sprayer sections under laboratory conditions. *Agronomy Research*, 15(1), 187-195. https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/03/Vol15Nr1_Karadol.pdf
- Karadöl, H., Aybek, A., & Üçgül, M. (2020). Development of an automatic system to detect and spray herbicides in corn fields. *Journal of Agricultural Sciences*, 26(2), 190-200. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.495903>
- Kasap, E., Engürülü, B., Çiftçi, Ö., Kılınç, K., Gölbaşı, M., & Akkurt, M. (1999). *Bitki koruma makineleri*.
- Luck, J. D., Pitla, S. K., Shearer, S. A., Mueller, T. G., Dillon, C. R., Fulton, J. P., & Higgins, S. F. (2010). Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.08.003>

- Matthews, G. A., Bateman, R., & Miller, P. (2014). *Pesticide application methods* (4th ed.). Wiley-Blackwell.
- Miller, P. C. H., & Ellis, M. B. (2000). Effects of formulation on spray nozzle performance for applications from ground-based boom sprayers. *Crop Protection*, 19(8-10), 609-615. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00080-6)
- Nasir, F. E., Alam, M. S., Tufail, M., & Khan, M. T. (2021). A novel pressure and flow control technique for variable-rate precision agricultural sprayer. *Proceedings of the 2021 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAI54018.2021.9651446>
- Nuytens, D., Baetens, K., De Schampheleire, M., & Sonck, B. (2007). Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*, 97(3), 333-345. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>
- Petrović, D., Jurišić, M., Tadić, V., Plaščak, I., & Barač, Ž. (2018). Different sensor systems for the application of variable rate technology in permanent crops. *Tehnički Glasnik*, 12(4), 188-195. <https://doi.org/10.31803/tg-20180213125928>
- Sumner, P. E. (2009). *Sprayer nozzle selection*. <https://openscholar.uga.edu/record/22715?v=pdf>
- Teejet. (2026a). *Nozzles supplier*. <https://nozzlessupplier.com/tr/what-do-the-numbers-on-a-spray-nozzle-mean>
- Teejet. (2026b). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf

- Teejet. (2026c). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Teejet. (2026d). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Teejet. (2026e). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Teejet. (2026f). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Teejet. (2026g). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Teejet. (2026h). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Teejet. (2026i). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Teejet. (2026i). *Products*. https://www.teejet.com/hu-hu/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_us.pdf
- Van de Zande, J. C., Stallinga, H., Michielsen, J. M. G. P., & van Velde, P. (2005). Effect of sprayer speed on spray drift. *Annual Review of Agricultural Engineering*, 4(1), 129-142. <https://edepot.wur.nl/674079>

- Whitford, F., Sinha, R., de Oliveira Latorre, D., Young, B., Ozkan, E., Pearson, S., Obermeyer, J., & Smith, K. L. (2025). *Agricultural spray nozzles: A comprehensive review*. Purdue Pesticide Programs. <https://ag.purdue.edu/departments/extension/ppp/resources/ppp-publications/mobile/ppp-153/agricultural-spray-nozzles-a-comprehensive-review.html>
- Wolf, T. (2021). *Variable rate spraying*. <https://sprayers101.com/variable-rate-spraying>
- Zhang, Z., Wang, X., Lai, Q., & Zhang, Z. (2018). Review of variable-rate sprayer applications based on real-time sensor technologies. S. Hussmann (Ed.), *Automation in Agriculture - Securing Food Supplies for Future Generations* (pp. 63-80). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73622>
- Zhu, H., Dorner, J. W., Rowland, D. L., Derksen, R. C., & Ozkan, H. E. (2004). Spray penetration into peanut canopies with hydraulic nozzle tips. *Biosystems Engineering*, 87(3), 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.012>

BÖLÜM 4

TARIMSAL ÜRETİMDE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI: BİR LİTERATÜR DERLEMESİ

HAMZA KUZU¹
HAYRETTİN KARADÖL²
ALİ AYBEK³

Giriş

Tarımsal üretim; bitkisel ve hayvansal kökenli gıda, hammadde ve enerji gereksinimlerini karşılamak amacıyla toprak, su, hava ve güneş ışığı gibi doğal kaynakların, modern teknoloji ve çeşitli üretim girdileriyle birlikte kullanıldığı bütüncül bir faaliyet alanıdır. Tarım sektörü yalnızca toplumların temel beslenme ihtiyacını karşılamakla kalmaz; aynı zamanda kırsal bölgelerde istihdamın sürdürülmesi, gıda arz güvenliğinin sağlanması ve ulusal ekonominin güçlendirilmesi açısından da kritik ve stratejik bir öneme sahiptir.

¹ Arş. Gör. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-8585-4467

² Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-5062-0887

³ Prof. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-3036-8204

Teknolojik ilerlemenin ivme kazanması, başta üretim olmak üzere birçok sektörde önemli yapısal dönüşümlere yol açmaktadır. İnsan iş gücüne dayanan geleneksel üretim sistemleri, teknolojik gelişmeler etkisi ile kademeli olarak otomasyon temelli sistemlere dönüşmekte ve üretim kapasiteleri önemli ölçüde artmaktadır (Çan, 2021). Özellikle dördüncü sanayi devriminin tetiklediği tarımsal üretimde dijital ve teknolojik yeniliklerin kullanımı, artarak yaygınlaşmaya devam etmiş ve bu dönüşüm Tarım 4.0 olarak adlandırılmıştır (da Silveira & Amaral, 2023).

Tarım 4.0; büyük veri analitiğinden blok zincirine, bulut bilişimden otonom araçlar ve robotik sistemlere kadar geniş bir teknolojik yelpazeyi bünyesinde barındırmaktadır. Ayrıca nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) ve makine görme (machine vision) sistemleri gibi önemli bileşenlerle de desteklenmektedir (Uzun & ark., 2018; Ercan & ark., 2019). Bu teknolojilerin tarım sektörüne entegrasyonu ile birlikte bilgisayar destekli kontrol sistemleri, gelişmiş sensörler ile donatılmış tarım makineleri ve ekipmanları, görüntü işleme teknolojileri, coğrafi bilgi sistemleri ve insansız hava araçları tarımsal üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Aydın, 2022).

Son yıllarda hızlı bir gelişim gösteren görüntü işleme teknolojileri; savunma, güvenlik, sağlık, sanayi ve uzay gibi pek çok alanda etkin şekilde kullanılmaktadır (Çan, 2021). Bilgisayar ve dijital görüntüleme sistemlerinde yaşanan bu ilerlemeler sayesinde görüntü işleme uygulamaları tarım sektöründe de geniş bir kullanım alanı bulmuş, bitkisel ve hayvansal üretim süreçlerine katkı sağlamıştır. Bu uygulamalar özellikle veri toplama, görüntü sınıflandırma, nesne tespiti, bölütleme (segmentasyon) gibi amaçlar için kullanılabilir (Li & ark., 2021).

Günümüzde görüntü işleme teknikleri; domuz, balık, sığır ve kanatlılar gibi farklı hayvan türlerinde canlı ağırlık tahmini, karkas kalitesi, topallık ve duruş bozukluğu belirleme, beslenme ve stres

takibi yapabilmenin yanı sıra bitkilerde boy uzunluğu, büyüme oranı, rekolte tahmini, yabancı ot kontrolü ve hastalık tespitinde de başarı ile uygulanabilmektedir.

Bu çalışmada görüntü işleme teknolojileri hakkında temel bilgiler verilmiş ve tarımsal üretimde görüntü işleme uygulamalarına yönelik gerçekleştirilen önemli araştırmalar incelenerek özetlenmiştir.

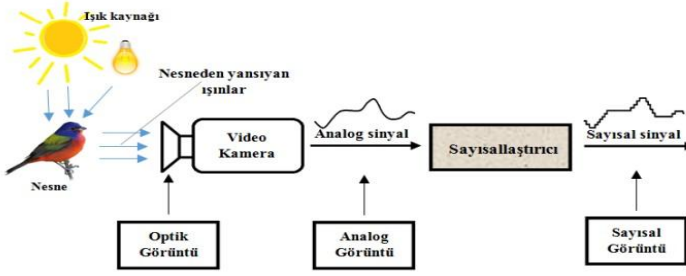
Görüntü işleme

Bilgisayar ortamında elde edilen veya oluşturulan grafikler, fotoğraflar, resimler ya da video görüntülerinin her bir karesi görüntü (image) olarak tanımlanmaktadır (Turan, 2017). Gerçek hayatta üç boyutlu nesnelerin iki boyutlu düzleme aktarılmasıyla elde edilen görüntüler, bilgisayar ortamında genellikle bir matris yapısı ile ifade edilmektedir. Bu matrisin her bir elemanı piksel olarak adlandırılmakta ve görüntünün en küçük birimini oluşturmaktadır (Yılmaz, 2016).

Bir görüntünün çözünürlüğü, sahip olduğu piksel sayısına bağlı olduğundan piksel sayısının artması, görüntü çözünürlüğünün ve dolayısı ile görüntü kalitesinin de yükselmesini sağlamaktadır. Her bir piksel, görüntünün görsel özelliklerini oluşturan belirli bir renk ve parlaklık değerine sahip olmaktadır (TÜRK SAT, 2024).

