

TARIMSAL ÜRETİM SÜREÇLERİNE YÖNELİK

GÜNCEL ÇALIŞMALAR



Editör

HAYRETTİN KARADÖL



BİDGE Yayınları

Tarımsal Üretim Süreçlerine Yönelik Güncel Çalışmalar

Editör: HAYRETTİN KARADÖL

ISBN: 978-625-8567-48-9

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

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



ÖNSÖZ

Günümüzde tarım sektörü; sensör teknolojileri, otomasyon sistemleri, akıllı mekanizasyon uygulamaları ve veri temelli karar destek yaklaşımlarının giderek daha fazla önem kazandığı bir dönüşüm süreci içerisinde. Bu gelişmeler, üretim girdilerinin daha rasyonel kullanılmasına, üretim süreçlerinin izlenebilirliğinin artırılmasına ve ürün kayıplarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda tarımsal ürünlerin işlenmesi, kalite özelliklerinin korunması ve hayvansal üretimde verimliliğin artırılmasına yönelik geleneksel ve modern uygulamaların bilimsel olarak değerlendirilmesi, sektörel gelişimin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu eser, tarım ve tarımsal mühendislik alanında güncel araştırma konularını; üretim, mekanizasyon, işleme ve yetiştiricilik boyutlarıyla ele alarak, alandaki bilgi birikimine katkı sunmayı amaçlamaktadır. Kitapta yer alan çalışmalar, tarımsal sistemlerin daha verimli, çevreyle uyumlu ve ekonomik açıdan sürdürülebilir hale getirilmesine yönelik farklı yaklaşımları ortaya koymaktadır. Sunulan içeriklerin, kuramsal bilgi ile uygulama deneyimini bir araya getirerek, tarımın farklı disiplinlerinde yürütülen araştırmalara ışık tutması hedeflenmektedir.

Doç. Dr. HAYRETTİN KARADÖL

KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

TARIMSAL ÜRÜNLERDE KULLANILAN KABUK KIRMA SİSTEMLERİ: TASARIM İLKELERİ, SINIFLANDIRMA VE PERFORMANS KRİTERLERİ	1
<i>SELÇUK UĞURLUAY</i>	
BAHÇE PÜLVERİZATÖR SİSTEMLERİNDE SENSÖR TABANLI DEĞİŞKEN DÜZEYLİ UYGULAMA TEKNOLOJİLERİ	17
<i>HAYRETTİN KARADÖL, SERTAN SESVEREN</i>	
HAYVAN BARINAKLARINDA ZARARLI GAZLAR VE ÇEVRESEL ETKİLERİ	36
<i>ALİ ÇAYLI</i>	
BASINÇLI SULAMA SİSTEMLERİNDE HİDROLİK TASARIM HATALARI VE SULAMA ÜNİFORMİTESİNİN ÜRÜN VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ	63
<i>EZGİ KURTULMUŞ, Umut MUCAN</i>	
KANATLI YETİŞTİRİCİLİĞİNDE GELENEKSEL YÖNTEMLERLE CİNSİYET BELİRLENMESİNE YÖNELİK GENEL BAKIŞ	76
<i>ÇAĞRI ÖZGÜR ÖZKAN</i>	
EFFECTS OF BIODIVERSITY IN MAIZE BREEDING	92
<i>AHMET OKUMUŞ, AHMET OKUMUŞ</i>	

BÖLÜM 1

TARIMSAL ÜRÜNLERDE KULLANILAN KABUK KIRMA SİSTEMLERİ: TASARIM İLKELERİ, SINIFLANDIRMA VE PERFORMANS KRİTERLERİ

SELÇUK UĞURLUAY¹

1.Giriş

Birçok tarımsal ürün, bitkinin fizyolojik gelişimi sırasında oluşan ve tohum veya yenilebilir kısmı dış etkilerden koruyan bir kabuk, kavuz veya sert dış tabaka ile çevrilidir. Tahıllarda (örneğin pirinç, arpa, yulaf), baklagillerde (örneğin nohut, mercimek), yağlı tohumlarda (örneğin ayçiçeği, pamuk tohumu) ve sert kabuklu meyvelerde (örneğin fındık, ceviz, badem, Antep fıstığı) bu yapılar, hasat ve depolama açısından avantaj sağlamakla birlikte, öğütme, ekstraksiyon, kavurma veya sofralık tüketime geçişte uzaklaştırılması gereken fraksiyonlardır (Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006).

Kabuk kırma; kabuğun çekirdekten tamamen veya büyük ölçüde ayrılması, ancak çekirdeğin mümkün olduğunca bütün kalması hedefiyle gerçekleştirilen mekanik bir ayırma işlemidir. Bu

¹ Doç Dr., Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Müh. Böl., Orcid: 0000-0003-4880-545X

amaçla geliştirilen kabuk kırma sistemleri, ürünün fiziksel özelliklerine göre özel olarak tasarlanmakta ve çoğu zaman temizleme, sınıflandırma, ayıklama, öğütme veya yağ ekstraksiyonu gibi diğer proseslerle entegre bir hatın parçası olarak çalışmaktadır (Dursun, 2023; Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006).

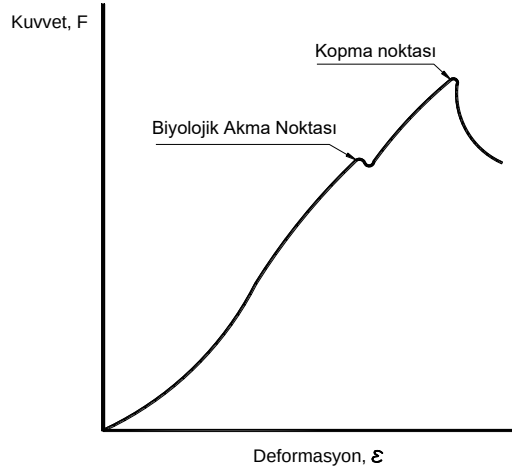
Bu bölümde kabuk kırma işleminin fiziksel ve mekanik temelleri özetlenmekte, tarımsal ürünlerde kullanılan kabuk kırma sistemleri; darbeli, basma/ezme, abrasif (sürtünmeli), kesme/yarma ve kombine tipler olarak sınıflandırılmakta, bu sistemlerin çalışma ilkeleri, tasarım kriterleri ve performans göstergeleri ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Ayrıca kabuk kırma verimi, tane kırılma oranı ve özgül enerji tüketimi gibi temel performans göstergeleri değerlendirilmekte ve mekanizasyon düzeyi ile ürün kalitesi arasındaki ilişki irdelenmektedir. Çalışma, ağırlıklı olarak klasik tarımsal proses mühendisliği literatürünü temel alan derleyici nitelikte bir incelemedir.

2.Kabuk Kırma İşleminin Fiziksel ve Mekanik Temelleri

2.1.Biyolojik Materyallerin Yapısal ve Mekanik Özellikleri

Tarımsal ürünler; heterojen, anizotrop, viskoelastik ve çoğu zaman gözenekli yapıları nedeniyle klasik mühendislik malzemelerinden farklı mekanik davranış sergiler (Mohsenin, 1986; Uğurluay ve ark., 20210). Kabuk, çoğunlukla lignin, selüloz ve hemiselüloz içeriği yüksek, görece sert ve kırılğan bir yapı gösterirken; çekirdek kısmı daha yumuşak, elastik ve nem içeriği daha yüksek bir fazdır. Kabuk kırma tasarımında; kabuğun mümkün olduğunca kırılğan davranması, çekirdeğin ise elastik deformasyona tolerans göstermesi istenir.

Şekil 1. Biyolojik ürünlere ait örnek bir kuvvet – deformasyon eğrisinin görünümü



Tarımsal materyaller için kırılma yükü, elastik modül, sertlik ve darbe tokluğu gibi mekanik parametrelerin; nem içeriği, sıcaklık, yükleme hızı ve yükleme yönüne güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir. Nem içeriği arttıkça pek çok ürünün akma ve kırılma gerilmesi azalmakta, materyal daha sünek ve daha az kırılğan hale gelmekte; bu da kabuk ile çekirdeğin birlikte ezilmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle, kabuk kırma ünitelerine beslenmeden önce ürünün nem içeriği genellikle belirli bir aralığa getirilmelidir (Henderson & Perry, 1976; Mohsenin, 1986).

2.2.Kırma Mekanizmaları

Kabuk kırma sistemlerinde başlıca gerilme türleri; basma (compressive), çekme (tensile), kesme (shear) ve darbe (impact) gerilmeleridir (Ugurluay ve ark., 2013). Biyolojik materyaller genellikle basma gerilmesine çekme gerilmesine göre daha

dayanıklıdır; bu nedenle çatlak başlatma ve ilerlemede çoğunlukla çekme ve eğilme bileşenleri daha etkilidir (Mohsenin, 1986).

Darbeli sistemlerde yüksek hızda çarpma ile kısa sürede büyük şekil değiştirme oluşturularak kabukta gevrek kırılma sağlanır. Basma/ezme tipi sistemlerde ise merdaneler veya konik yüzeyler arasında nispeten düşük hızda ancak kontrollü basınç altında kırılma gerçekleşir. Abrasif sistemlerde sürtünme ve aşındırma ile kabuk veya kavuz kademeli olarak uzaklaştırılır (Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006).

3.Kabuk Kırma Sistemlerinin Sınıflandırılması

Klasik tarımsal proses mühendisliği literatüründe kabuk kırma sistemleri; uyguladıkları baskın gerilme türüne ve geometrik düzenlemeye göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır (Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006). Aşağıda tarımsal ürünler için yaygın gruplar sıralanmaktadır.

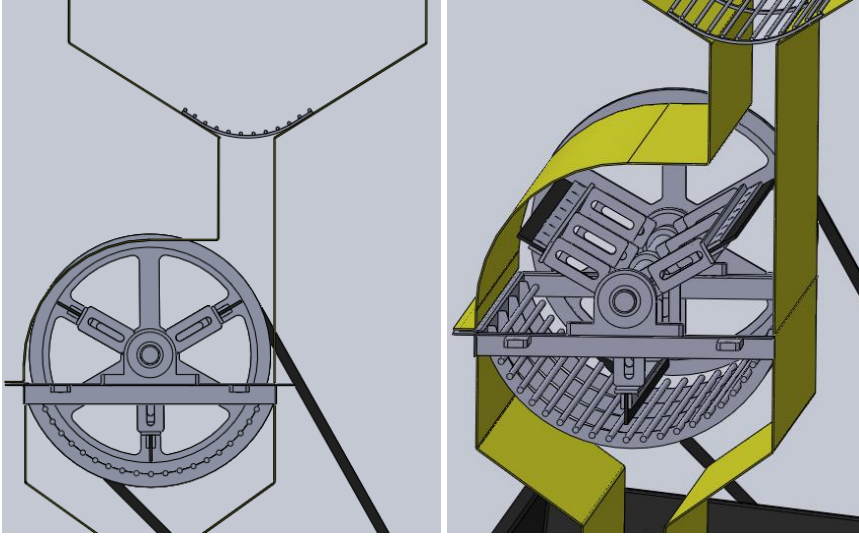
3.1.Darbeli Kabuk Kırıcılar

Darbeli sistemler, yüksek hızlı dönen rotorlar, çekiçler veya paletler kullanarak ürüne çarpma etkisi uygular. Çekiçli kırıcılar (hammer mills) ve darbeli kırıcılar (impact dehullers), özellikle kavuzlu tahıllar ve bazı yağlı tohumlar için yaygın olarak rapor edilmiştir (Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006).

Bu sistemlerde ürün, dönen rotor ile sabit bir gövde (stator) arasında, ya da rotor üzerindeki çekiçlerle gövde iç yüzeyi arasında tekrarlayan çarpmalara maruz kalır. Rotor çevresel hızının artırılması, kabuk kırma etkinliğini yükseltmekte; ancak çekirdek kırılma oranını ve ince parçacık (toz) oluşumunu da artırmaktadır (Srivastava ve ark., 2006). Bu nedenle optimum çalışma hızı, ürünün

mekanik özellikleri ve istenen nihai tane bütünlüğü dikkate alınarak belirlenir.

Resim 1 Pervazlı Dövecü ve Karşıdövecülü yer fıstığı kabuk kırma makinesi



Kaynak: (TPE, 2025)

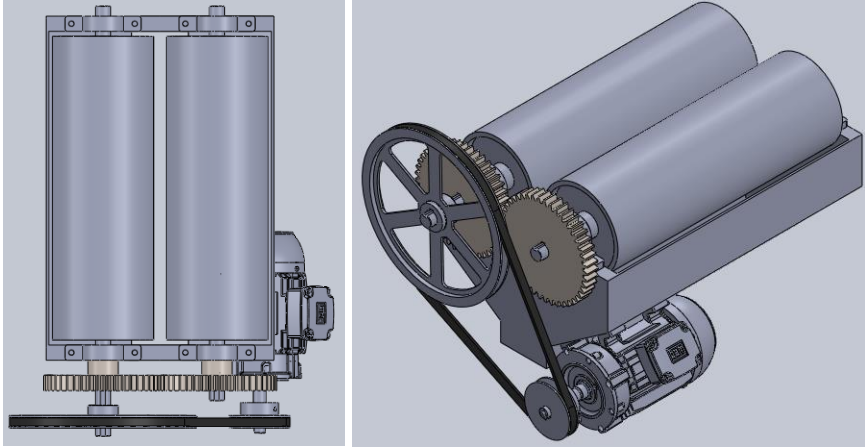
Darbeli sistemlerin başlıca avantajları yüksek kapasite, basit mekanik yapı ve farklı ürünlere uyarlanabilirlik iken; dezavantajları, tane kırılma oranının ve özgül enerji tüketiminin görece yüksek olabilmesidir (Henderson & Perry, 1976).

3.2.Basma/Ezme (Merdaneli ve Konik) Kabuk Kırıcılar

Basma veya ezme temelli sistemlerde ürün, iki merdane (rulo) veya bir döner konik gövde ile sabit bir yüzey arasında sıkıştırılarak kabuğun çatlatılması sağlanır. İki merdaneli (roll-type) soyucular; pirinç, yulaf ve bazı baklagillerin kabuklarının

uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılır (Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006).

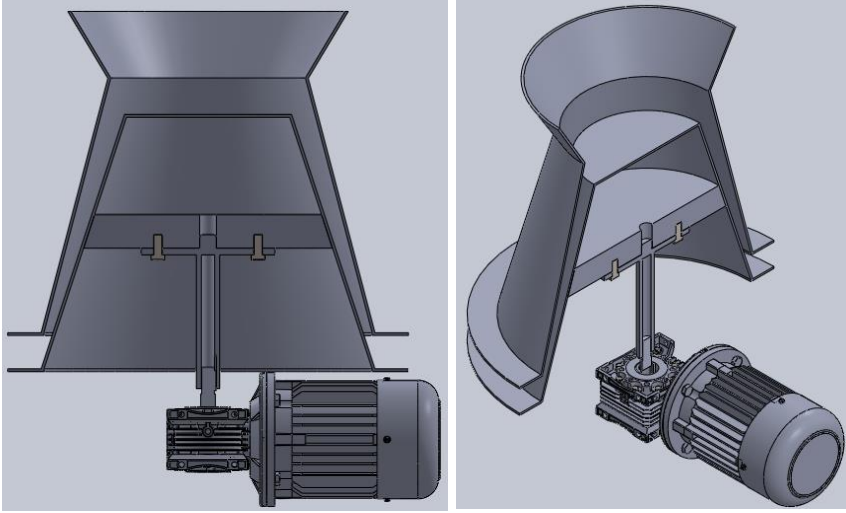
Resim 2 Merdaneli kabuk kırıcılara örnek bir görünüm



Merdane tipi kabuk kırma makinelerinde temel tasarım parametreleri; merdane çapı ve uzunluğu, merdaneler arası açıklık, merdane yüzeyinin malzemesi ve pürüzlülüğü (kauçuk, çelik, oluklu yüzey vb.), merdanelerin dönüş hızları ve hız farkıdır. Merdaneler arası açıklık, kabuğu kıracak ancak çekirdeği ezmeyecek şekilde, ürünün ortalama tane boyutuna ve kabuk kalınlığına göre ayarlanır (Srivastava ve ark., 2006).

Konik kabuk kırıcılar ise, özellikle kahve ve bazı yağlı tohumlarda, dönen konik bir rotor ile sabit konik bir gövde arasında oluşturulan değişken kesitli boşlukta kabuğun sıkıştırılması ilkesiyle çalışır. Konik geometri, ürünün kademeli olarak artan basınca maruz kalmasını sağlayarak daha kontrollü bir kırma süreci sunar (Henderson & Perry, 1976).

Resim 3 Konik kabuk kırma sistemine ait örnek bir görünüm



3.3.Abrasif (Sürtünmeli) Kabuk ve Kavuz Soyucular

Abrasif sistemler, genellikle zımpara taşı veya silisyum karbür kaplı döner disk veya silindirler ile sabit bir elek yüzeyi arasında, ürün yüzeyinden malzeme kaldırılması (aşındırma) prensibiyle çalışır. Pirinç değirmenciliğinde kavuzun uzaklaştırılması ve parlatma aşamalarında abrasif silindirli makineler standart bir ünite operasyonu haline gelmiştir (Henderson & Perry, 1976).

Resim 4 Abrasif (sürtünmeli) kabuk soyucunun ceviz meyvesinde kullanımına ait görünüm



Bu sistemlerde ürün; dönen abrasif yüzey ile perforasyonlu (düzenli ve özelleştirilmiş deliklerden oluşan) bir gövde arasında sürtünmeye maruz bırakılır. Kabuk veya kavuz, çekirdeğe göre daha gevrek ve yüzeye daha yakın olduğu için daha önce ayrılır. Tambur içindeki kalış süresi, tambur hızı ve ürün yüklemesi; soyma derecesini ve kırık tane oranını belirleyen başlıca değişkenlerdir (Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006).

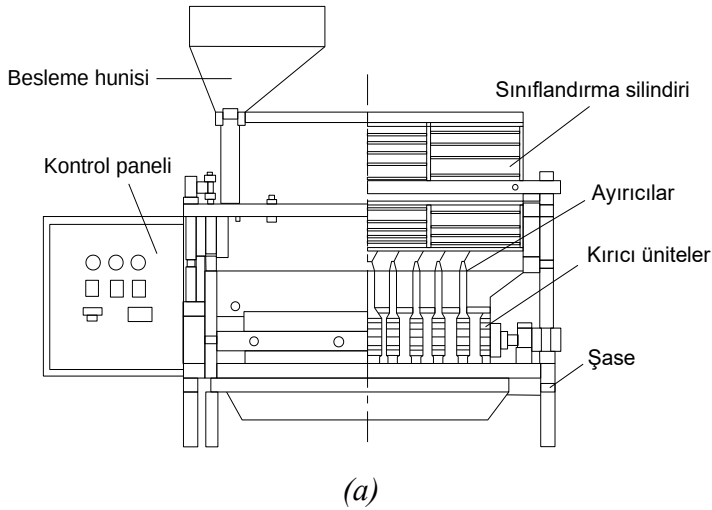
3.4.Kesme ve Yarma Sistemleri

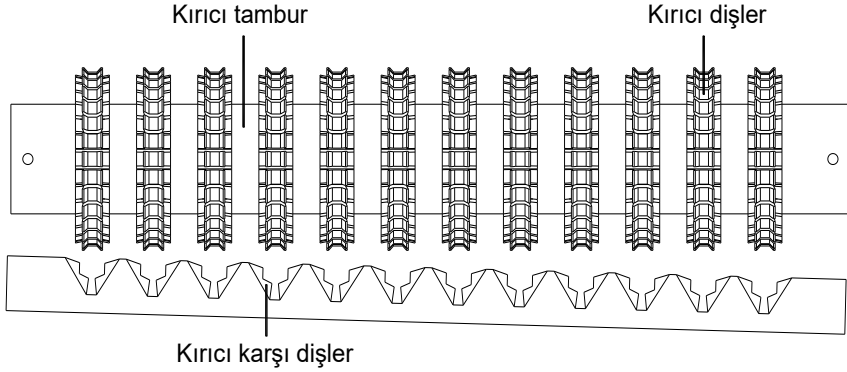
Kesme/Yarma mekanizmasına dayalı kabuk kırma sistemleri, özellikle çekirdek bütünlüğünün yüksek katma değerle ilişkilendiği sert kabuklu meyveler (örneğin ceviz, badem) için geliştirilmiştir. Bu sistemlerde ürün, tek tek veya belirli bir şekilde yönlendirilerek (örneğin dikiş hattı (şak düzlemi) yukarı bakacak şekilde) bıçak veya disk tipi kesicilerden geçirilir. Amaç; kabuğu bir veya daha fazla

belirlenmiş hat boyunca yarararak açmak, çekirdeği ise mümkün olduğunca zedelemeyen serbest bırakmaktır (Srivastava ve ark., 2006).

Bu tür makinelerin tasarımı, ürünün geometrik özelliklerine (uzunluk, genişlik, kalınlık, şak düzleminin konumu) son derece duyarlıdır. Bu nedenle çoğu zaman besleme öncesinde boylama ve yönlendirme sistemleriyle entegre çalışması gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde Zhang ve ark. (2022) tarafından yapılan ve ceviz kabuklarının kırılmasında kullanılan prototip bir makine görülmektedir. Makine, cevizleri kırma öncesinde bir sınıflandırma silindiri kullanarak iriliklerine göre ayırmaktadır.

Resim 5 Ceviz meyvesinde kullanılan kesme / yarma esaslı çalışan örnek sistem. (a) Sınıflandırma sistemiyle birlikte komple makinenin görünümü, (b) Kırıcı ünitenin genel yapısına ait görünüm.





(b)

3.5.Kombine ve Çok Kademeli Kabuk Kırma Sistemleri

Endüstriyel ölçekte, tek bir kabuk kırma aşaması genellikle istenen kabuksuzluk oranını ve tane bütünlüğünü aynı anda sağlayamaz. Bu nedenle, çok kademeli sistemlerde ilk aşamada hafif bir kabuk kırma uygulanarak kabuğun önemli bir kısmı uzaklaştırılır; ardından ayıklama ve sınıflandırma ile tam kırılmamış veya kabuklu kalan ürün fraksiyonu ikinci bir kabuk kırma aşamasına sevk edilir (Henderson & Perry, 1976).

Bu kombinasyon; hem çekirdek kırılma oranını sınırlamaya, hem de enerji tüketimini ve işleme süresini optimize etmeye olanak tanır. Özellikle sert kabuklu meyve endüstrisinde, ön kırma + sınıflama + ince kırma şeklinde yapılandırılmış hatlar yaygın uygulama alanı bulmuştur (Srivastava ve ark., 2006).

4.Tasarım Kriterleri ve Performans Göstergeleri

4.1.Temel Tasarım Parametreleri

Kabuk kırma makinelerinin tasarımında dikkate alınması gereken başlıca parametreler şu şekilde özetlenebilir (Henderson & Perry, 1976; Mohsenin, 1986; Srivastava ve ark., 2006):

- Ürünün fiziksel özellikleri: Tane boyutu ve dağılımı, şekil faktörleri, kabuk kalınlığı, kabuk/çekirdek oranı, yüzey pürüzlülüğü.
- Mekanik özellikler: Kabuk ve çekirdek için kırılma yükü, elastiklik modülü, sertlik ve darbe tokluğu değerleri.
- Nem içeriği: Kabuk ve çekirdeğin bağıl nemi; optimum kabuk kırma nem aralığı.
- Makine geometrisi: Rotor veya merdane çapı, uzunluğu, merdaneler arası açıklık, abrasif yüzey özellikleri, bıçak konfigürasyonu.
- Çalışma koşulları: Rotor/merdane hızı, ürün besleme hızı, makine içi kalış süresi, ürün doluluk oranı.
- Ayarlanabilirlik: Farklı çeşit ve boy gruplarına uyum sağlayabilecek ayar mekanizmaları (örneğin açıklık ayarı, hız ayarı vb.).

Bu parametrelerin uygun kombinasyonu, kabuk kırma verimini maksimize ederken çekirdek kırılmasını, enerji tüketimini ve kalite kayıplarını minimize etmeyi amaçlar.