Görüntüler elde edilme ve sayısallaştırılma süreçlerine göre optik görüntü, analog görüntü ve sayısal görüntü olmak üzere üç grupta incelenmektedir (Şekil 1).

Şekil 1. Optik, analog ve sayısal görüntü



Kaynak: Aydın, 2013

Optik görüntü, ışık kaynağından yayılan ışınların bir nesneye çarpıp yansıması sonucunda oluşmaktadır. Bu görüntüler kamera veya fotoğraf makinesi gibi optik sistemlerden geçerek analog sinyaller aracılığı ile analog görüntüye dönüşmektedir. Analog sinyallerin sayısallaştırılması sonucunda ise sayısal görüntüler elde edilmektedir (Karakoç, 2012; Turan, 2017; Çan, 2021).

Görüntü işleme (Image Processing), sayısal görüntüler üzerinde bilgisayar algoritmaları ve çeşitli matematiksel yöntemler kullanılarak görüntünün analiz edilmesi, iyileştirilmesi ve amaca uygun hale getirilmesi sürecini kapsamaktadır (Çümen, 2020). Bu süreçte görüntüdeki her bir piksel matematiksel bir fonksiyonun parçası olarak değerlendirilmekte ve algoritmalar bu fonksiyonlar üzerinde çeşitli işlemler gerçekleştirmektedir.

Sayısal görüntüler, elde edilen verinin işleme ve saklanma biçimine göre; ikili (binary), gri seviyeli ve renkli görüntüler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. İkili görüntüler, siyah beyaz görüntüler olarak da ifade edilmektedir. Görüntünün piksel değeri 0 veya 1 olmaktadır. Burada 0 piksel değeri siyah rengi, 1 piksel değeri ise beyaz rengi temsil etmektedir (Yılmaz, 2016). Genelde ikili görüntülerde arka plan siyah renk, görüntü üzerindeki hedef nesne ise beyaz renk ile gösterilmektedir (Şekil 2).

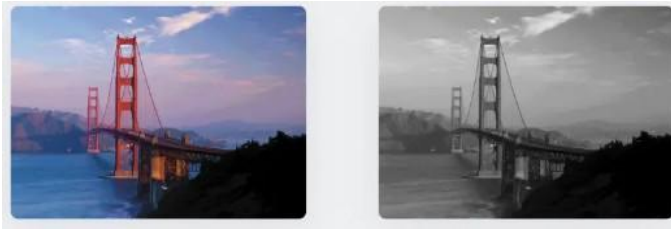
Şekil 2. İkili görüntü



Kaynak: Kundu, 2022

Gri seviyeli görüntüler, piksel değeri 0 ile 255 arasında olan ve siyah ile beyaz renk arasında bulunan sadece gri renk tonlarını ifade eden görüntülerdir (Yılmaz, 2016). 0 piksel değeri siyah rengi, 255 piksel değeri ise beyaz rengi temsil etmektedir (Şekil 3).

Şekil 3. Gri seviyeli görüntü



Kaynak: Kundu, 2022

Renkli görüntüler ise kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere 0 ile 255 arasında bir değer alan 8 bitlik bu üç ana renk kanalının birleşiminden elde edilen görüntülerdir (Yılmaz, 2016). Her bileşen 0 ile 255 arasında bir değer almakta ve diğer tüm renkler 8 bitlik bu üç farklı bileşenden oluşturulmaktadır (Şekil 4). Bu nedenle renkli görüntünün her bir pikseli 24 bit yer kaplamaktadır.

Bir görüntüde bulunan piksel sayısı ve görüntünün gri renk düzeyi, görüntü kalitesini ve boyutunu etkilemektedir. Görüntüler R (kırmızı, red), G (yeşil, green) ve B (mavi, blue) kodları ile oluşturulan üç adet gri düzeyli görüntü değerinden oluşmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi farklı dalga boylarında elde edilmiş üç gri

düzeyleli görüntü üst üste çakıştırılarak renkli görüntü elde edilmektedir.

Şekil 4. RGB görüntü



Kaynak: Kundu, 2022

Görüntü yakalama; herhangi bir nesnenin görüntüsünün fotoğraf makinesi veya kamera gibi donanımlar aracılığı ile dijital ortama aktarılmasıdır. Benzer şekilde, video veya hareketli görüntülerden çeşitli yazılımlar yardımı ile anlık kareler elde edilebilmektedir. Ayrıca, bilgisayar arayüzündeki verilerin Print Screen gibi komutlar ile kaydedilmesi de bir görüntü yakalama yöntemi olarak kabul edilmektedir (Karakoç, 2012; Köse, 2019). Görüntü yakalama adımından itibaren bir görüntü işleme çevriminde yer alabilecek temel adımlar Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5. Görüntü işlemede temel adımlar

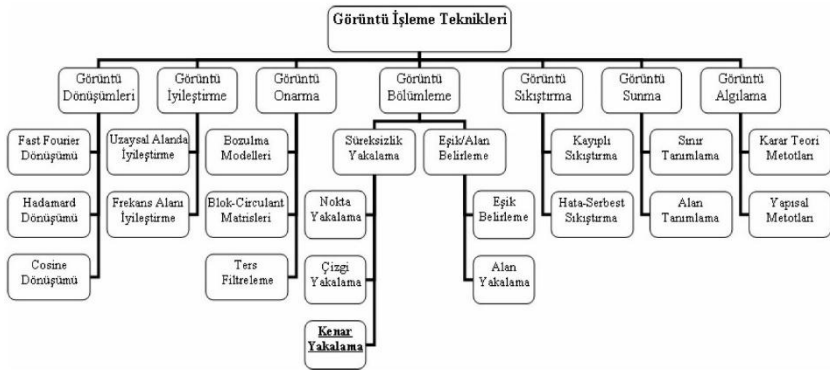


Kaynak: Arslan, 2011

Görüntü işleme düşük seviye, orta seviye ve yüksek seviye olmak üzere üç farklı seviyede incelenebilmektedir. Düşük seviye görüntü işlemede gürültü azaltma, kontrast artırımı ve görüntü belirginleştirme gibi giriş seviyesi ön işlemler bulunmaktadır ve giriş ile çıkış değeri bir görüntüden oluşmaktadır. Orta seviye görüntü işleme, bölütleme ve nesnelerin sınıflandırılması gibi işlemleri kapsamaktadır ve giriş değeri bir görüntü iken çıkış değeri genellikle giriş görüntüsündeki nesnelerin özelliklerinden oluşmaktadır. Yüksek seviye görüntü işleme ise bölütlemesi yapılan nesnelerin gruplandırılması ve anlamlandırılması gibi daha ileri düzey işlemleri içermektedir (Arslan, 2011).

Görüntü işleme tekniklerinin uygulanabilmesi için görüntünün sayısal görüntü haline getirilmesi gerekmektedir. Sayısal görüntü ise satır ve sütun matrisleri içeren piksellerden oluşmaktadır (Yılmaz, 2016). Görüntü işleme teknikleri Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6. Görüntü işleme teknikleri (Karakoç, 2011)



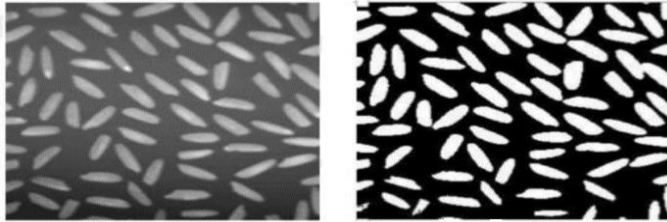
Kaynak: Karakoç, 2011

Görüntü eşikleme (Thresholding)

Eşikleme yöntemi, farklı gri seviyelerdeki görüntüleri ikili görüntü haline dönüştürebilmek için kullanılmakta ve görüntünün 0 ve 1'lerden oluşan bir matris haline getirilmesini sağlamaktadır. İkili

sistemde 0 siyah rengi, 1 ise beyaz rengi göstermektedir. Eşikleme yöntemi uygulanırken önce bir eşik değeri belirlenmekte ve belirlenen bu eşik değerinin üstündeki değerler için görüntüdeki ilgili piksel 1, altındaki değerler için ise 0 olarak atanmaktadır (Arslan, 2011; Gonzalez & Woods, 2018). Eşikleme yönteminde, eşik değerinin en uygun değer olarak belirlenebilmesi yapılacak olan analizin daha doğru sonuç verebilmesi için önemlidir. Eşik değeri çok yüksek olursa görüntü üzerindeki birçok nesne siyah renge, eşik değeri çok düşük olursa da görüntüdeki nesnelerin birçoğu beyaz renge dönüştürülmüş olacaktır. En uygun eşik değerini belirleyebilmek için genellikle Otsu metodu kullanılmaktadır. Gri seviye görüntüler üzerinde uygulanabilen bu metod, görüntünün histogram değerlerine göre hesap yapmakta ve görüntüyü ön ve arka plan olarak iki grupta sınıflandırmaktadır. Daha sonra tüm eşik değerleri için bu iki sınıfın varyansı hesaplanmakta ve bu varyans değerini minimumda tutan eşik değeri görüntü için en uygun eşik değeri olarak kabul edilmektedir (Khuman & ark., 2023). Sonuç olarak ilgili eşik değerinin altında kalan bölümler siyah renk piksele, üzerinde kalanları ise beyaz renk piksele dönüştüğünden görüntü üzerindeki nesnelerin arka plandan ayrılması ve analiz edilebilmesi sağlanmaktadır. Görüntü eşikleme gerçekleştirilen örnek bir uygulama Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 7. Örnek görüntü eşikleme uygulaması