4.2.Performans Göstergeleri

Kabuk kırma sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılan başlıca performans göstergeleri literatürde şu şekilde tanımlanmaktadır (Henderson & Perry, 1976; Srivastava ve ark., 2006):

Kabuk kırma verimi (veya soyma derecesi): Kabuk kırma verimini basit bir şekilde hesaplayabilmek için aşağıda verilmiş olan eşitlik kullanılabilir.

$$\text{Kabuk kırma verimi} = \frac{\text{Kabuksuz çekirdek kütlesi}}{\text{Toplam çekirdek kütlesi}} \times 100 \quad (1)$$

Bazı uygulamalarda, kabuğu tamamen uzaklaştırılmış tanelerin oranı esas alınır.

Kırık tane oranı: Kırık tane oranını hesaplayabilmek için aşağıda görülen olan eşitlik kullanılabilir.

$$\text{Kırık tane oranı} = \frac{\text{Kırık veya ciddi hasarlı çekirdek kütlesi}}{\text{Toplam çekirdek kütlesi}} \times 100 \quad (2)$$

Net sağlam çekirdek verimi: Kabuk kırma verimi ile kırık tane oranının birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen, pazarlanabilir sağlam çekirdek miktarını yansıtan bileşik bir göstergedir.

Özgül enerji tüketimi: Enerji verimliliği, büyük ölçekli endüstriyel tesislerde önemli bir tasarım ve işletme kriteridir.

$$\text{Kırık tane oranı} = \frac{\text{Kırık veya ciddi hasarlı çekirdek kütlesi}}{\text{Toplam çekirdek kütlesi}} \times 100 \quad (3)$$

Kapasite (ton/h): Belirli bir dakikadaki veya saatteki ürün işleme miktarı, pratik açıdan çoğu zaman yatırım kararlarında belirleyici olmaktadır. Bu performans göstergeleri arasındaki ilişki, tipik olarak bir denge (trade-off) içerir: Örneğin rotor hızının artırılması kabuk kırma verimini yükseltirken, kırık tane oranını ve özgül enerji tüketimini de artırabilmektedir (Srivastava ve ark., 2006). Bu nedenle, optimum çalışma koşullarının belirlenmesi çoğunlukla deneysel optimizasyon gerektirmektedir.

5. Teknolojik Gelişmeler ve Eğilimler

Klasik literatür, kabuk kırma işlemini çoğunlukla mekanik tasarım ve işlem parametreleri açısından ele almakla birlikte,

günümüzde sanayide; otomasyon, proses kontrolü ve çevrimiçi kalite izleme gibi alanlarda önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Paket halindeki kabuk kırma hatlarında; besleme hızı, rotor/merdane hızları ve ürün akışı, sensörler ve programlanabilir lojik kontrolörler (PLC) aracılığıyla dinamik olarak ayarlanarak sabit kabuk kırma verimi ve ürün kalitesi hedeflenmektedir.

Özellikle sert kabuklu meyve ve yüksek katma değerli yağlı tohumlarda, kabuk kırma sonrası optik ayıklama ve sınıflandırma sistemlerinin entegrasyonu, kırık tane oranını kontrol altında tutarken hat üzerinden geçen ürünün homojenliğini artırmaktadır. Bu alandaki güncel literatür, klasik tarım makinaları kaynaklarının ötesinde, görüntü işleme, makine öğrenmesi ve proses kontrolü odaklı mühendislik çalışmalarına dayanmaktadır; bu nedenle ayrıntılı bir bibliyografik tarama gerektirmektedir.

6.Sonuç ve Değerlendirme

Kabuk kırma, çok çeşitli tarımsal ürünler için zorunlu bir birim işlem olup, ürün kalitesi, verimlilik ve enerji tüketimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Darbeli, basma/ezme, abrasif ve kesme/yarma temelli sistemlerin her biri; ürün türü, hedeflenen kalite seviyesi ve kapasite gereksinimleri doğrultusunda avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

Klasik tarımsal proses ve makine mühendisliği literatürü, kabuk kırma sistemlerinin tasarımında; ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerinin dikkatle belirlenmesini, nem içeriğinin optimize edilmesini ve makine parametrelerinin (işleme aralıkları, hız, kalış süresi vb.) bu özelliklere göre ayarlanmasını önermektedir (Henderson & Perry, 1976; Mohsenin, 1986; Srivastava ve ark., 2006). Endüstriyel ölçekte ise, çok kademeli ve kombine sistemler kullanılarak kabuk kırma verimi ile sağlam çekirdek oranı arasındaki denge optimize edilmektedir.

Gelecekte, kabuk kırma sistemlerinin; daha düşük özgül enerji tüketimi, daha yüksek otomasyon düzeyi, ürün bazlı esneklik ve süreç izlenebilirliği sağlayacak şekilde geliştirilmesi beklenmektedir. Bu bağlamda, klasik mekanik tasarım ilkelerinin, modern sensör teknolojileri ve veri analitiğiyle birlikte ele alınması, tarımsal ürün işleme endüstrisinde rekabet gücünü artıracaktır.

Kaynakça

Dursun, İ. (2023). *Kabuk Kırma Makinaları*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü.

Henderson, S. M. and Perry, R. L. (1976). *Agricultural process engineering* (3rd ed.). Westport, CT: AVI Publishing Company.

Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics, and mechanical properties* (2nd ed.). New York, NY: Gordon and Breach Science Publishers.

Srivastava, A.K., Goering, C.E., Rohrbach, R.P., Buckmaster, D. R. (2006). *Engineering principles of agricultural machines* (2nd ed.). St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.

TPE (2025). Türk Patent Enstitüsü. Yerfıstığı Tohumluk Hazırlama Makinesi, Başvuru Numarası 2025/001444 (Faydalı Model).

Uğurluay, S., İnce, A., Sessiz, A., Kayışoğlu, B., Güzel, E., Özcan, M.T. (2010). *Hasat Harman Makinaları ve İlkeleri*. Nobel Kitabevi, Sayfa Sayısı 316, ISBN:978-605-397-111-5, Türkçe(Ders Kitabı)

Uğurluay, S., Akcalı, İ.D., Güzel, E., İnce, A. (2013). Impact Resistance of Peanut. *International Journal of Food Properties*, 16(3), 684-697., Doi: 10.1080/10942912.2011.565899.

Zhang, H., Liu, H., Zeng, Y., Tang, Y., Zhang, Z., Che, J. (2022). Design and Performance Evaluation of a Multi-Point ExtrusionWalnut Cracking Device. *Agriculture* 2022, 12, 1494. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091494>

BÖLÜM 2

BAHÇE PÜLVERİZATÖR SİSTEMLERİNDE SENSÖR TABANLI DEĞİŞKEN DÜZEYLİ UYGULAMA TEKNOLOJİLERİ

HAYRETTİN KARADÖL¹
SERTAN SESVEREN²

1.Giriş

Bahçe bitkilerinde hastalık ve zararlılarla mücadele amacıyla gerçekleştirilen kimyasal uygulamalar, modern meyvecilikte verimin ve kalite standartlarının sürdürülebilmesi için kritik öneme sahiptir. Ancak hem ekonomik hem de çevresel kaygıların artması, pestisit uygulamalarının yalnızca etkili değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir şekilde yapılmasını gerektirmektedir (Chen & ark., 2021). Sağlıklı meyve üretimi için artan çevresel hassasiyetler, ilaçlama yöntemlerinin daha hassas, hedefe yönelik ve bitki yapısına uyumlu hale getirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle ilaç normunun bitki taç yapısına göre ayarlanması, hem kimyasal

¹ Doç Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Müh. Böl, Orcid: 0000-0002-5062-0887

² Doç Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Müh. Böl, Orcid: 0000-0002-5163-7066

tasarrufu hem de çevreye olan yayılma riskinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır (Maghsoudi & Minaei, 2013).

Kalibrasyonu yapılmamış pülverizatörlerle gerçekleştirilen uygulamalarda toplam pestisit sarfiyatı gereksiz şekilde artmakta ve ilaç hedef dışına taşarak çevreye yayılmaktadır. Değişken Oranlı Uygulama (DDU) sistemlerinin en büyük avantajlarından biri, pestisit yalnızca hedef bitki örtüsüne, doğru miktarda ve doğru zamanda uygulanmasını sağlamasıdır. Bu yaklaşım, mevsim, gelişim dönemi ve taç hacmine bağlı olarak ilacın otomatik ayarlanması sayesinde pestisit kaybını ve çevreye olan olumsuz etkileri önemli ölçüde düşürür (Balsari & ark., 2017; Wang & ark., 2019; Karadöl & ark., 2024).

Pestisitlerin yanlış veya aşırı uygulanması yalnızca ekonomik kayba yol açmakla kalmamakta aynı zamanda ürün üzerinde kalıntı birikimi, toprak ve su kirliliği ile birlikte insan sağlığında akut ve kronik toksisite risklerini artırmaktadır (Maghsoudi & Minaei, 2013). Kapalı ortamlarda, özellikle seralarda yapılan pestisit uygulamaları operatör sağlığı için anında tehlike oluştururken, bahçe pülverizatörlerinde sürüklenme (drift) kaynaklı dolaylı maruziyet de ciddi bir halk sağlığı problemidir (Balsari & ark., 2018). Bu nedenle, operatörle kimyasal arasındaki doğrudan teması azaltacak otomatik ve robotik pülverizasyon sistemlerinin geliştirilmesine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır (Mohammadzamani & ark., 2009).

Kimyasal uygulamalarda ideal senaryo, pestisit ağacın taç yapısına homojen bir şekilde dağıtılması ve kullanım miktarının bitkinin o anki gelişim dönemine uygun olarak belirlenmesidir. Her büyüme dönemi için optimum uygulama oranının bulunduğu ve bunun bitkinin taç yapısı ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir (Aguilar & ark., 2008; Furness & ark., 1998). Taç yapısının karakterizasyonunda kullanılan temel parametrelerden biri olan Yaprak Alan İndeksi (Leaf Area Index, LAI) toplam yaprak alanını

birim toprak alanına oranlayan önemli bir göstergedir ve değişken oranlı ilaçlamalarda hedef dozun belirlenmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Siegfried & ark., 2007; Zhu & ark., 2004). Bu nedenle, ağaç yapısının doğru ve sürekli belirlenmesi, değişken oranlı ilaçlamanın başarısı için kritik bir öneme sahiptir.

Sensörlerin bitki taç yapısı, mesafe ve konumu gerçek zamanlı olarak izleyebilme kapasitesi, modern DDU sistemlerinin temel yapı taşını oluşturmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde girdi maliyeti yüksek olan pestisitlerin daha verimli kullanılması, hem ekonomik açıdan hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır (Mohammadzamani & ark., 2009; Karadöl & Aybek, 2017). Böylece değişken düzeyli uygulama, günümüz sürdürülebilir bahçe tarımı içinde yalnızca ekonomik bir tercih değil, aynı zamanda ekolojik bir zorunluluk olarak öne çıkmaktadır.

2. Bahçe Pülverizatörlerinde Sensör Tabanlı DDU Teknolojileri

Geleneksel yardımcı hava akımlı pülverizatörlerde sürekli ve uniform püskürtme, yüksek pestisit sarfiyatına ve hem hava hem toprak yönünde ciddi miktarda sürüklenmeye neden olmaktadır (Giles & ark., 2011; Salyani & Rosell, 2013; Bhalekar & ark., 2023). Çünkü ağaç yüksekliği, taç yapısı ve YAI gibi parametreler bahçe içerisinde büyük oranda değişiklik göstermektedir. Sensör tabanlı DDU sistemlerinde ise, bitki örtüsünün varlığı, yoğunluğu, hacmi veya geometrisi hakkında gerçek zamanlı veri elde edilmesine dayanır. Bu sistemlerin temel amacı, bitkinin bulunduğu alanlara hedefe yönelik ve değişken düzeyli ilaçlama yaparak pestisit sarfiyatını azaltmak, çevresel kayıpları en aza indirmek ve ilaçlama etkinliğini artırmaktır.

2.1. Ultrasonik sensörler

Bu sensörler, yüksek frekanslı ses dalgalarının bitki yüzeyine çarpıp geri dönmesi prensibiyle çalışan; geri dönüş sürelerini analiz ederek bitki tacının konumu, yoğunluğu ve geometrisi hakkında iki boyutlu bilgi sağlayan algılayıcılardır. Yüksek nem, toz, sis ve sıcaklık değişimleri gibi zorlayıcı çevresel koşullara karşı dayanıklı olmaları nedeniyle bu sensörler, tarımsal ilaçlama uygulamalarında tercih edilmektedir (Giles & ark., 1988; Tumbo & ark., 2002; Zaman ve Salyani, 2004; Zhao & ark., 2024). Düşük maliyetleri, ışık koşullarından bağımsız çalışabilmeleri ve farklı taç yapılarında kolay entegrasyon imkanı sunmaları nedeniyle bahçe pülverizatörlerinde en yaygın kullanılan sensör türleri arasında yer alırlar. Yaklaşık 20-30 cm çözünürlükte tacın yoğunluğundaki değişimleri algılayabilmeleri, pülverizatör memelerinin katmanlı ve bölgesel olarak kontrol edilmesine olanak tanımakta, böylece hem hedefleme doğruluğu hem de kaynak verimliliği artırılmaktadır.

Dou & ark. (2021), yaptıkları çalışmada biri fotoelektrik sensörlere, diğeri ultrasonik sensörlere dayalı iki farklı hedefe yönelik püskürtme sistemi geliştirmiştir (Resim 1). Genç kiraz ağaçları ve yetişkin elma ağaçlarında yürüttükleri denemelerde, bu sistemlerin hedef dışı uygulama sonucu toprağa düşerek biriken pestisit miktarını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Geleneksel, hedef algılama sistemi bulunmayan ticari pülverizatörle karşılaştırıldığında, fotoelektrik sensör tabanlı (gövde temelli hedef tespiti) sistemde toprağa biriken pestisit miktarı genç ağaçlarda %50,63 oranında azalırken, ultrasonik sensör tabanlı (taç temelli hedef tespiti) sistemde bu azalma %38,74 olarak gerçekleşmiştir. Yetişkin ağaçlarda ise azalma oranları sırasıyla %21,66 ve %29,87'dir. Bu sonuçlar, gövde temelli fotoelektrik algılama yönteminin genç ağaçlarda, taç temelli ultrasonik algılama yönteminin ise yetişkin ağaçlarda daha uygun olduğunu göstermektedir. Genel olarak çalışma, her iki hedefe yönelik

püskürtme sisteminin de pestisit kaybını ve toprakta gereksiz kimyasal birikimini belirgin biçimde azalttığını ortaya koymaktadır.

Resim 1. Bahçe tipi ultrasonik sensör tabanlı pülverizatör: fotoelektrik sensör (1), fotoelektrik tabanlı hedefe yönelik kontrol birimi (2), traktör (3), ultrasonik sensör (4), ultrasonik tabanlı hedefe yönelik kontrol birimi (5), depo (6) ve püskürtme ünitesi (7)



Kaynak: Dou & ark., 2021.

Zaman & Schumann (2005), ultrasonik sensörlerle donatılmış pülverizatörlerin ilaçlama uygulamalarında nesne varlık-yokluk tespiti ve taç hacmindeki hızlı değişimlerin algılanmasında yüksek doğrulukla çalıştığını ve püskürtme sisteminin gerçek zamanlı açılıp kapanmasını etkin biçimde yönettiğini bildirmektedir.

Maghsoudi & ark. (2015), geliştirdikleri gerçek zamanlı debi kontrol sisteminde pestisit kullanımının %34,5 oranında azaldığını; Gil & ark. (2013) çalışmasında, değişken oranlı ilaçlama sisteminde

kimyasal tüketiminin yaklaşık %58 oranında azaldığını bildirmiştir. Bu sonuç, sabit uygulama oranına kıyasla önemli bir tasarruf sağlamış; ayrıca her iki uygulamada da yaprak yüzeyinde benzer düzeyde bir pestisit birikimi elde edilmiştir. Araştırmada ayrıca, tasarruf oranlarının bitkinin alt, orta ve üst bölümlerinde farklılık gösterdiği ve bunun da bitki boyuna bağlı yaprak alanı dağılımıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Buna rağmen, uygulama homojenliği ve bitkinin iç kısımlarına ulaşma kabiliyeti açısından sabit ve değişken oranlı uygulamalar arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Escolà & ark. (2013), sensörlerin taç yoğunluğundaki değişimleri ayırt etmede yeterli doğruluk sunduğunu ancak ultrasonik sensörlerin karmaşık ve heterojen bitki yapılarında ideal performansı her zaman sürdüremeyebileceğini ifade etmektedir. Özellikle düzensiz taç geometrisine sahip ağaçlarda veya büyüme sezonunda yapraklanmanın hızla değiştiği dönemlerde sensörlerin verdiği mesafe ölçümleri daha yüksek hata payına sahip olabilmekte; bu nedenle sistemlerin kalibrasyonunun dikkatle yapılması ve gerektiğinde sensör verisinin diğer algılama teknolojileriyle desteklenmesi önerilmektedir.

Diğer taraftan, ultrasonik sensörlerin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Çok yoğun veya karmaşık taç yapılarında çoklu eko oluşumu ölçümlerde belirsizliğe neden olabilmekte, rüzgâr koşulları ses dalgalarının sapmasına yol açarak küçük hatalar oluşturabilmektedir. Ayrıca yalnızca iki boyutlu profil sunmaları nedeniyle hacimsel modelleme açısından LIDAR kadar ayrıntılı bilgi sağlayamazlar. Ancak buna karşın maliyet-performans dengesi, dayanıklılıkları ve drift azaltmadaki yüksek verimlilikleri sayesinde ultrasonik sensörler günümüzde bahçe pülverizatörleri için en uygulanabilir teknolojilerden biri olmayı sürdürmektedir.

2.2. LIDAR

LIDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi, bahçe pülverizatörlerinde bitki tacının üç boyutlu-nokta bulutu tabanlı-

karakterizasyonunu sağlayan en gl sensor mlerinden biridir. LIDAR temel olarak yüksek frekansta lazer darbeleri gönderir. Daha sonra bu darbelerin hedef yüzeylerden geri dönme süresini ölçerek her bir darbe için mesafe bilgisini elde eder. Binlerce ila yüz binlerce nokta/saniye üretilbildiği için ortaya çıkan nokta bulutu, ağacın ta hacmi, yaprak yoğunluğu, boşlukların konumu ve taşın farklı yüksekliklerdeki şekli hakkında çok ayrıntılı veri sağlamaktadır (Rosell & Sanz, 2012). LIDAR sensor teknolojesi, nesnelerin üç boyutlu olarak taranmasını sağlayan, uzaklık ölçümüne dayalı bir algılama yöntemidir. LIDAR sistemlerinde sensor ile hedef (rneğin yaprak veya dal) arasındaki mesafe iki ana yöntemle belirlenir: (i) lazer ışınının hedefe gidip geri dönme süresinin ölçülmesi (time-of-flight), (ii) gönderilen ve geri dönen lazer sinyalleri arasındaki faz farkının hesaplanması (phase-shift measurement). Bu yöntemler, bitki yapılarının hassas ve hızlı (saniyede binlerce nokta) biçimde üç boyutlu nokta bulutu (x, y, z) olarak modellenmesini mümkün kılmaktadır (Pfeifer & ark., 2004; Rosell & ark., 2009a; Rosell & ark., 2009b) (Resim 2).

Resim 2. Ultrasonik ve LIDAR sensorn tartkr üzerinde kullanımı



Kaynak: Rosell & Sanz, 2012.

LIDAR teknolojisinin önemli bir katkısı, bitki örtüsündeki mekânsal farklılaşmayı nicel olarak ortaya koyabilmesidir. Bu sensörler; gübreleme, sulama, toprak ısınması veya fumigasyon gibi tarla koşullarındaki farklı uygulamalara bitki tepkilerini izlemek üzere taç yapısındaki değişimleri zaman içinde hassas biçimde belirleyebilmektedir. Ayrıca lazer sistemlerinin sunduğu farklı bakış açıları ve mesafe bilgileri, taç yapılarının modellenmesinde önceki yöntemlere göre önemli bir ilerleme sağlamaktadır (Van der Zande & ark., 2006).

Uygulama açısından LIDAR destekli pülverizatörlerin sunduğu en önemli katkı, droplet deposition (damla yerleşimi) ve drift azaltımında gözlemlenen iyileşmelerdir. Liu & ark. (2022), tek bir 3D LIDAR sensörü, encoder ve IMU'dan oluşan bütünleşik sistem kullanılarak otomatik navigasyon ve hassas değişken oranlı püskürtme gerçekleştirilmiştir. Arazi testlerinde sistemin yanal sapmasının 22 cm'nin, yön açısı sapmasının ise 4.02°'nin altında kaldığı belirlenmiştir.

Püskürtme performansı açısından, geleneksel sabit oranlı uygulamaya kıyasla LIDAR tabanlı değişken debi sistemi pestisit kullanımını %32,46, hava kaynaklı drift miktarını %44,34 ve toprak yüzeyine düşen istenmeyen damla birikimini (ground deposition) %58,14 oranında azaltmıştır. Liu & ark. (2025), geliştirdikleri LiDAR destekli İHA değişken hızlı ilaçlama sistemi ile yaptıkları çalışmada, LiDAR nokta bulutu ve RGB verilerinden elde edilen biyokütle tahmin modeline dayalı reçete haritası kullanarak gerçek zamanlı değişken oranlı uygulama gerçekleştirmiştir. Geleneksel sabit oranlı uygulama ile karşılaştırıldığında, sistem eşdeğer ilaçlama etkinliğini korurken pestisit kullanımını %30,1 oranında azaltmıştır. Bu sonuçlar, LiDAR destekli İHA ilaçlama teknolojilerinin hem kimyasal tüketimini azaltma hem de çevresel kirliliği düşürme konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan, yüksek maliyetlerinden dolayı 3D LIDAR sensörler tarımda sınırlı kullanılmaktadır. Buna karşın daha düşük maliyetli 2D LIDAR sensörleri, doğrusal ve sabit hızlı hareket veya hassas GPS konumlandırma ile birleştirildiğinde, ardışık kesitlerden 3D nokta bulutu oluşturabilmektedir (Walklate & ark., 2002; Palacin & ark., 2007).

2.3. Optik Görüntüleme Sensörleri

Görüntüleme (vision) sensörleri, nesnelerin geometrik ve yüzeysel özelliklerini ışığın algılanmasına dayalı olarak ölçen ve dijital görüntüler aracılığıyla çevresel bilgiyi çıkaran optoelektronik sistemlerdir. Kompakt yapıları, düşük güç tüketimleri ve farklı platformlara kolaylıkla entegre edilebilir olmaları nedeniyle modern tarımsal üretim süreçlerinde bitki taç yapısının izlenmesi, büyüme analizi, meyve sınıflandırması ve hassas tarım uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu sensörler, görüntüleme modaliteleri ve veri üretim yöntemlerine bağlı olarak RGB kameralar, monokrom sensörler, derinlik algısı içermeyen klasik 2D kameralar ve stereovision sistemler gibi farklı sınıflara ayrılmaktadır.

Vision sensörlerinin temel çalışma prensibi, görünür veya yakın kızılötesi ışığın lens üzerinden görüntü sensörüne (CCD veya CMOS) düşmesi ve buradaki ışık yoğunluğunun dijital piksel değerlere dönüştürülmesine dayanır. Bu süreçte sensör, nesnelerin renk, doku, kenar, parlaklık ve gölgeleme özelliklerini temsil eden bir görüntü matrisi oluşturur. Ancak klasik 2D görüntüleme sistemlerinin ortak sınırlılığı, doğrudan derinlik (z-ekseni) bilgisi üretememeleridir. Bu nedenle, bitki taç hacmi, dalların konum ilişkisi veya üç boyutlu yapısal özelliklerin çıkarılmasında ek hesaplamalı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

RGB kameralar, üç renk kanalını (kırmızı, yeşil, mavi) kullanarak nesnelerin doğal renk özelliklerini yüksek doğrulukla

yakalayabilmektedir. Bu sensörler, renk farklılıklarının belirgin olduğu bitki hastalıklarının tespiti, meyve olgunluk tahmini veya ta örtüsü analizleri gibi görevlerde avantaj sağlar. Buna karşın RGB sensörlerin dezavantajları arasında ışık şiddetindeki değişimlere duyarlılık, yüksek yansıma yüzeylerinde oluşan gürültü ve renk bozulmaları yer almaktadır (Bulanon & Kataoka, 2011; Karadöl & ark., 2020).