Kaynak: Khuman & ark., 2023

Görüntü bölütleme (Segmentasyon)

Bölütleme, verileri daha iyi analiz edebilmek amacı ile, içerisindeki karakteristik özelliklere göre görüntüyü anlamlı ve benzer alanlardan oluşan kümelere ayırma işlemidir (Asano & ark., 1996; Arslan, 2011; Gonzalez & Woods, 2018). Yüksek seviyeli görüntü işleme süreçlerinden önce gelen bu işlem, analizin ilk ve en önemli basamağı olarak kabul edilmektedir. En çok kullanılan bölütleme yöntemleri, eşikleme tabanlı bölütleme, kenar tabanlı bölütleme, bölge tabanlı bölütleme ve çizgi tabanlı bölütlemedir (Zhu & Li, 2019). Bu bağlamda; histogram eşikleme, bölge büyütme, bölüm ayırma ve birleştirme, kümeleme, sınıflandırma, kural tabanlı veya bilgi tabanlı yaklaşımlar dahil olmak üzere birçok bölütleme tekniği mevcuttur (Gonzalez & Woods, 2018). Geliştirilen yöntemler pikseller arasındaki gri seviye değerlerinin süreksizlik (discontinuity) ve benzerlik (similarity) özelliklerine dayanmaktadır. Bölütleme yöntemleri genellikle hedef takibi, nesne sınıflama ve örüntü tanıma gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Şenkaya & Kurnaz, 2022). Bölütlemeye temel amaç, görüntüyü benzersiz sınıflara ve anlamlı bölgelere ayırabilmek; eşiklemede ise görüntüdeki nesneleri arka plandan ayırabilmektir (Katircioğlu, 2007).

Morfolojik işlemler

Morfolojik işlemler, gürültü nedeni ile bozulmuş görüntüleri temizlemek veya parçalanmış nesneleri bütünleştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Bu işlemler; nesne ve alanlar üzerinde kare veya daire gibi geometrik yapılardan oluşan yapısal elemanlar (structuring elements) aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Yapısal eleman, görüntü üzerinde gezdirilen ve morfolojik operatörler için tasarlanmış özel bir matristir (Atalı & ark., 2016; Yılmaz, 2016). Morfolojik operatörlerin uygulanabilmesi için görüntü öncelikle ikili (binary) moda dönüştürülmektedir. Aşındırma (erosion), genişletme (dilation), açma (opening), kapama (closing), boşluk doldurma (hole filling), iskeletleştirme (skeletonization), inceltme

(thinning) gibi çeşitli morfolojik işlemler bulunmaktadır. Aşındırma ile nesne sınırları daraltılarak küçük ve anlamsız gürültüler yok edilmekte; genişletme ile sınırlar büyütülerek kopuk parçalar birleştirilmekte ve nesne hacmi belirginleştirilmektedir. Açma işlemi ile önce aşındırma sonra genişletme uygulanarak nesnenin genel formu bozulmadan ince bağlantıları ve küçük çıkıntıları yok edilmektedir. Kapama işlemi ile önce genişletme sonra aşındırma yapılarak nesne üzerindeki küçük çatlaklar ve girintiler pürüzsüzleştirilmektedir. Boşluk doldurma işlemi ile nesne içerisinde ışık yansıması veya renk farkı gibi çeşitli nedenler ile oluşan boş pikseller tamamlanmaktadır. İskeletleştirme işleminde nesnenin şekilsel yapısı korunarak nesne formları temel bir geometrik iskelete dönüştürülmektedir. İnceltme işleminde ise nesnenin dış hatları kademeli olarak silinmekte ve tek piksel kalınlığında temel geometrik formu ortaya çıkarılmaktadır.

Görüntülerdeki nesnelerin tespiti ve tanınması

Bir görüntüde yer alan nesnenin konumunun belirlenmesi veya yerinin bir sınırlayıcı kutu (bounding box) ile işaretlenmesi işlemi nesne tespiti (object detection) olarak adlandırılmaktadır. Nesne tanıma (object recognition) ise, görüntüdeki nesnelerin hem yerlerini belirleme hem de bu nesnelere önceden tanımlanmış kategoriler arasından uygun sınıf etiketlerini atama sürecidir. Bu süreçte nesneler; görüntüden çıkarılan noktalar, kenarlar veya alanlar gibi ayırt edici detaylar üzerinden analiz edilmektedir. Görüntü üzerindeki nesnelerin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için; grileştirme, ikili formata dönüştürme, gürültü giderme, morfolojik işlemler ve kenar bulma gibi ön işleme basamaklarının uygulanması gerekmektedir. Özellikle endüstriyel uygulamalarda aydınlatma şiddeti, perspektif kaymaları, ölçek değişimleri gibi dış etmenlerin oluşturabileceği sorunları aşabilmek için öznitelik tabanlı (feature based) algoritmalar tercih edilmektedir. Bu algoritmalar aracılığı ile elde edilen öznitelikler, görüntüdeki anahtar noktaları

temsil ederek görüntüyü gereksiz bilgilerden arındırmakta; böylece hem işlem maliyetini düşürmekte hem de tespit ve tanıma süreçlerinin doğruluğunu artırmaktadır (Kaymak, 2016).

Tarımsal Üretimde Görüntü İşleme Uygulamalarına Yönelik Literatür Çalışmaları

Hayvansal üretime yönelik yapılan çalışmalar

De Wet & ark. (2003), etlik piliçlerde görüntü işleme teknikleri ile canlı ağırlık tahmini üzerine yaptıkları çalışmada, video kayıtlarından elde edilen görüntüleri analiz etmişlerdir. Görüntülere uyarlanabilir eşikleme (adaptive thresholding) yöntemi uygulanarak piliçler arka plandan başarı ile ayrılmıştır. Doğrusal olmayan regresyon analizi sonuçlarına göre vücut ağırlığı ile yüzey alanı piksel sayısı arasında 0.97 belirleme katsayısı (R^2) ve % 10 bağıl hata; çevre piksel sayısı ile ağırlık arasında ise 0.94 R^2 ve % 15 bağıl hata düzeyinde bir ilişki saptanmıştır. Elde edilen hata oranlarının işletmeler açısından sürü yönetiminde pratik kullanım için tatmin edici düzeyde olabileceği belirtilmiştir.

Mollah & ark. (2010), etlik piliçlerin dijital görüntülerini büyüme periyodu boyunca (42 gün) haftalık olarak kaydetmişlerdir. Görüntü analizinde ana hatların netleştirilmesi amacı ile koyu renkli zemin kullanılarak kontrast artırılmış ve vücut yüzey alanı piksel sayısını belirlemek için IDRISI32 yazılımından yararlanılmıştır. Elde edilen veriler doğrusal regresyon modeli ile analiz edilerek, yüzey alanı ile vücut ağırlığı arasında oldukça güçlü bir korelasyon ($r = 0.998$) saptanmıştır. Çalışma sonucunda, görüntü işleme yöntemi ile canlı ağırlık tahminindeki hata paylarının % 0.04 ile % 16.47 arasında değiştiği bildirilmiştir.

Mortensen & ark. (2016), ticari bir işletmede yetiştirme periyodunun son 20 gününde etlik piliçlerin canlı ağırlığını tahmin etmek amacı ile üç boyutlu (3D) görüntüleme teknolojilerinden yararlanmışlardır. Kinect derinlik kamerası kullanılarak elde edilen

görüntüler havza (watershed) algoritması ile bölütlenmiştir. Çalışmada; yaş, alan, çevre ve genişlik gibi 12 farklı morfolojik özellik çıkarımı yapılarak bu veriler ile beş farklı regresyon ve yapay sinir ağı (YSA) modeli uygulanmıştır. En yüksek tahmin başarısı, % 4.5 günlük ortalama hata payı ile Bayes YSA modelinde elde edilmiştir. Ayrıca; kanat çırpma ve esneme gibi hayvan davranışlarının yanı sıra yüksek sürü yoğunluğundan kaynaklı piliçlerin yan yana durmalarının görüntü bölütleme sürecini zorlaştırarak tahmin başarısını düşüren temel kısıtlar olduğu vurgulanmıştır.

Amraei & ark. (2017a), etlik piliçlerde canlı ağırlık tahmini gerçekleştirmek amacı ile görüntü işleme ve YSA içeren bir model geliştirmişlerdir. Görüntü içerisinde piliçlerin konumunun doğru şekilde tespit edilebilmesi için genelleştirilmiş Hough dönüşümü tabanlı bir elips yerleştirme algoritması kullanılmıştır. Piliçlerin gövde ağırlığına odaklanmak için Chan-Vese modeli ile görüntüden baş ve kuyruk kısımları çıkarılmıştır. Beş farklı morfolojik özelliğin (alan, çevre ve eksen uzunlukları vb.) giriş parametresi olarak kullanıldığı modeller arasında en başarılı sonuç, 0.98 belirleme katsayısı (R^2) ile Bayes algoritmalı YSA modelinde elde edilmiştir. Bu yöntem ile 50 g'dan daha az bir hata ile canlı ağırlık tespiti yaptıkları bildirilmiştir.