Monokrom sensörler ise ışık yoğunluğunu tek bir kanalda algılar ve renk bilgisinden bağımsız olarak yüksek kontrast, daha düşük gürültü seviyesi ve daha geniş dinamik aralık sunar. Bu özellikleri nedeniyle yaprak kenarlarının belirlenmesi, doku sınıflandırması ve düşük ışık koşullarında görüntü elde edilmesi gibi görevlerde üstün performans göstermektedir. Ancak renk bilgisinin eksikliği, spektral analiz gerektiren uygulamalarda önemli bir dezavantajdır.

Derinlik bilgisinin bulunmadığı klasik 2D sensörler, yapısal karmaşıklığın düşük olduğu ortamlarda etkili olmakla birlikte, üç boyutlu bitki yapısının çıkarımında gölge, örtüşme (occlusion) ve değişken ışık koşulları nedeniyle sınırlı performans sergiler. Bu nedenle 3D rekonstrüksiyon gerektiren tarımsal uygulamalarda stereovision sistemler tercih edilmektedir.

Stereovision sensörler, iki veya daha fazla kameranın aynı sahneyi farklı açılardan görüntülemesi prensibine dayanır. Bu sistemlerde derinlik, kameralar arasındaki geometrik ilişki ve görüntü eşleştirme algoritmalarının hesapladığı piksel kaymaları (disparity) üzerinden triangölasyon ile elde edilir. Stereovision sistemler, 3D ta hacmi, dalların uzamsal dağılımı ve bitki mimarisinin modellenmesi gibi görevlerde yüksek performans sunar. Ancak bu sensörlerin kullanımında kamera kalibrasyonu kritik bir aşamadır ve lens distorsiyonu, kamera hizası ve epipolar geometri hataları nedeniyle uygulanması zordur. Ayrıca görüntü eşleştirme sürecinin hesaplama yükü yüksek olduğundan gerçek zamanlı

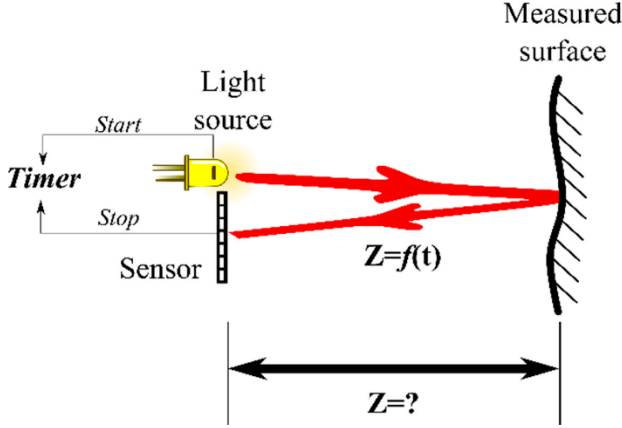
uygulamalarda işlemci performansı sınırlayıcı olabilir (Li & ark., 2014).

2.4. 3D Görüntüleme Sistemleri

Üç boyutlu (3D) görüntüleme teknolojileri, bitki örtüsünün mekânsal yapısını geometrik olarak modelleyen ve yüksek çözünürlüklü hacim, yoğunluk ve yüzey şekli bilgisi sağlayan gelişmiş sensör tabanlı algılama sistemleridir. Geleneksel optik veya ultrasonik sensörlerin çoğunlukla iki boyutlu (2D) veya mesafe tabanlı veriler üretmesine karşın, 3D görüntüleme sistemleri meyve ağaçlarının taç yapısını milimetre ölçeğinde üç boyutlu nokta bulutları veya derinlik haritaları şeklinde temsil ederek değişken düzeyli ilaçlamada önemli avantajlar sunmaktadır (Karkee & Adhikari, 2015). Bu teknoloji, özellikle karmaşık taç mimarisine sahip bahçe ilaçlama uygulamalarında memelerin hassas açma-kapama zamanlaması ve bölgesel debi kontrolü için günümüzde yaygın kullanılan yöntemlerden biri hâline gelmiştir.

3D görüntüleme yöntemleri arasında stereo kameralar, yapılandırılmış ışık (structured light) sistemleri, uçuş süresi (Time-of-Flight, ToF) kameraları ve derin öğrenme destekli RGB-D kameralar öne çıkmaktadır. Bu sistemlerde temel prensip, her bir piksel için derinlik bilgisinin hesaplanmasıdır. Örneğin stereo kamera sistemleri, iki kameradan elde edilen görüntüler arasındaki paralaks farkını kullanarak 3D rekonstrüksiyon yaparken; ToF kameraları ışığın hedefe gidip geri dönme süresini ölçerek gerçek zamanlı derinlik haritaları oluşturur (Vazquez-Arellano & ark., 2016) (Şekil 1).

Şekil 1. Zaman-uçuş (time-of-flight) ölçüm prensibinin şematik gösterimi



Kaynak: Vazquez-Arellano & ark., 2016.

Bu sistemlerin pülverizatörlerde kullanılmasının ana avantajı, bitkinin yalnızca varlığının değil, formunun, hacminin, iç boşluklarının ve dallar arasında bulunan yoğunluk farklılıklarının ayrıntılı biçimde analiz edilebilmesidir. Xue & ark. (2023), RGB-D görüntülerindeki derinlik bilgisini koruyan geliştirilmiş bir DeepLabv3+ modelinin, turuncgil taç yapısının gerçek zamanlı üç boyutlu analizine olanak sağladığını belirtmektedir. Çalışmada, derinlik haritalarının segmentasyonla bütünleştirilmesi sayesinde taç alanı, hacim ve diğer üç boyutlu morfolojik özelliklerin anlık olarak hesaplanabildiği; bu özelliğin ise hassas ilaçlama sistemlerinin doz ayarlama doğruluğunu anlamlı biçimde artırdığı vurgulanmaktadır. Ancak araştırmacılar, modelin mevcut formunun taç bölgelerini ağaç sağlığına göre sınıflandıramadığını ve gelecekte yapılacak çalışmaların bu yönde geliştirilmesi gerektiğini ifade etmektedirler.

RGB-D kameralarla elde edilen derinlik haritaları, konvolüsyonel sinir ağıları (CNN), nokta bulutu işlemede kullanılan PointNet tabanlı modeller ve üç boyutlu derin öğrenme yöntemleriyle işlenerek ta bölümleri, meyve kümeleri ve yaprak yoğunluğu gibi özellikler yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir (Kamilaris & Prenafeta-Boldu, 2018). Bu yöntemler, özellikle düzensiz yapraklanma veya farklı büyüme aşamalarına sahip bahçelerde püskürtme algoritmalarını zenginleştirerek sistemin uyarlanabilirliğini artırmaktadır.

3. Sonuç

Bahçe pülvemiztörlerinde hedef odaklı ilaçlama uygulamalarının başarısı, bitki ta yapısının, hacminin, yoğunluğunun ve mekânsal dağılımının doğru bir şekilde algılanmasına bağlıdır. Bu amaçla kullanılan sensör teknolojileri RGB-D kameralar, LiDAR, ultrasonik sensörler, monoküler/stereo kameralar ve optik sistemlerin her biri farklı avantajlar sunmakla birlikte, tarla koşullarında önemli sınırlılıklar taşımaktadır. RGB-D sensörler derinlik bilgisini düşük maliyetle sağlayabilseler de ışık yoğunluğu, gölgeleme ve yaprak yüzeyinin parlaklığı gibi çevresel etmenlere karşı oldukça hassastır. LiDAR sensörleri yüksek doğrulukla üç boyutlu geometrik yapı sunmasına rağmen, renk, doku veya bitki sağlığına ilişkin bilgileri yakalayamaz. Optik ve monoküler kameralar yüksek çözünürlüklü görüntü sunmakla birlikte sahnenin derinlik bilgisine ulaşamadığı için hacim, ta derinliği veya iç boşluk gibi püskürtme optimizasyonu için kritik parametreleri doğrudan belirleyemez. Stereo kameralar üç boyutlu yapı çıkarımı yapabilse de düşük tekstürlü yüzeylerde hata üretme ve kalibrasyon zorluğu gibi sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle tekil sensörler, özellikle düzensiz yapraklanma, örtüşen dallar, heterojen ışık dağılımı ve farklı fenolojik evrelerin bir arada bulunduğu karmaşık bahçe ortamlarında kararlı ve yüksek doğruluklu performans sunamamaktadır.

Bu eksiklikler son yıllarda çoklu sensör kombinasyonu yaklaşımlarını öne çıkarmıştır. Birden fazla sensörün birlikte kullanılmasıyla geometrik yapı (LiDAR), renk ve doku bilgisi (RGB kameralar), derinlik verisi (RGB-D veya ToF sistemleri) ve spektral yansıma özellikleri (hiper/multispektral sensörler) eş zamanlı olarak elde edilerek çevreye ilişkin daha bütüncül ve güvenilir bir algı oluşturulabilmektedir. Böylece tekil sensörlerin zayıflıkları birbirini telafi ederken, veri bütünleştirme sayesinde daha zengin özellik çıkarımı ve daha doğru karar mekanizmaları geliştirilebilmektedir. Wang & ark. (2025), çoklu sensörlü sistemlerin özellikle taç hacmi, yaprak yoğunluğu, hedef mesafe ve üç boyutlu taç geometrisinin belirlenmesinde tek sensörlü sistemlere kıyasla daha yüksek doğruluk, daha düşük hata birikimi, değişken ışık koşullarına karşı artmış dayanıklılık ve daha kararlı gerçek zamanlı performans sunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, hassas bahçe pülverizasyonunda çoklu sensör kombinasyonunun yalnızca bir tercih değil, modern uygulamalar için bir gereklilik haline geldiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sensör teknolojilerindeki gelişmeler ve çoklu sensör entegrasyonu, değişken düzeyli ilaçlama sistemlerinin doğruluğunu artırmakta, pestisit tüketimini azaltmakta ve çevresel emisyonları sınırlayarak sürdürülebilir ilaçlama stratejilerine önemli katkı sağlamaktadır. Gelecek çalışmaların, sensör verilerinin yapay zekâ tabanlı yöntemlerle daha etkin işlenmesine, sistemlerin farklı bahçe tiplerine uyarlanabilirliğinin artırılmasına ve ekonomik açıdan uygulanabilir hafif sensör konfigürasyonlarının geliştirilmesine odaklanması beklenmektedir.

Kaynakça

Aguilar, M. A., Pozo, J. L., Aguilar, F. J., Sanchez-Hermosilla, J., Páez, F. C., & Negreiros, J. (2008). 3D surface modelling of tomato plants using close-range photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII.

Andújar, D., & ark. (2023). *(Kaynak metinde geçiyor fakat tam künyesi verilmemiş.)*

Arnó, J., Camp, F., Escolà, A., Gil, E., Gràcia, F., Llorens, J & Val, L. (2009). A tractor mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements.

Balsari, P., Marucco, P., & Oggero, G. (2018). Variable rate sprayer. Part 2 - Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Biosystems Engineering*, 171, 220-232.

Balsari, P., Marucco, P., & Tamagnone, M. (2017). Variable rate sprayer. Part 1-Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Journal of Agricultural Engineering*, 48(2), 72-80.

Bhalekar, D. G., Parray, R. A., Mani, I., Kushwaha, H., Khura, T. K., Sarkar, S. K & Verma, M. K. (2023). Ultrasonic sensor-based automatic control volume sprayer for pesticides and growth regulators application in vineyards. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100232.

Bulanon, D. M., & Kataoka, T. (2010). Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 12(1).

Chen, Y., & ark. (2021). *(Metinde yer alan atıf; tam künye verilmemiş.)*

Dou, H., Zhai, C., Chen, L., Wang, X., & Zou, W. (2021). Comparison of orchard target-oriented spraying systems using photoelectric or ultrasonic sensors. *Agriculture*, 11(8), 753.

Escolà, A., Planas, S., Rosell, J. R., Pomar, J., Camp, F., Solanelles, F & Gil, E. (2011). Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies. *Sensors*, 11(3), 2459-2477.

Furness, G. (2003). Distance calibration and a new pesticide label format for fruit trees and grapevines in Australia. *Proceedings VII Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing*, 293-303.

Giles, D. K., Delwiche, M. J., & Dodd, R. B. (1988). Electronic measurement of tree canopy volume. *Transactions of the ASAE*, 31(1), 264-273.

Gil, E., Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S., & Val, L. (2007). Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*, 26(8), 1287-1297.

Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., & Lewis, K. (2015). Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 8-19.

Karkee, M., & Adhikari, B. (2015). A method for three-dimensional reconstruction of apple trees for automated pruning. *Transactions of the ASABE*, 58(3), 565-574.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.

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.

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.

Karadöl, H., & Aybek, A. (2017). Mısır Arazisinde Yabancı Otların Belirlenmesine Yönelik Matlab ve PLC Arası OPC Haberleşme Kullanılarak Geliştirilen Bir Kontrol Sistemi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(2), 129-137

Li, L., Zhang, Q., & Huang, D. (2014). A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors*, 14(11), 20078-20111.

Liu, L., Liu, Y., He, X., & Liu, W. (2022). Precision variable-rate spraying robot by using single 3D LIDAR in orchards. *Agronomy*, 12(10), 2509.

Liu, X., Liu, Y., Chen, X., Wan, Y., Gao, D., & Cao, P. (2025). LiDAR-assisted UAV variable-rate spraying system. *Agriculture*, 15(16), 1782.

Maghsoudi, H., & Minaei, S. (2013). Variable rate spraying: A methodology for sustainable development. *The 1st National Conference on Solutions to Access Sustainable Development in Agriculture, Natural Resources and the Environment*, Tehran, Iran. (In Farsi)

Maghsoudi, H., Minaei, S., Ghobadian, B., & Masoudi, H. (2015). Ultrasonic sensing of pistachio canopy for low-volume precision spraying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112, 149-160.

Palacín, J., Pallejà, T., Tresanchez, M., Sanz, R., Llorens, J., Ribes-Dasi, M., ... & Rosell, J. R. (2007). Real-time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(4), 1377-1383.

Pfeifer, N., Gorte, B., & Winterhalder, D. (2004). Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. In *Proceedings of 20th ISPRS Congress* (Vol. 35, pp. 114-119). Istanbul, ISPRS.

Rosell, J. R., & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124-141.

Rosell, J. R., Llorens, J., Sanz, R., Arnó, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., & Palacín, J. (2009). Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(9), 1505-1515.

Siegfried, W., Viret, O., Huber, B., & Wohlhauser, R. (2007). Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop Protection*, 26, 73-82.

Tumbo, S. D., Salyani, M., Whitney, J. D., Wheaton, T. A., & Miller, W. M. (2002). Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(3), 367.

Van der Zande, D., Hoet, W., Jonckheere, I., van Aardt, J., & Coppin, P. (2006). Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2-4), 147-160.

Vázquez-Arellano, M., Griepentrog, H. W., Reiser, D., & Paraforos, D. S. (2016). 3-D imaging systems for agricultural applications—A review. *Sensors*, 16(5), 618.

Walklate, P. J., Cross, J. V., Richardson, G. M., Murray, R. A., & Baker, D. E. (2002). Comparison of different spray volume deposition models using LiDAR measurements of apple orchards. *Biosystems Engineering*, 82(3), 253-267.

Wang, X., Zhang, N., & Yang, Q. (2019). Review on research and application of variable rate spray in agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(6), 1-12.

Weiss, U., & Biber, P. (2011). Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(5), 265-273.

Xue, X., Luo, Q., Bu, M., Li, Z., Lyu, S., & Song, S. (2023). Citrus tree canopy segmentation of orchard spraying robot based on RGB-D image and the improved DeepLabv3+. *Agronomy*, 13(8), 2059.

Zaman, Q. U., & Salyani, M. (2004). Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(2), 173-178.

Zaman, Q. U., & Schumann, A. W. (2005). Performance of ultrasonic sensors for tree canopy characterization. *Precision Agriculture*, 6, 467-480.

Zhao, Z., Wei, H., Liu, S., & Xue, Z. (2024). Estimation of agricultural soil surface roughness based on ultrasonic echo signal characteristics. *Soil and Tillage Research*, 239, 106038.

Zhou, J., Chen, Y., & Zhu, H. (2020). Design and development of a smart variable rate sprayer using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105472.

Zhou, J., Chen, Y., Jeon, H. Y., & Zhu, H. (2021). Field evaluation of a deep learning-based smart variable-rate sprayer for targeted application of agrochemicals. *Sensors*, 21(11), 3892.

BÖLÜM 3

HAYVAN BARINAKLARINDA ZARARLI GAZLAR VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

ALİ ÇAYLI¹

Giriş

Hayvanların verim düzeyi başta genetik yapı olmak üzere çevresel koşullar tarafından belirlenmektedir. Hayvan sağlığı ve üretim performansı ile barınak içi çevre koşulları arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Bu nedenle hayvanların genetik potansiyellerinden etkin biçimde yararlanılabilmesi, uygun barınak koşullarının sağlanmasına bağlıdır. Barınak çevresini belirleyen temel etmenler; sıcaklık, bağıl nem, hava hareketi, ışıklandırma, hayvan başına düşen alan, davranışsal etmenler, ses, barınak ekipmanları, zararlı organizmaların varlığı, istenmeyen kokular, toz ve zararlı gazlardır. Bu etmenlerin her birinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulması, hayvan refahı ve üretim sürdürülebilirliği açısından zorunludur.

Kapalı ortamlarda hava kalitesi, yalnızca hayvanların sağlığı ve verimi üzerinde değil; aynı zamanda çalışan güvenliği ve çevresel

¹ Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-8332-2264, alicayli@ksu.edu.tr

etkiler üzerinde de belirleyici bir rol oynamaktadır. Tarımsal yapıların planlanmasında çoğu zaman sıcaklık, bağıl nem, havalandırma ve ışıklandırma gibi parametreler ön planda tutulurken, zararlı gazlar, koku ve tozun etkileri ikincil düzeyde ele alınmaktadır. Oysa barınak içi hava kirleticilerinin belirli eşik değerlerin üzerine çıkması, hayvanlarda solunum sistemi rahatsızlıkları, stres artışı ve dolaylı olarak verim kayıplarına neden olabilmektedir. Genellikle genç ve gelişim dönemindeki hayvanlar bu tür kirleticilere karşı daha duyarlıdır ve düşük konsantrasyonlara uzun süreli maruziyet dahi olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Modern hayvansal üretim sistemlerinde üretimin büyük ölçüde kapalı yapılarda gerçekleştirilmesi, yetersiz hava değişimi ve atık kaynaklı kirleticilerin birikmesi riskini artırmaktadır. Hayvancılık faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan gübre ve diğer atıklar, uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel sorunlara yol açabilmekte; ancak doğru yöntemlerle değerlendirildiklerinde önemli bir ekonomik potansiyel de taşımaktadır. Atıkların gübre, biyogaz veya toprak düzenleyici olarak yeniden kullanılması hem çevresel yükün azaltılmasına hem de kaynak verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Hayvan barınaklarından yayılan gaz ve partikül emisyonlarının atmosfer, toprak, su kaynakları, bitki örtüsü ve insan sağlığı üzerindeki etkileri, yalnızca yerel ölçekte değil bölgesel ve küresel düzeyde de önem arz etmektedir. Özellikle amonyak ve sera gazlarının atmosferik taşınım ve kimyasal dönüşümler yoluyla asit yağışları, ötrofikasyon ve iklim değişikliği süreçlerine katkıda bulunduğu bilinmektedir. Bu çerçevede, hayvan barınaklarında hava kalitesinin bilimsel temellerle ele alınması ve kontrol stratejilerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu bölümde, hayvan barınaklarında hava kalitesini etkileyen başlıca zararlı gazlar ele alınmış; bu kirleticilerin oluşum

mekanizmaları ile hayvan sağlığı, üretim performansı ve çevre üzerindeki etkileri literatür ışığında değerlendirilmiştir. Ayrıca, hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik alınabilecek yapısal ve yönetsel önlemler tartışılarak, sürdürülebilir ve çevre dostu hayvancılık uygulamalarına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Hayvansal Atıklar

Hayvanlar sindiremedikleri ya da metabolizma atıkları olan bazı yem besin maddelerini gübre ve idrar olarak dışarı atarlar. Hayvanın yaşına, fizyolojik durumuna ve tüketilen yemin fiziksel özelliklerine göre atık miktarı farklılık gösterir. Hayvancılık faaliyetleri kapsamında oluşan atıklar genel olarak iki grupta ele alınmaktadır: hayvanların dışkılarından kaynaklanan atıklar ile üretim süreci sırasında ortaya çıkan diğer atıklar. Hayvan dışkısı; sığır, at, koyun ve kanatlı hayvanlar gibi farklı hayvan türlerinden oluşan atıkları kapsamaktadır. Üretim sürecine bağlı olarak oluşan atıklar arasında ise yem kalıntıları, ahır temizliği sırasında ortaya çıkan atık sular ve mezbaha faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan iç organ kalıntıları yer almaktadır (Öztürk & ark., 2020). Hayvan atıkları; büyük baş, küçük baş ve kümes hayvancılığı atıkları olmak üzere üç ana başlık altında değerlendirilmektedir. Canlı ağırlığa bağlı olarak belirli hayvanların günlük atık miktarları Çizelge 1’de gösterilmektedir (Ergöl, 1989; Karaman, 2006).

Çizelge 1. Bazı hayvanların günlük gübre ve idrar atımları

Hayvan Türü	Canlı Ağırlık (kg)	Gübre ve İdrar (kg)	Gübre ve İdrar (%)
Sığır	500	45	9
Koyun	50	3.5	7
Tavuk	1.8	0.18	10

Hayvansal katı atıkların özellikleri; hayvan türü, canlı ağırlığı, beslenme düzeni ve mevsimsel koşullar gibi birçok etkene bağlı olarak farklılık göstermektedir. Hayvanların günlük dışkı

miktarları türlerine göre değişmektedir. Bu miktarın hesaplanmasında büyükbaş hayvanlar için günde yaklaşık 10–20 kg yaş dışkı ya da canlı ağırlığın %5–6’sı esas alınabilmektedir. Koyun ve keçilerde ise günlük dışkı üretimi yaklaşık 2 kg yaş dışkı veya canlı ağırlığın %4–5’i olarak kabul edilmektedir. Kanatlı hayvanlarda günlük dışkı miktarı 0,08–0,1 kg yaş dışkı ya da canlı ağırlığın %3–4’ü düzeyindedir. (Öztürk & ark., 2020).

Bazı hayvan atıklarının fiziksel özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir (Hart, 1960; Hart, 1963; Middlebrooks, 1974).

Çizelge 2 Bazı hayvan atıklarının fiziksel özellikleri

Hayvan Türü	Hayvan kütlesi (kg)	Dışkı (L/gün)	Atık yoğunluğu (kg/m ³) **	Katı madde miktarı (%)	H ₂ O (%)	N* (%)
Sığır (Süt)	636	36.8	993	15	85	3.5
Sığır (Et)	431	28.3	962	15	85	3.1
Tavuk (Et ve Yumurta)	2.0–2.3	0.095–0.160	962	15–85 (72)	72	5.4
Koyun	45	3.1	1040	23	77	5.4
(*Azot yüzdesi fırında kurutulmuş ağırlığın yüzdesidir) (** İdrar ve dışkı bir arada, altlık malzemesi hariç)						

Hayvan barınaklarında uygun şekilde temizlenip depolanmayan gübre hem iç hem de dış ortamları kirletmektedir. Bu nedenle, gübrenin barınak havasına yaydığı koku ve havadaki zararlı maddelerin insanlara ve hayvanlara zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırılması gerekir (Alagöz & ark., 1996). Tarımsal işletmelerde gübre yönetimi nadiren kâr getirir. Çoğu zaman gübrenin uygun şekilde işlenmesi ve bertaraf edilmesi, gübre veya toprak düzenleyici olarak kullanmaktan daha maliyetli olacaktır.