Amraei & ark. (2017b), etlik piliçlerde canlı ağırlık tahmini için destek vektör regresyonu (support vector regression, SVR) modelinin tahmin yeteneğini analiz etmişlerdir. Farklı açılardan kaydedilen dijital görüntüler üzerinden kapsamlı veri analizleri yapılmıştır. Görüntü işleme aşamasında, piliçleri tespit etmek için önce genelleştirilmiş Hough dönüşümü tabanlı bir elips yerleştirme algoritması, ardından da Chan-Vese modeli kullanılarak ağırlık tahmininde gürültü oluşturabilecek baş ve kuyruk kısımları görüntüden ayrılmıştır. Alan, çevre ve eksen uzunlukları gibi altı farklı morfolojik özniteliği SVR modeline giriş parametresi olarak

aktarılarak yapılan bu çalışmada, R^2 0.98 ve ortalama mutlak hata oranı (mean absolute percentage error, MAPE) ise % 8.63 olarak bildirilmiştir.

Amraei & ark. (2018), etlik piliçlerin canlı ağırlığını tahmin etmek amacıyla morfolojik özelliklere dayalı bir transfer fonksiyonu (transfer function) modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada, dijital görüntüler üzerinde önce histogram eşitleme (histogram equalization) yöntemi ile iyileştirme yapılmış, ardından Chan-Vese modeli kullanılarak toplam vücut alanının yaklaşık % 4'ünü oluşturduğu belirtilen baş ve kuyruk kısımları görüntüden ayrılmıştır. Alan, çevre ve eksen uzunlukları gibi altı temel özneliğin dahil edildiği transfer fonksiyonu modelinde, 0.98 gibi yüksek bir belirleme katsayısına ulaşılmıştır. Bu modelin işletme şartlarında canlı ağırlık takibi için güvenilir ve pratik bir araç sunabileceği ifade edilmiştir.

Jorgensen & ark. (2019), etlik piliç kesimhanelerinde karkas ağırlığının tahmini için 2D ve 3D veri setlerini birleştiren hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Karkasların 3D tarama yöntemi ile elde edilen hacimsel verileri, 2D görüntü özellikleri ile entegre edilerek analiz edilmiştir. İki farklı veri grubunun birleştirilmesiyle oluşturulan bu modelde; ortalama mutlak hata % 3.47, birleştirilen özellikler ile karkas ağırlığı arasındaki belirleme katsayısı ise 0.963 olarak bulunmuştur.

Santos & ark. (2020), keçi ve koyun derilerinin kalite sınıflandırması için bilgisayarlı görü tabanlı bir sistem geliştirmişlerdir. Deri sanayisindeki öznel değerlendirme hatalarını gidermeyi hedefleyen çalışmada, Bayes, destek vektör makineleri (support vector machines, SVM) ve en iyi yol ormanı (optimum path forest, OPF) algoritmaları ile deri yüzeyinin karakteristik yapısını tanımlayan 10 temel Haralick doku özelliği (Haralick texture features) öznel olarak kullanılmıştır. Çalışmada, daha az veri kullanılarak % 93.22 gibi yüksek bir doğruluk oranına ulaşılmıştır.

Bir derinin kalite sınıflandırmasını sadece 3.78 saniye içinde tamamlayabilen bu yöntemin, deri endüstrisinde hızlı ve standart bir kalite kontrol aracı olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Banwari & ark. (2022), balık görüntülerinden tazelik seviyesini tahmin eden görüntü işleme tabanlı bir algoritma geliştirmiştir. Balığın gözündeki renk ve doku değişimleri ile tazelik durumu doğrudan ilişkili olduğu için bu sistem sayesinde göz bölgesi otomatik olarak bölütlenerek öznitelik çıkarımı ve tazelik sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir. Çalışmada, balıkların tazelik seviyelerinin belirlenmesinde % 96.67 oranında bir doğruluk elde edilmiştir. Hızı, temassız yapısı ve yüksek doğruluk oranı ile dikkat çeken bu yöntemin, su ürünleri endüstrisinde objektif bir dijital denetim aracı olarak öne çıkabileceği bildirilmiştir

Electra & ark. (2022), kümes ortamındaki etlik piliçlerin video kayıtları üzerinden canlı ağırlık tahmini gerçekleştirmek amacı ile kapsamlı bir görüntü işleme iş akışı tasarlamışlardır. RGB formatındaki görüntüler öncelikle gri seviyeye dönüştürülmüş; ardından gürültü giderme, uyarlanabilir eşikleme ve morfolojik operatörler uygulanmıştır. Nesne ayrıştırma sürecinde Watershed algoritması ile her bir piliç görüntüsünden alan, çevre, ana eksen, ortalama ve maksimum yarıçap gibi morfolojik öznitelikler çıkarılmıştır. İşletmeden alınan ağırlık verileri ile bu özellikler kullanılarak MLR (çoklu doğrusal regresyon, multiple linear regression), YSA ve SVR modelleri karşılaştırılmıştır. En yüksek performans, 144.7 g kök ortalama kare hata (root mean square error, RMSE) değeri sağlayan SVR modeli ile elde edilmiştir. Model başarısını sınırlayabilecek temel faktörler; piliçlerin birbirine yakın durması kaynaklı çakışmalar, düşük ışık koşulları ve yemlik-suluk gibi ekipmanların hatalı bölütlenmesi olarak belirlenmiştir.

Li & ark. (2023), etlik piliçlerin canlı ağırlığını tahmin etmek amacı ile derin öğrenme ve öznitelik çıkarımı yöntemlerini içeren üç modüllü hibrit bir model geliştirmişlerdir. Derinlik kamerası

kullanılarak elde edilen görüntüler; ilk aşamada Mask R-CNN mimarisi tabanlı bir örnek bölütleme (instance segmentation) modülü ile analiz edilerek piliçler arka plandan ve birbirlerinden ayrılmıştır. İkinci aşamada, derin öğrenme ile otomatik öğrenilen özellikler ile manuel olarak tasarlanmış morfolojik özellikler birleştirilmiştir. Son aşamada ise bu öznetelik seti, gradyan artırıcı karar ağaçları (gradient boosting decision tree, GBDT) algoritması ile işlenerek ağırlık tahmini gerçekleştirilmiştir. Modelin canlı ağırlığı 93 g ortalama mutlak hata ve 0.707 belirleme katsayısı ile tahmin edebildiği bildirilmiştir.

Campbell & ark. (2025), etlik piliçlerin 2D video görüntüleri üzerinden canlı ağırlık tahmini gerçekleştirmek amacıyla iki aşamalı bir çalışma yürütmüşlerdir. İlk aşamada, farklı yaş gruplarındaki (23 ve 35 günlük) piliçlerden alınan video görüntüleri üzerindeki piliçlerin etrafına elips ve bounding box çizilerek; genişlik, yükseklik, büyük eksen, küçük eksen, elips alanı, yaş ve duruş pozisyonu (oturmuş veya ayakta) gibi özellikler kaydedilmiştir. Bu özellikler kullanılarak farklı regresyon modelleri oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Ağırlık tahmini için en iyi performansı, 82.5 ile 88.7 g arasında değişen ortalama mutlak hata (mean absolute error, MAE) ve % 4.5 ile 6.4 arasında değişen ortalama bağıl hata (mean relative error, MRE) ile küçük eksen ve yaş özelliği kullanan model göstermiştir. Araştırmanın ikinci aşamasında ise daha geniş yaş gruplarındaki (5-35 günlük) piliçlerden alınan veriler ile bu modelin doğrulaması yapılmıştır. Doğrulama testleri sonucunda modelin 60.5 g MAE ve % 7 MRE ile çalıştığı bildirilmiştir.

Marques & ark. (2025), koyunlarda canlı ağırlık takibini temassız ve otonom hale getirmek amacı ile derinlik sensörlü kamera teknolojisi ve yapay zekâ tabanlı bir video analiz sistemi geliştirmiştir. Çalışmada, video akışından en uygun karelerin seçilmesi, hayvanın görüntüden ayrıştırılması ve ağırlık tahmini aşamalarında gelişmiş yapay zekâ mimarileri kullanılmıştır. Yapılan

testler sonucunda sistemin, 3.44 kg RMSE ve 0.90 belirleme katsayısı ile yüksek doğrulukta sonuç verdiği saptanmıştır.

Kang & ark. (2025), süt sığırlarında topallık (lameness) teşhisi için görüntü işleme ve yapay zekâ tabanlı bir takip sistemi geliştirmiştir. Sistem; hayvanın yürüyüşü sırasında ayak hareketlerini ve sırt hattındaki değişimleri analiz ederek çalışmaktadır. Araştırma sonucunda; sağlıklı ve topal hayvanların birbirinden ayırt edilmesinde % 99.05, topallık derecesini sınıflandırmada da % 92.80 gibi oldukça yüksek bir doğruluk oranına ulaşılmıştır. Sistemin sağlayabileceği erken teşhis kabiliyeti, işletme genelinde sürü sağlığını korumaya yönelik önemli bir erken uyarı mekanizması oluşturabilmektedir.

Lee & ark. (2025), iklim değişikliği ve hastalıklar nedeni ile popülasyonu azalan bal arılarını korumak amacı ile kovan içindeki zararlıları otonom olarak tespit eden bir sistem geliştirmiştir. Çalışmada, özellikle tespiti oldukça güç olan arı akarları (*Varroa destructor*) ve kovan içindeki arı, larva, hücre gibi diğer nesnelerin tespiti için yapay zekâ tabanlı bir nesne tespit algoritması kullanılmıştır. Arı peteklerinden alınan yüksek çözünürlüklü görüntüler üzerinde yapılan eğitimlerde; veri artırma ve özel örnekleme yöntemleri sayesinde sistemin performansı artırılmıştır. Araştırma sonucunda, arı akarlarının tespitinde % 97.4, kovan içindeki diğer nesnelerin tespitinde ise % 96.4 gibi oldukça yüksek başarı oranına ulaşılmıştır. Çalışma, kovan açılmadan zararlıların erken teşhisine ve koloni kayıplarının önlenmesine yardımcı olan bir dijital izleme aracı sunmaktadır.

Kuzu (2025), etlik piliç yetiştiriciliğinde geleneksel elle tartım yöntemine alternatif olarak; iş gücü kaybını azaltan ve hayvan refahını koruyan görüntü işleme ve derin öğrenme tabanlı temassız bir canlı ağırlık tahmin sistemi geliştirmiştir. Ticari bir işletmede yürütülen çalışmada, piliç görüntülerinin en az müdahale ile alınabilmesi için otomatik kontrollü bir ölçüm kabini tasarlanmış ve

dijital kamera aracılığı ile veriler elde edilmiştir. Görüntüler üzerinde yapılan morfolojik analizler ve çoklu regresyon hesaplamaları sonucunda, gerçek ağırlık verileri ile 0.97 gibi yüksek bir belirleme katsayısı ve % 7.6 MRE ile tahmin başarısı sağlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında uygulanan YOLO derin öğrenme modeli ise, 17 farklı canlı ağırlık sınıfı için 0.969 genel ortalama kesinlik (mAP-mean Average Precision) değerine ulaşarak yüksek bir sınıflama başarısı sergilemiştir.

Bitkisel üretime yönelik yapılan çalışmalar

Tian & ark. (2000), soya ve mısır tarlalarında hassas ilaçlama yapabilen bir nokta püskürtme (spot-spraying) sistemi tasarlamışlardır. Çalışmada, gerçek zamanlı kamera görüntüleri üzerinden yabancı ot yoğunluğunun belirlenmesi ve ilaçlama hassasiyetinin artırılması hedeflenmiştir. Yabancı ot ile kültür bitkisinin ayırt edilmesi için dalgacık dönüşümü (wavelet transform) yöntemi kullanılmış; yabancı ot yoğunluğunun belirlenen eşik değerin üzerine çıktığı bölgelerde ilgili püskürtme memesinin çalışması sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, geleneksel ilaçlama yöntemlerine kıyasla % 48 oranında ilaç tasarrufu sağlanabileceği bildirilmiştir.

Yang & ark. (2002), mısır bitkisini ilk olgunlaşma evresinde yabancı otlardan ayırt etmek amacı ile YSA tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, farklı aydınlatma koşulları altında elde edilen görüntüler üzerinde ön işleme aşamaları yürütülerek hedef bitki ve yabancı otların aynı çerçeve içerisinde yer aldığı görüntüler yeniden boyutlandırılmıştır. Görüntü bölütleme aşamasında, yeşil nesneler ön plana çıkarılarak arka plan ve diğer renk bileşenleri sıfırlanmış; modelin işlem yükünü azaltmak amacı ile renkli görüntüler gri seviyeye dönüştürülmüştür. Hazırlanan veri seti ile eğitilen YSA modelinin ayırt etme performansının mısır bitkisinde

% 100, imam pamuğu otunda % 92, yabancı havuç otunda % 80 ve sirken otunda ise % 62 olduğu bildirilmiştir.

Tangwongkit & ark. (2006), şeker kamışı tarımında sıra arası yabancı ot kontrolü için gerçek zamanlı ve değişken oranlı (variable rate) bir ilaçlama sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, web kamera aracılığı ile elde edilen görüntülerdeki yabancı ot yoğunluğu dört farklı sınıfa ayrılmıştır (1. seviye: ot yok, 4. seviye: maksimum yoğunluk). Sistemde, her yoğunluk seviyesine uygun dozajda sıvı iletimini sağlamak amacı ile darbe genişlik modülasyonu (pulse width modulation, PWM) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle 12V DC püskürtme pompası oransal olarak kontrol edilerek, her durum için gerekli debi miktarı hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, traktör tekerleğine yerleştirilen indüktif yaklaşım sensörü ile hız bilgisi anlık olarak hesaplanarak hem ilaçlamanın hedef noktaya tam isabet etmesi sağlanmış hem de hız değişimlerine karşı debi otomatik olarak kompanze edilmiştir.

Nejati & ark. (2008), mısır tarlalarından elde edilen görüntüler üzerinde gerçek zamanlı olarak fourier dönüşümü (fourier transform) ve yaprak kenar yoğunluğu yöntemlerini kullanarak yabancı ot ile kültür bitkisi sınıflandırma başarısını incelemişlerdir. Çalışmada, ilk olarak RGB formatındaki görüntüler gri seviyeye dönüştürülmüştür. Kenar belirleme aşamasında, her bir pikselin gri seviye değeri bir sonraki pikselle karşılaştırılmış; belirlenen eşik değerin (0.05) üzerindeki kenar, altındakiler ise arka plan olarak atanarak nesne sınırları tespit edilmiştir. İkinci aşamada, bu kenar görüntülerine frekans ve yoğunluk filtreleri uygulanarak yabancı otlar, kültür bitkileri ve zemin bölgeleri ayrıştırılmıştır. Geliştirilen bu yöntemin, mısır arazisinden alınan görüntülerde yabancı otları % 92 doğruluk oranı ile tespit edebildiği bildirilmiştir.

Gee & ark. (2008), mısır alanlarında yabancı ot yoğunluğunu yüzdesel olarak tespit edebilen bir görüntü işleme algoritması

geliştirmişlerdir. İlk aşamada sıra üzerindeki mısırlar fiziksel olarak düz bir hat şeklinde oldukları için görüntü üzerinde doğru parçalarını belirlemede kullanılan Hough dönüşümünden yararlanılmıştır. Bu yöntem ile bitki sıraları üzerine sanal doğrular çizilmiş ve bu doğrularla temas eden tüm pikseller mısır bitkisi olarak sınıflandırılmıştır. İkinci aşamada ise sıra aralarında kalan yabancı otların tespiti için BLOB (binary large object, ikili büyük nesne) analizi uygulanmıştır. Bu yöntemde ikili görüntü üzerindeki birbirine bağlı piksel gruplarının boyut ve form özellikleri incelenerek nesnelerin sınıflandırılması sağlanmıştır.

Ishak & Rahman (2010), yabancı otları gerçek zamanlı olarak tespit edip ilaçlama yapan çevrimiçi otomatik bir pülverizasyon sistemi geliştirmişlerdir. Sistemde, yabancı otlar hassas bir şekilde algılanarak sadece hedef noktalara uygulama yapılmakta; aynı zamanda otların yoğunluğu ve çıkış noktaları anlık olarak belirlenmektedir. Web kamera üzerinden alınan görüntülerin RGB piksel değerleri bilgisayar yazılımı tarafından analiz edilmektedir. Elde edilen bu veriler, referans olarak belirlenen eşik değerler ile karşılaştırılarak yeşil piksel yoğunluğu veya yüzdesi hesaplanmaktadır. Kamera görüntüsünde yeşil piksel yoğunluğu eşiği aştığında yani yabancı ot tespit edildiğinde püskürtme memeleri otomatik açılmaktadır. Bu sistemle; çevre kirliliğinin önlenmesi, ilaçlama maliyetlerinin düşürülmesi, iş gücü tasarrufu ve ürün kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır.

Siddiqi & ark. (2011), gerçek zamanlı yabancı ot sınıflandırması için iki farklı algoritmanın performansını incelemişlerdir. Kenar bağlantısı (edge link) denetim algoritması ile % 93, havza bölütlemesi algoritması ile % 92.5 doğruluk oranına ulaşmıştır. Havza algoritmasının döngü süresinin, kenar algoritmasına göre daha kısa olduğu ve yöntemin daha yüksek hızda sonuç ürettiği belirlenmiştir.

Ahmad & ark. (2011), geniş ve dar yapraklı yabancı otların gerçek zamanlı olarak sınıflandırılması amacı ile Haar dalgacık ayrışımı (Haar wavelet decomposition) yöntemini kullanmışlardır. Üç temel aşamadan oluşan çalışmanın bölütleme bölümünde; görüntülere histogram eşitleme ve genişletme işlemleri uygulanarak kontrast iyileştirmesi yapılmıştır. Özellik çıkarımı aşamasında, dalgacık ayrıştırma yöntemi ile görüntülerden ayırt edici 200 adet bilgi katsayısı elde edilmiştir. Son aşama olan sınıflandırmada ise k-NN (k-en yakın komşu, (k-nearest neighbor) algoritması kullanılarak yabancı otların % 94 doğruluk oranı ile 40 milisaniyede sınıflandırıldığı belirtilmiştir.