Yine de hayvan bakımı veya besleme kadar gübre yönetimi de önem arz etmektedir. Doğru bir gübre yönetimi hem gübreyi işleme maliyetini düşürebilir hem de tarım işletmesinin hijyen gereksinimleri karşılanır (Hart, 1960).

Hayvan Barınaklarından Kaynaklı Emisyonun Çevre Üzerindeki Etkileri

Vejetasyon, toprak, yüzey ve yer altı suyu, hayvancılık üretim birimlerinden kaynaklanan amonyak emisyonlarından doğrudan etkilenmektedir. Atmosfere salınan amonyağın %80'i tarımdan kaynaklanmaktadır. Ferm & Grennfelt (1986) tarafından yapılan basit hesaplamalar, tarımdan salınan amonyağın önemli bir kısmının kaynaktan 100 km mesafeye kadar çökelti olarak düştüğünü göstermektedir. Amonyak gazı olarak daha uzun mesafelere taşınması hiç gözlemlenmemiştir, ancak bunun yerine amonyum formunda taşınması daha olasıdır. Amonyak veya amonyum formundaki azot, doğada önemli bir besin maddesidir ve birçok biyolojik süreci doğrudan veya dolaylı olarak etkiler. Düşük seviyelerde azot; bitkiler, mantarlar ve mikroorganizmalar üzerinde büyüme teşvik edici bir etkiye sahiptir.

Azot, aynı zamanda toprak süreçlerini değiştirir ve kısmen organizmalar arasındaki rekabeti etkiler. Yüksek seviyede azot oksitleri ve amonyum birikimi, SO₂ ve uçucu organik bileşiklerle birlikte, toprak ve suyun asitleşmesine katkıda bulunur. Toprak etkileri, azot ile diğer önemli besin maddeleri arasındaki besin dengesindeki değişikliklere bağlanabilir. Toprak ve suyun bu şekilde zenginleşmesi, ötrofikasyona yol açar (CIGR, 1994; Caenagem & Wechsler, 2000).

Hayvan barınaklarından salınan parçacıkların etkileri, çoğunlukla binaların çevresindeki yakın çevre ile sınırlıdır. Çoğu parçacık, çevredeki yapılar ve vejetasyon üzerinde çöker ve etki genellikle genel bir estetik bozulma ve olası hijyen sorunlarıyla

sınırlıdır. Ancak, bazı parçacıklar, patojenler de dahil olmak üzere, önemli mesafeler kat edebilir ve patojenik bakterilerin 3 km mesafeye kadar canlı kalabileceğine dair dolaylı kanıtlar bulunmaktadır (Goodwin, 1985).

Hayvan Barınaklarından Kaynaklı Emisyonun Hayvanlar Üzerindeki Etkiler

Hayvan barınaklarında oluşan gaz emisyonları ve partikül maddelerin hayvan sağlığı ve üretim performansı üzerindeki etkileri, hayvansal üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Barınak ortamında ortaya çıkan gerçek salınımlar ve bu salınımları oluşturan bileşiklerin hayvanlar üzerindeki etkileri, maruziyet süresi, konsantrasyon düzeyi ve hayvan türü gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu etkiler çoğu zaman çok faktörlü bir yapı sergilemekte olup, hava kalitesi parametreleri ile hayvan sağlığı arasındaki doğrudan neden–sonuç ilişkilerinin nicel olarak ortaya konulması her zaman mümkün olmamaktadır. Buna karşın, literatürde bazı gazların (özellikle amonyak, hidrojen sülfür ve metan) ile askıda bulunan partikül maddelerin, hayvanların solunum sistemi sağlığı, bağışıklık yanıtı ve genel üretkenliği üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ortaya koyan güçlü bulgular mevcuttur. Yüksek kirletici konsantrasyonlarına uzun süreli maruziyetin, solunum yolu irritasyonu, stres düzeyinde artış ve dolaylı olarak verim kayıplarına yol açabileceği bildirilmektedir. Bu kapsamda, barınak içi hava kalitesinin hayvan refahının temel belirleyicilerinden biri olduğu değerlendirilmektedir.

Genel bir yaklaşım olarak, hayvansal üretim tekniklerinin, hayvanların hava kirleticilerine maruziyetini mümkün olan en düşük düzeye indirecek şekilde planlanması gerektiği ifade edilmektedir (CIGR, 1994). Bu hedefe ulaşılabilmesi için havalandırma sistemlerinin etkinliği, barınak tasarımı, hayvan yoğunluğu ve atık

yönetimi uygulamalarının birlikte ele alınması gerekmektedir. Hava kalitesi ile hayvan sağlığı arasındaki etkileşimin düzeyi, kullanılan hayvan üretim sistemleri ile yakından ilişkilidir. Birçok modern hayvansal üretim sistemi; yüksek yoğunluklu üretim, hızlı fizyolojik büyüme hedefleri ve genetik açıdan benzer hayvan popülasyonları ile karakterize edilmektedir. Bu tür sistemlerde, hayvanlar sosyal etkileşimlerin ve çevresel stres faktörlerinin daha yoğun olduğu koşullar altında yetiştirilmektedir. Bu durum, hastalık etkenlerinin yayılma olasılığını artırmakta ve hayvanların çevresel baskılara karşı daha duyarlı hâle gelmesine neden olabilmektedir. Çevresel koşullardaki herhangi bir olumsuzluğun, hayvanların bağışıklık sistemini zayıflatması durumunda, söz konusu etkinin yalnızca bir çevre sorunu değil, aynı zamanda doğrudan bir üretim problemi olarak ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Kelley, 1985). Dolayısıyla, barınak ortamında hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik önlemler, yalnızca hayvan refahını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda hastalık risklerinin azaltılması ve üretim verimliliğinin sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından da kritik bir öneme sahiptir (Hellickson & Walker, 1983; Balaban & Şen, 1988; CIGR, 1994; Kılıç & Şimşek, 2009; Mutaş, 2012).

Hava Kirleticiler ve Toksisiteleri (Zararlı Gazlar)

Hayvan barınaklarında hava kalitesini olumsuz yönde etkileyen başlıca gazlar; karbondioksit (CO_2), amonyak (NH_3), hidrojen sülfür (H_2S), metan (CH_4) ve karbon monoksit (CO) olarak sıralanmaktadır. Bu gazların konsantrasyonları genellikle ppm veya mg/m^3 birimleriyle ifade edilmektedir. Normal atmosfer havası ağırlıklı olarak azot, oksijen, argon ve düşük oranda karbondioksit içermekte; bunun dışında iz miktarlarda metan, helyum ve hidrojen gibi gazlar da bulunmaktadır. Gazların yoğunlukları dikkate alındığında, karbondioksit ve hidrojen sülfür havadan daha ağır; amonyak ve metan ise havadan daha hafif özellik göstermektedir. Bu durum, barınak içerisinde gazların birikme bölgelerini doğrudan

etkilemektedir. Uygun şekilde tasarlanmış ve işletilen havalandırma sistemlerinde CO₂, NH₃ ve H₂S genellikle barınak hacmi içinde daha homojen dağılırken, metan çoğunlukla tavan seviyelerinde birikme eğilimindedir. Barınak ortamında farklı kaynaklardan oluşan bu gazlar, hayvanların öncelikle solunum yolları, göz ve deri dokuları üzerinde tahriş edici etkilere neden olmaktadır. Amonyak ve hidrojen sülfür, düşük konsantrasyonlarda dahi tahriş edici özellik gösteren ve yüksek seviyelerde akut toksisiteye yol açabilen gazlar arasında yer almaktadır (Yağanoğlu, 1987). Karbondioksit ve metan ise doğrudan toksik olmamakla birlikte, kapalı ortamlarda oksijen konsantrasyonunu düşürerek asfiksi riskini artırmaktadır. Bu durum, hayvanlarda huzursuzluk, solunum güçlüğü, performans düşüşü ve ileri seviyelerde ölümle sonuçlanabilmektedir.

Barınaklarda zararlı gazların birikimi büyük ölçüde havalandırma oranı, hayvan yoğunluğu, atık yönetimi ve barınak tasarımı ile ilişkilidir. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde, ısı kaybını azaltma amacıyla havalandırmanın yetersiz tutulması, amonyak ve hidrojen sülfür gibi gazların zararlı düzeylere ulaşmasına neden olabilmektedir. Yönetimsel aksaklıklar ve yetersiz bakım uygulamaları da bu süreci hızlandıran etmenler arasında yer almaktadır. Zararlı gazlara uzun süreli maruziyet, hayvanlarda iştah kaybı, stres artışı, solunum yolu hastalıkları ve bağışıklık sisteminin zayıflaması gibi olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, barınaklarda hava kalitesinin korunması; etkili havalandırma sistemlerinin kullanılması, gaz konsantrasyonlarının düzenli olarak izlenmesi ve uygun atık yönetimi uygulamalarının benimsenmesiyle mümkündür. Bu önlemler yalnızca hayvan sağlığı ve refahını artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çalışan güvenliği ve işletmenin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından da temel bir gereklilik oluşturmaktadır.

Karbondioksit, amonyak, hidrojen sülfür, metan ve karbon monoksit gazlarının hayvanlara zarar veren ve vermeyen

konsantrasyonları ile hayvanlarda görülen belirtiler Çizelge 3'te verilmiştir (Esmay & Dixon, 1986; Yağanoğlu, 1987).

Çizelge 3. Hayvan barınaklarında zararlı gazlar ve etkileri

Zararlı Gaz	İzin Verilen Maksimum (ppm)	Zararlı Olan Miktar (ppm)	Hayvanlarda Görülen Belirtileri
Karbondioksit	5000	20000	Huzursuzluk
		30000	Nefes alma güçlüğü
		40000	Uyuşukluk ve baş ağrısı
		60000	Havasızlıktan boğulma
		300000	Ani ölüm
Amonyak	50	400	Boğazda tahriş
		700	Gözlerde tahriş
		1700	Öksürük ve ağızdan köpüklü salya
		3000	Havasızlıktan boğulma
		5000	Ölüm
Hidrojen Sülfür	10	100	Burun ve gözlerde tahriş
		200	Baş ağrısı, baş dönmesi ve sersemlik
		500	Mide bulantısı ve tiksinti
		1000	Baygınlık ve ölüm
Metan	1000	500000	Baş ağrıları
Karbonmonoksit	50	1000	Halsizlik
		2000	Tehlikeli uyuşukluk
		4000	Ölüm

Çizelgedeki izin verilen sınırların aşılması ve hava kalitesinin kötüleşmesi, hayvanların sağlık durumunu, verimliliğini ve çalışanların güvenliğini tehdit eder. Genel olarak hayvanlarda iştah kaybı, uyuşukluk, solunum yollarında rahatsızlıklar, nefes alma

güçlüğü, göz irritasyonu gibi belirtiler görülür. Uzun süre maruziyet ise bu belirtilerin şiddetlenmesine ve ölümlere kadar giden bir sürecin yaşanmasına neden olur. Bu nedenle, uygun havalandırma sistemleri ve gaz kontrol yöntemleri, tarımsal yapılar için hayati öneme sahiptir. İlgili gazların düzenli olarak izlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması hem hayvanların hem de çalışanların sağlığını korumak açısından önemlidir. Hava kirleticileri ve toksisiteleri, tarımsal faaliyetlerin yanı sıra sanayi, ulaşım ve diğer kaynaklardan kaynaklanabilir.