Burgos-Artizzu & ark. (2011), mısır tarlalarından 25 fps (frame per second, saniyedeki kare sayısı) hızında aldıkları görüntülerden bir yabancı ot denetim sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, renkli görüntüler önce gri seviyeye ve ardından da otomatik eşikleme yöntemi ile ikili görüntüye dönüştürülmüştür. Bu işlemle bitkiler ön plan, toprak ve diğer materyaller ise arka plan nesnesi olarak ayrıştırılmıştır. Sınıflandırma aşamasında, ikili görüntüden alınan enine kesitler üzerindeki nesne genişlikleri analiz edilmiş; genişliği belirlenen eşik değerin altında kalan nesneler yabancı ot olarak tanımlanmıştır. Sistem yabancı otların ortalama % 95'ini, ürünlerin ise % 80'ini başarı ile tespit etmiştir.

Sabancı (2013), laboratuvar koşullarında yürüttüğü çalışmada, şeker pancarı bitkisi üzerinde yabancı ot tespitine yönelik bir deney düzeneği geliştirmiştir. Bitki sırası üzerine ve sıra arasına ayrı ayrı konumlandırılmış iki adet web kamerası kullanılmıştır. Geliştirilen yazılımda; sıra arasında kalan tüm bitkiler yabancı ot olarak tanımlanırken, sıra üzerindeki yabancı otların ayırt edilmesinde YSA yönteminden yararlanılmıştır. Araştırma sonucunda, geliştirilen hassas ilaçlama robotunun geleneksel

ilaçlama yöntemine kıyasla % 54 oranında ilaç tasarrufu sağladığı bildirilmiştir.

Tekinalp & ark. (2013), yeşil zeytinlerin konum tespiti ve gerçek zamanlı kontrolü için MATLAB tabanlı bir görüntü işleme sistemi geliştirmişlerdir. Sabit bir kameradan alınan veriler, geliştirilen yazılım aracılığıyla işlenerek OPC (open platform communications, açık platform haberleşmesi) sunucusu üzerinden PLC (programmable logic controller, programlanabilir mantıksal denetleyici) birimine aktarılmıştır. MATLAB ve Siemens S7-1200 PLC'nin senkronize çalıştırıldığı sistemde, nesnelerin renklerine göre ayırt edilmesi yaklaşık 5-6 saniye sürmüştür. Endüstriyel uygulamalarda yüksek çözünürlüklü kameralar ve uygun lens kullanımı ile işlem hızının ve başarı oranının artırılabilceği belirtilmiştir.

Paap (2014), bitki yapraklarının spektral yansımalarını analiz ederek yabancı otları tespit eden ve nokta hedefli ilaçlama yapabilen bir prototip makine geliştirmiştir. Sistemde, bitkiler lazer ışık kaynağı ile düz bir şerit halinde aydınlatılmış ve geri yansıyan ışığın dalga boyları bir spektrometre (ışık tayf ölçer) aracılığı ile incelenmiştir. Şeker pancarı, nohut ve pamuk bitkileri arasında bulunan yabancı otların spektral yansımaları 5 km h⁻¹ hızda ölçülmüştür. Belirtilen kültür bitkilerinin % 85-90 doğruluk oranı ile yabancı otlardan ayırt edilebildiği bildirilmiştir.

Örnek (2014), havuç sınıflandırmasında geleneksel mekanik sistemler ile gerçek zamanlı görüntü işleme yöntemini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada, havuçların boy, çap ve kütle gibi fiziksel özellikleri üzerinden yapılan testlerde hata oranları; boyuna merdaneli makinelerde % 88, enine merdaneli makinelerde ise % 99 olarak saptanmıştır. Buna karşılık, gerçek zamanlı görüntü işleme tabanlı sistemde hata oranının % 5.42 ile % 9 aralığına gerilediği ve sınıflandırma başarısının önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir.

Yılmaz (2016), zirai tuzaklardaki böcek sayımını otonom hale getirmek için MATLAB tabanlı bir görüntü işleme iş akışı geliştirmiştir. Saha ortamına yerleştirilen kamera ve mini bilgisayar aracılığı ile elde edilen görüntüler, ağ üzerinden bir FTP (file transfer protocol, dosya aktarım protokolü) sunucusuna aktarılmıştır. Ana bilgisayara çekilen veriler, analiz edilmek üzere MATLAB ortamında işlenmiştir. Görüntü işleme aşamasında veriler önce gri seviyeye, ardından nesne ayrımı için ikili formata dönüştürülmüştür. Birbirine temas eden nesnelerin ayrıştırılması amacı ile morfolojik operatörler kullanılmış ve son aşamada otomatik sayım yapılarak böcek sayısı hesaplanmıştır.

Dilbilir (2017), Siirt fıstığının ağırlık, genişlik ve uzunluk gibi fiziksel özelliklerini tahmin etmek amacı ile görüntü işleme ve istatistiksel yöntemleri birleştiren bir model geliştirmiştir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen görüntü işleme aşamasında, matematiksel morfoloji yöntemleri kullanılarak fıstıkların çevre ve alan değerleri piksel cinsinden hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler ile gerçek ölçümler karşılaştırılarak regresyon eşitlikleri türetilmiştir. En uygun modeller; ağırlık tahmini için % 93.1 (sanal genişlik ve uzunluk çarpımı modeli), uzunluk için % 96.2 (sanal uzunluk modeli) ve genişlik için % 95.7 (sanal genişlik modeli) belirleme katsayılarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Karadöl (2017), mısır tarımında gerçek zamanlı yabancı ot tespiti ve değişken düzeyli ilaçlama yapabilen, traktöre monte edilmiş bir kontrol sistemi geliştirmiştir. Sistemde, traktörün ön kısmına yerleştirilen kamera aracılığı ile alınan arazi görüntüleri MATLAB ortamına aktarılmış ve görüntü işleme algoritmaları kullanılarak yabancı otların yoğun olduğu bölgeler tanımlanmıştır. Elde edilen veriler OPC haberleşme protokolü üzerinden bir PLC birimine iletilerek, sadece hedef bölgelerde püskürtme ünitesinin çalışması sağlanmış ve hassas bir kontrol mekanizması yürütülmüştür. Arazi testleri sonucunda, sistemin 4, 6 ve 8 km h⁻¹

ilerleme hızlarında geleneksel ilaçlama yöntemine göre sırası ile % 30.21, % 28.82 ve % 32.28 oranında ilaç tasarrufu sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca geliştirilen debi kontrol sisteminin, 100 L ha⁻¹ hedef uygulama normunu farklı hızlarda % 8.94 gibi düşük bir sapma payı ile başarı ile koruyabildiği bildirilmiştir.

Tiwari & ark. (2021), tarımsal üretimde büyük risk oluşturan bitki hastalıklarının yaprak görüntüleri üzerinden otomatik teşhis edilmesi amacı ile yoğun evrışimsel sinir ağları tabanlı bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmada; elma, fasulye, turunçgil, patates, pirinç ve domates olmak üzere 6 farklı ürün grubuna ait 27 farklı kategoriye (sağlıklı yapraklar ile turunçgil kanseri, yeşillenme hastalığı, pas ve yanıklık vb.) içeren, laboratuvar ve gerçek arazi koşullarında kaydedilmiş geniş bir veri seti kullanılmıştır. Geliştirilen model; sınıf içi ve sınıflar arası yüksek görsel çeşitlilik ile karmaşık arka plan koşullarına sahip görüntüler üzerinde test edilmiştir. Sistem eğitildiği veriler dışında daha önce hiç görmediği görüntüler üzerinde % 99.19 gibi oldukça yüksek bir test doğruluğuna ulaşmıştır. Tek bir görüntüyü işleme süresi 0.016 saniye olan sistemin, gerçek zamanlı izleme süreçlerinde ve otonom cihazlarda yüksek performans ile çalışabileceği bildirilmiştir.

Guerbaoui & ark. (2025), domates bitkilerinde su stresini görüntüler üzerinden derin öğrenme yöntemleri ile tespit ederek mobil uygulama üzerinden otonom sulama kontrolü de yapabilecek bir sistem tasarlamışlardır. RGB görüntülerden oluşan geniş bir veri seti kullanılarak, bitkiler aldıkları su miktarına göre dört farklı stres sınıfına ayrılmıştır. Görüntü ön işleme aşamasında arka plan temizleme teknikleri kullanılarak sadece bitki morfolojisine odaklanılmıştır. Farklı derin öğrenme mimarileri kullanılarak performans karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Hazır bir yapı olan VGG16 modeli % 99.30 genel doğruluk oranı ile en yüksek başarıyı sergilerken, çalışmada kullanılan evrışimsel sinir ağı modeli ise % 96.81 doğruluk oranına ulaşmıştır. Geliştirilen bu model, bir Android

uygulamasına entegre edilerek Raspberry Pi 5 kontrol cihazı ile haberleştirilmiştir. Sistemin, kameradan gelen bitki görüntüsünü analiz ederek su pompasını otomatik olarak çalıştırdığı ve ihtiyaca göre hassas sulama yapabildiği bildirilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Sonuç

Görüntü işleme teknolojileri, son yıllarda tarımsal üretimde verimliliği artırmak, üretim süreçlerini otomatikleştirmek ve karar destek sistemlerini geliştirmek amacı ile yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sistemleri ve güçlü veri işleme algoritmaları sayesinde hem bitkisel hem de hayvansal üretimde görüntü işleme uygulamaları önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir.

Hayvansal üretime yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, görüntü işleme tekniklerinin özellikle canlı ağırlık tahmini, hayvan davranışlarının izlenmesi ve sürü yönetimi gibi konularda başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Etlik piliçler üzerinde yapılan araştırmalarda, görüntülerden elde edilen alan, çevre ve eksen uzunluğu gibi morfolojik özellikler kullanılarak canlı ağırlık tahmininin yüksek doğruluk oranları ile gerçekleştirilebildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte sürü yoğunluğu, aydınlatma koşulları ve hayvanların hareketli olması gibi faktörlerin görüntü bölütlemesini zorlaştırabildiği ve tahmin doğruluğunu etkileyebildiği ifade edilmektedir.

Bitkisel üretimde gerçekleştirilen çalışmalar ise görüntü işleme tekniklerinin özellikle yabancı ot tespiti, ürün sınıflandırma, hassas ilaçlama, bitki gelişim analizi ve zararlı böcek tespiti gibi alanlarda kullanıldığını göstermektedir. Kamera tabanlı sistemler ve çeşitli görüntü işleme algoritmaları sayesinde kültür bitkileri ile yabancı otların ayrımı yapılabilmekte, yabancı ot yoğunluğu

belirlenebilmekte ve buna bağlı olarak değişken oranlı ilaçlama uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede hem kimyasal kullanımında önemli ölçüde tasarruf sağlanmakta hem de çevresel etkiler azaltılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, görüntü işleme teknolojilerinin tarımsal üretimde otomasyonun geliştirilmesi, iş gücü ihtiyaının azaltılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve üretim verimliliğinin artırılması açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bu teknolojiler, hassas tarım uygulamalarının geliştirilmesinde ve sürdürülebilir tarım sistemlerinin oluşturulmasında önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

neriler

- Tarımsal retimde görüntü işleme uygulamalarının yaygınlaştırılabilmesi için farklı ürün ve hayvan türleri üzerinde daha kapsamlı veri setleri ile çalışmalar yapılmalıdır.
- Görüntü işleme sistemlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla farklı aydınlatma koşulları, kamera açıları ve çevresel faktörlerin etkilerini dikkate alan algoritmalar geliştirilmelidir.
- Görüntü işleme teknikleri, yapay zekâ ve derin öğrenme yöntemleri ile birlikte kullanılarak daha hızlı ve yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebilecek akıllı tarım sistemleri oluşturulmalıdır.
- Gerçek zamanlı çalışan görüntü işleme sistemlerinin tarım makineleri ve robotik platformlarla entegrasyonu sağlanarak hassas tarım uygulamaları geliştirilebilir.
- Tarımsal retimde kullanılan görüntü işleme tabanlı sistemlerin maliyetlerinin düşürülmesi ve kullanımının

kolaylaştırılması, üreticiler tarafından benimsenmesini artıracaktır.

- Üniversiteler, araştırma kurumları ve özel sektör iş birliği ile tarımsal görüntü işleme uygulamalarının geliştirilmesi ve sahada uygulanabilir prototip sistemlerin oluşturulması teşvik edilmelidir.

Bu öneriler doğrultusunda geliştirilecek yeni çalışmalar, tarımsal üretimde dijitalleşme sürecini hızlandıracak ve daha sürdürülebilir, verimli ve akıllı tarım sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Açıklama

Bu çalışma, Ali AYBEK'in danışmanı olduğu, Hamza KUZU ve Hayrettin KARADÖL'ün doktora tezlerinden derlenmiştir.

Kaynakça

- Ahmad, I., Siddiqi, M. H., Fatima, I., Lee, S., & Lee, Y. K. (2011). Weed classification based on Haar wavelet transform via k-Nearest Neighbor (k-NN) for real-time automatic sprayer control system. *ICUIMC '11: Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, Seul, 1-6. <https://doi.org/10.1145/1968613.1968634>
- Amraei, S., Abdanan Mehdizadeh, S., & Salari, S. (2017a). Broiler weight estimation based on machine vision and artificial neural network. *British Poultry Science*, 58(2), 200-205. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1259530>
- Amraei, S., Mehdizadeh, S. A., & Sallary, S. (2017b). Application of computer vision and support vector regression for weight prediction of live broiler chicken. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 10(4), 266-271. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2017.04.003>
- Amraei, S., Mehdizadeh, S. A., & Nääs, I. D. A. (2018). Development of a transfer function for weight prediction of live broiler chicken using machine vision. *Engenharia Agrícola*, 38(5), 776-782. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n5p776-782/2018>
- Arslan, E. (2011). *Hücresel sinir ağı sistemleri kullanarak hareketli nesnelerin görüntü işleme uygulamaları* [Doktora Tezi]. İstanbul Üniversitesi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=LXq_u1Uf7C7U730bNMBTzw&no=iB4Vla8ZMjHCOfXWnc6hTg
- Asano, T., Chen, D. Z., Katoh, N., & Tokuyama, T. (1996). Polynomial-time solutions to image segmentation. *In Proceedings of the Seventh Annual ACM-SIAM Symposium*

- on *Discrete Algorithms*, Atlanta, 104-113.
<https://dl.acm.org/doi/10.5555/313852.313897>
- Atalı, G., Özkan, S. S., & Karayel, D. (2016). Morfolojik görüntü işleme tekniği ile yapay sinir ağlarında görüntü tahribat analizi. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 1-7. <https://doi.org/10.21541/apjes.27271>
- Aydın, İ. (2013). *Sayısal görüntü işlemeye giriş*. http://web.firat.edu.tr/iaydin/bmu357/bmu357_bolum0.pdf
- Aydın, N. (2022). Tarım sektöründe bilgi teknolojileri. *Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi*, 8, 129-135. https://www.ibaness.org/bnejss/2022_08_special_issue/16_Aydin.pdf
- Banwari, A., Joshi, R. C., Sengar, N., & Dutta, M. K. (2022). Computer vision technique for freshness estimation from segmented eye of fish image. *Ecological Informatics*, 69, 101602. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101602>
- Burgos-Artizzu, X. P., Ribeiro, A., Guijarro, M., & Pajares, G. (2011). Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2), 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.011>
- Campbell, M., Miller, P., Díaz-Chito, K., Irvine, S., Baxter, M., Del Rincón, J. M., Hong, X., McLaughlin, N., Arumugam, T., & O'Connell, N. (2025). Automated precision weighing: leveraging 2D video feature analysis and machine learning for live body weight estimation of broiler chickens. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100793. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100793>
- Çan, Z. (2021). *Otomasyon sistemlerinde görüntü işleme tekniklerini kullanan ürün tanıma uygulaması* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

- Çümen, G. (2020). *Görüntü işleme teknolojisi*. Medium. <https://medium.com/@gizemcumen85/g%C3%B6r%C3%BCnt%C3%BC-i%CC%87%C5%9Fleme-teknolojisi-image-processing-262bb58fbb27>
- da Silveira, F., & Amaral, F. G. (2023). Agriculture 4.0. Q. Zhang (Ed.), *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies* (pp. 1-5). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89123-7_207-3
- De Wet, L., Vranken, E., Chedad, A., Aerts, J. M., Ceunen, J., & Berckmans, D. (2003). Computer-assisted image analysis to quantify daily growth rates of broiler chickens. *British Poultry Science*, 44(4), 524-532. <https://doi.org/10.1080/00071660310001616192>
- Dilbilir, Y. (2017). *Görüntü işlemede kullanılan istatistik yöntemler ve bir uygulama* [Yüksek Lisans Tezi]. Yüzüncü Yıl Üniversitesi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=Zu9RorL2kdpHtG8_IV10TA&no=tmcsxYDVC1W3StGbIuJg_LQ
- Electra, J., Ajidarma, P., & Isnaini, M. M. (2022). Broiler chicken weight estimation model design using image processing approach. *3rd Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 13-15). <https://ieomsociety.org/proceedings/2022malaysia/329.pdf>
- Ercan, Ş., Öztep, R., Güler, D., & Saner, G. (2019). Tarım 4.0 ve Türkiye’de uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 25(2), 259-265. <https://doi.org/10.24181/tarekoder.650762>
- Gee, C. H., Bossu, J., Jones, G., & Truchetet, F. (2008). Crop/weed discrimination in perspective agronomic images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(1), 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.003>

- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson Education. <https://www.cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales,Wood-s-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf>
- Guerbaoui, M., Ichou, I., Bakziz, Z., Selmani, A., El Faiz, S., Ed-Dahhak, A., Benhala, B., & Lachhab, A. (2025). Detection and management of water stress at plants by deep learning and image processing case-study of tomato. *E3S Web of Conferences*, 601, 00007. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560100007>
- Ishak, W., & Rahman, K. A. (2010). Software development for real-time weed colour analysis. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 18(2), 243-253. <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/10615/1/33.pdf>
- Jorgensen, A., Dueholm, J. V., Fagertun, J., & Moeslund, T. B. (2019). Weight estimation of broilers in images using 3D prior knowledge. *Lecture Notes in Computer Science*, 11482, 221-232. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20205-7_19
- Kang, X., Liang, J., Li, Q., & Liu, G. (2025). Detecting lameness in dairy cows based on gait feature mapping and attention mechanisms. *Agriculture*, 15(12), 1276. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121276>
- Karadöl, H. (2017). *Mısır üretiminde görüntü işleme teknikleri kullanarak yabancı otların belirlenmesi ve değişken düzeyli uygulama* [Doktora Tezi]. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=0CbR9iHi4HtCf2XXzOW_MA&no=WT7c5_cyGjF9fzEcENXO9Q
- Karakoç, M. (2011). *Görüntü işleme teknikleri ve yapay zekâ yöntemleri kullanarak görüntü içinde görüntü arama* [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi.

- <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=YQfQZ4YK3-kvzGMPmqgww>
- Karakoç, M. (2012, 1-3 Şubat). Görüntü işleme, teknolojiler ve uygulamaları. *Uşak Üniversitesi XIV. Akademik Bilişim Konferansı*, Uşak, 1-3 Şubat.
https://ab.org.tr/ab12/sunum/21-goruntu_isleme-Karakoc.pdf
- Katircioğlu, F. (2007). *Renkli görüntülerin bağıntı matrisine dayalı ayrıştırılması ve kenar algılama* [Yüksek Lisans Tezi]. Düzce Üniversitesi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Kaymak, Ç. (2016). *Raspberry pi devre kartı kullanılarak nesne bulma ve tanıma algoritmalarının bir robot kol üzerine uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi]. Fırat Üniversitesi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=0DldDxtuxK2KcJm2Xyqy4A&no=Kp3ea8l0G0PjJlt1Nir4xg>
- Khuman, Y. L. K., Singh, O. I., Singh, T. R., & Devi, H. M. (2023). Image binarization with hybrid adaptive thresholds. *Applied Computing for Software and Smart Systems*, 555, 161-174.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-6791-7_10
- Koç, A. (2018). Tarım ve gıda ekonomisi üzerine değerlendirmeler. *Gıda Politikaları Dergisi*, 4(1), 12-19.
- Köse, Y. (2019). *Döküm sektöründe görüntü işleme tekniklerini kullanarak parça kontrolü* [Yüksek Lisans Tezi]. Maltepe Üniversitesi.
<https://openaccess.maltepe.edu.tr/server/api/core/bitstreams/e73de05c-c9eb-4928-aa5d-55ec109e149b/content>
- Kundu, R. (2022). *Image processing guide*. V7 Labs.
<https://www.v7labs.com/blog/image-processing-guide>
- Kuzu, H. (2025). *Etlik piliç yetiştiriciliğinde görüntü işleme ve derin öğrenme yöntemleri ile canlı ağırlığın tahmin edilmesi* [Doktora Tezi]. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.

<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

- Lee, H.-G., Ryu, S.-H., Son, J.-H., Kim, H.-K., & Kim, J.-M. (2025). Enhancing bee mite detection with YOLO: The role of data augmentation and stratified sampling. *Agriculture*, 15(11), 1221. <https://doi.org/10.3390/agriculture15111221>
- Li, G., Huang, Y., Chen, Z., Chesser, G. D., Purswell, J. L., Linhoss, J., & Zhao, Y. (2021). Practices and applications of convolutional neural network-based computer vision systems in animal farming: A review. *Sensors*, 21(4), 1492. <https://doi.org/10.3390/s21041492>
- Li, X., Li, G., Gao, S., & Li, S. (2023). An improved method for broiler weight estimation integrating multi-feature with gradient boosting decision tree. *Animals*, 13(23), 3721. <https://doi.org/10.3390/ani13233721>
- Marques, J. V. M., et al. (2025). Non-invasive and low-cost approach for estimating sheep weight using computer vision. *Engineering Reports*, 7, e70329. <https://doi.org/10.1002/eng2.70329>
- Mollah, M. B. R., Hasan, M. A., Salam, M. A., & Ali, M. A. (2010). Digital image analysis to estimate the live weight of broiler. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(1), 48-52. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.02.002>
- Mortensen, A. K., Lisouski, P., & Ahrendt, P. (2016). Weight prediction of broiler chickens using 3D computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 319-326. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.011>
- Nejati, H., Azimifar, Z., & Zamani, M. (2008). Using fast Fourier transform for weed detection in corn fields. *IEEE International Conference on Systems*, Singapur, 1215-1219. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811448>
- Örnek, M. N. (2014). *Havuç sınıflandırmada gerçek zamanlı görüntü işleme makinası tasarımı ve bazı mekanik*

sınıflandırma makinaları ile boylama etkinliklerinin karşılaştırılması [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=9KLecYd8WZpW25hA30YFOg&no=m4Tnr7YN0L9DT16nDrC4ig>

Paap, A. J. (2014). *Development of an optical sensor for real-time weed detection using laser based spectroscopy* [Doctoral dissertation]. Edith Cowan University.

<https://ro.ecu.edu.au/theses/1282/>

Sabancı, K. (2013). *Şeker pancarı tarımında yabancı ot mücadelesi için değişken düzeyli herbisit uygulama parametrelerinin yapay sinir ağlarıyla belirlenmesi* [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi.

<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=6StkRkTeFSsR4DWuGHDyYA>

Santos Filho, E. Q., et al. (2020). Evaluation of goat leather quality based on computational vision techniques. *Circuits Systems and Signal Process*, 2020(2), 651-673.

<https://doi.org/10.1007/s00034-019-01180-4>

Siddiqi, M. H., Lee, S., & Lee, Y. K. (2011). Efficient algorithm for real-time specific weed leaf classification system. *Journal of Communication and Computer*, 8, 819-830.

[https://www.researchgate.net/publication/236160097_Efficient_Algorithm_for_Real-](https://www.researchgate.net/publication/236160097_Efficient_Algorithm_for_Real-Time_Specific_Weed_Leaf_Classification_System)

[Time_Specific_Weed_Leaf_Classification_System](https://www.researchgate.net/publication/236160097_Efficient_Algorithm_for_Real-Time_Specific_Weed_Leaf_Classification_System)

Şenkaya, Y., & Kurnaz, Ç. (2022). Bölütleme kullanarak doğal görüntülerde metin tanıma. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 10(5), 42-51.

<https://doi.org/10.29130/dubited.1107625>

Tangwongkit, R., Salokhe, M. V., & Jayasuriya, H. P. V. (2006). Development of a real-time, variable rate herbicide applicator using machine vision for between-row weeding of sugarcane fields. *Agricultural Engineering International: the*

Tekinalp, Z., Öztürk, S., & Kuncan, M. (2013). OPC kullanılarak gerçek zamanlı haberleşen Matlab ve PLC kontrollü sistem. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK2013)*, Malatya, 465-470.

Tian, L., Reid, J. F., & Hummel, J. W. (2000). Development of a precision sprayer for sitespecific weed management. *Transaction of the ASAE*, 42(4), 893-900. <https://doi.org/10.13031/2013.13269>

Tiwari, V., Joshi, R. C., & Dutta, M. K. (2021). Dense convolutional neural networks based multiclass plant disease detection and classification using leaf images. *Ecological Informatics*, 63, 101289. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101289>

Turan, B. (2017). *Görüntü işleme algoritmalarının eş zamanlı süreçlere ayrılarak kablosuz ağ üzerinden gerçekleştirilmesi ve performans analizleri* [Yüksek Lisans Tezi]. Maltepe Üniversitesi.

https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=dx_aGoNtVnw9Xk70kpsegig&no=i8m7h2e1XaSzhGY6_Bawtg

TÜRKSAT. (2024). *Görüntü işleme nedir temel kavramlar ve uygulama alanları*. <https://bilisim.turksat.com.tr/tr/blog-yazilari/goruntu-isleme-nedir-temel-kavramlar-ve-uygulama-alanlari>

Uzun, Y., Bilban, M., & Arıkan, H. (2018). Tarım ve kırsal kalkınmada yapay zekâ kullanımı. *Uluslararası KOP Bölgesel Kalkınma Sempozyumu (KOPBKS)*, Konya, 1-6. https://www.researchgate.net/publication/328570324_USE_of_ARTIFICIAL_INTELLIGENCE_in_AGRICULTURE_and_RURAL_DEVELOPMENT

Yang, C. C., Prasher, S. O., & Landry, J. A. (2002). Weed recognition in corn fields using back-propagation neural network models.

- Canadian Society for Bioengineering*, 44(1), 15-22.
<https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/44/c0138.pdf>
- Yılmaz, M. (2016). *Görüntü işleme teknikleri ile zirai tuzaklardaki böcek adedi tespiti* [Yüksek Lisans Tezi]. Maltepe Üniversitesi.
<https://openaccess.maltepe.edu.tr/entities/publication/c0cadc68-2c0d-40ce-a45c-90e49a824653>
- Zhu, Y. P., & Li, P. (2019). Survey on the image segmentation algorithms. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2017*, Chengdu, 475-488. Springer.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-7560-5_43