Amonyak (NH₃)

Modern hayvancılık işletmeleri, dışkı kaynaklı yüksek miktardaki amonyak (NH₃) üretimi nedeniyle önemli çevresel ve yönetsel sorunlara yol açmaktadır. İnsan kaynaklı NH₃ emisyonlarının yaklaşık yarısının hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklandığı ve özellikle kanatlı üretiminin bu payda belirgin bir yere sahip olduğu bildirilmektedir. Hayvan barınaklarında depolanan veya çevreye yayılan atıklar, NH₃ salınımını artırmakta; salınan NH₃ atmosferde nitrik ve sülfürik asit gibi bileşiklerle reaksiyona girerek aerosol formunda amonyum partikülleri oluşturmakta ve böylece hava kalitesini, ekolojik dengeyi ve su ekosistemlerini olumsuz etkilemektedir. Atmosfere yayılan NH₃ kısa sürede toprağa, bitkilere veya suya çökerek toprak asitlenmesi, orman verimliliğinde değişim, akarsu asitliği ve kıyısal bölgelerde üretkenlik kaybı gibi çevresel sonuçlar doğurmakta; ayrıca artan azot girdileri asit yağmurları ve ötrofikasyonu tetiklemektedir. Ekosistemlerin doğal olarak düşük azot seviyelerine uyum sağlamış bitki türleri, artan azot birikimi karşısında rekabet güçlerini yitirerek yerlerini daha hızlı büyüyen türlere bırakmakta ve bu durum doğal bitki kompozisyonunda önemli değişikliklere neden olmaktadır (Elwinger & Svensson, 1996; Asman & ark., 1998; Roadman & ark., 2003; Ritz & ark., 2004; Nolan, 2007).

Hayvansal üretimde NH_3 oluşum düzeyi, hayvan türü, yaş, beslenme, barınak koşulları ve yönetim uygulamalarına bağlı olarak değişmektedir. Büyükbaş hayvanların yüksek protein içerikli yemlerle beslenmesi NH_3 oluşumunu artıran başlıca etmenlerden biridir.

Hayvan türlerine göre izin verilen maksimum ve zararlı NH_3 konsantrasyonları Çizelge 4'te verilmiştir (Casey & ark., 2006; Council, 2007; Copeland, 2010; Karaman & Gökalp, 2017; Bist & ark., 2023).

Çizelge 4. Hayvan barınaklarında önerilen NH_3 sınır değerleri

Hayvan Türü	İzin Verilen Maksimum Konsantrasyon (ppm)	Zararlı Olan Konsantrasyon (ppm)
Tavuklar (Kümes Hayvanları)	10	20-25
Sığırlar	10	10-25
Hindi	10	15-20
Koyun-Keçi	5-10	10-20

Kanatlı üretiminde kullanılan altlık materyalleri (odun talaşı, pirinç kabuğu vb.) ile dışkı, idrar, tüy, yem artıkları ve suyun birleşimi “litter” (altlık materyali) olarak adlandırılmakta; yüksek trafik alanlarında oluşan daha yoğun ve nemli tabaka ise “cake” (yoğunlaşmış altlık tabakası) olarak tanımlanmaktadır. Bu materyaller, bitkiler için değerli bir gübre kaynağı olmakla birlikte içerdikleri azot bileşenlerinin NH_3 'ye dönüşmesi çevresel açıdan önemli bir endişe oluşturmaktadır (Miles & ark., 2008).

NH_3 emisyonlarının kaynakları arasında sanayi, ulaşım, gübre kullanımı ve diğer insan faaliyetlerinin yanı sıra hayvan üretimi önemli bir yer tutmaktadır (Anderson & ark., 2003). Avrupa ülkelerindeki tahminler, toplam emisyonlarda hayvansal üretimin

payının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir; örneğin, Hollanda'da %85 (Koerkamp & Elzing, 1996) ve Danimarka'da %93 (Rom, 1993). Bireysel tesislerde NH₃ kayıpları, barınak, depolama ve arazi uygulaması aşamalarında farklı oranlarda gerçekleşmektedir. Örneğin, broyler üretiminde NH₃ kayıpları sırasıyla %28 barınak, %15 depolama ve %57 arazi uygulaması olarak bildirilmiştir (Nicholson & ark., 2004). ABD'de 2002 yılı için yapılan bir tahminde, kanatlı sektöründen 664.238 ton NH₃ emisyonu beklenmiş ve bunun %31'inin barınaklardan kaynaklandığı belirtilmiştir (Arogo & ark., 2003; Kılıç, 2013).

NH₃ emisyonlarının azaltılması hem çevresel yükün hafifletilmesi hem de tarımsal verimliliğin artırılması açısından önemlidir. Bu amaçla, besleme stratejilerinin optimize edilmesi, barınak ve gübre yönetiminin iyileştirilmesi ve daha etkili emisyon faktörlerinin kullanılması gibi yöntemler uygulanabilmektedir. Bu önlemler içinde havalandırma, NH₃ oluşumunu tek başına ortadan kaldıran bir çözüm olmaktan ziyade; gübre yönetimi, altlık nemi ve besleme rejimi ile birlikte ele alındığında etkinliği artan tamamlayıcı bir kontrol unsurudur.

Karbondioksit (CO₂)

Karbondioksit (CO₂), hayvanların metabolizması sırasında üretilir ve solunum yoluyla atmosfere salınır. Renksiz ve kokusuz olan CO₂, havadan daha ağır bir gazdır. Yoğun besi sistemlerinde ve yüksek hayvan yoğunluğuna sahip barınaklarda CO₂ seviyeleri hızla artabilir. Solunum dışında, organik materyallerin anaerobik çürümesi, barınaklarda kullanılan ısıtma sistemleri ve tarım makinelerinin çalışması da CO₂ seviyelerini artıran diğer kaynaklardır. Ayrıca, barınaktaki insanlar da ortama CO₂ salgılar. Normal atmosferik CO₂ konsantrasyonu yaklaşık 380 ppm'dir; barınaklarda hayvan solunumu ve gübrenin ayrışması sonucu bu değer önemli ölçüde artar.

Hayvan türlerine göre CO₂ üretim kapasiteleri farklılık göstermektedir (Çizelge 5). Büyükbaş hayvanlar, yüksek metabolik aktivite ve vücut kütlesi nedeniyle daha fazla CO₂ üretirler. Kümes hayvanları ve civcivler ise daha küçük vücut yapıları ve metabolizma hızları nedeniyle daha düşük miktarda CO₂ üretir. CO₂, insanlar ve hayvanlar için doğrudan toksik olmasa da yüksek konsantrasyonlarda oksijen yetersizliğine neden olarak boğulmaya sebep olabilir. CO₂ havadan ağır olduğundan kapalı alanlarda zeminden yükselerek oksijenin yerini alabilir ve baş ağrısı, baş dönmesi, solunum güçlüğü gibi belirtilere neden olabilir. Çok yüksek seviyelerde (≥ 250.000 ppm), kısa süre içinde ölüme yol açabilir (Burton & Turner, 2003; Anonymous, 2008; Odgers & ark., 2008).

Çizelge 5. Hayvan türlerine göre CO₂ üretim kapasiteleri

Hayvan Türü	Üretim Miktarı (Kg CO ₂ /saat)	Bağlı Faktörler
Sığır	0.6- 0.8	Ağırlık, yaş, beslenme (örneğin, kaliteli yemle beslenme), metabolizma hızı
Koyun	0.3- 0.5	Ağırlık, cins, yaş ve diyet türü
Keçi	0.2- 0.4	Beslenme, yaş ve genel sağlık durumu
Tavuk	0.05- 0.1	Yaş, cins, beslenme ve stres seviyeleri
Civciv	0.02- 0.05	Büyüme aşaması, beslenme ve çevresel koşullar

İyi havalandırılan barınaklarda tipik CO₂ konsantrasyonları 500–5000 ppm arasında değişir. İnsanlar için 700 ppm’in altındaki hava iyi kalite olarak kabul edilirken, hayvan sağlığı ve verim açısından CO₂’nin 2000 ppm’i geçmemesi önerilmektedir. 10.000 ppm’in üzerinde ise ciddi sağlık riskleri ortaya çıkabilir.

Hayvan türlerine göre önerilen maksimum ve zararlı CO₂ konsantrasyonları Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Hayvan barınaklarında önerilen CO₂ sınır değerleri

Hayvan Türü / Kullanım Alanı	Önerilen Maksimum (ppm) ¹	Zararlı Etki Başlangıcı / Uyarı Seviyesi (ppm) ¹	Açıklama / Etkiler
Sığır (ve büyükbaş)	≤ 3000	6000–7000	3000 ppm altı çoğu ahır için güvenli kabul ediliyor; 6000–7000 ppm civarında solunum rahatsızlığı, stres ve verim düşüşü riski artar.
Koyun / Keçi (küçükbaş)	≤ 3000	6000–7000	Vücut kütlesi ve metabolik aktivite dikkate alındığında; havalandırma yetersizse yüksek CO ₂ hayvan sağlığını ve konforunu bozar.
Kümes hayvanları (tavuk, civciv vb.)	≤ 2000	4000–5000	Tavuk kümeslerinde, 3000 ppm civarı genellikle üst sınır kabul edilir; 5000 ppm ve üzeri durumlarda solunum sistemi stresleri, yem tüketiminde azalma gözlemlenebilir.

Yüksek CO₂ seviyeleri, barınak ortamında solunan havadaki oksijen oranını düşürerek hayvan ve çalışan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Özellikle havalandırmanın yetersiz olduğu hayvan barınaklarında CO₂ birikimi, solunum yollarında tahriş ve oksijen yetersizliği nedeniyle boğulma riskini artırır; bu durum hayvanlarda başta solunum problemleri, stres, davranış bozuklukları ve performans kaybına yol açabilir. Örneğin, kümes ya da ahırlarda uygun havalandırma sağlanmadığında CO₂ konsantrasyonu 5000 ppm civarına ve üzerinde ölçülmüştür. Bu seviyeler, yem tüketiminde azalma, büyüme geriliği ve genel verim düşüşü ile ilişkilendirilmiştir.

CO₂ için havalandırmanın temel işlevi, toksik bir gazın giderilmesinden çok, barınak ortamındaki oksijen–karbondioksit dengesinin korunması ve metabolik yükün güvenli sınırlar içinde tutulmasıdır. Bu nedenle CO₂, barınak içi hava kalitesinin doğrudan

bir kirlilik göstergesinden ziyade, havalandırma yeterliliğini temsil eden bir kontrol parametresi olarak değerlendirilmektedir.

Hidrojen Sülfür (H₂S)

H₂S, hayvan barınaklarında en riskli gazlardan biri olarak kabul edilmektedir; özellikle gübre depolama ve sıvı atık sistemlerinde, organik atıkların anaerobik (oksijensiz) ortamda çürütülmesiyle sülfat indirgenmesi sonucu açığa çıkar. Bu süreç, dışkı-idrar karışımı, altlık materyali, sıvı gübre tankları veya derin pitler gibi kapalı, havalandırması yetersiz ortamlarda yaygındır. Gaz, havadan ağır olması nedeniyle çöker ve özellikle çukur, pit veya tank tabanlarında birikir; pompalama, karıştırma, taşıma gibi işlemler sırasında ani ve yüksek konsantrasyonlarda atmosfere salınır. Bu durum hem hayvanlar hem de çalışanlar için ciddi tehlike oluşturmaktadır (Kirkhorn & Garry, 2000; Donham & Thelin, 2016; Brglez, 2021).

Çizelge 7’de H₂S konsantrasyonları ve hayvanlar üzerindeki etkileri verilmiştir (Karaman, 2006; Kılıç & Şimşek, 2009; Guarrasi & ark., 2015; Beswick-Honn & ark., 2017).

Çizelge 7. H₂S konsantrasyonları ve hayvanlar üzerindeki etkileri

Konsantrasyon (ppm)	Etki / Açıklama
20	Yem tüketimi azalır, tahriş başlar
50–200	Ciddi hastalık riski
>200	Yüksek toksisite, bağırsak sorunları, ishal, ölüm

Önceki çalışmalar, barınaklarda H₂S konsantrasyonlarının genellikle düşük olduğunu, ancak gübre karıştırma, pompalama gibi işlemler sırasında kısa süreli pik değerlerin ortaya çıktığını göstermektedir. Örneğin, yoğun üretim tesislerindeki ölçümlerin büyük bölümünde düşük seviyelerde (<1 ppm) kaydedilmiş olsa da

işlem sırasında konsantrasyonun 97 ppm'e kadar yükselebildiği rapor edilmiştir. Bir saha çalışmasında da pompalama işlemi sırasında H₂S konsantrasyonunun, sıvı gübrenin durgun haline kıyasla yedi kat arttığı ve bu durumun ölümcül riskler oluşturabileceği belirtilmiştir (Guarrasi & ark., 2015; Brglez, 2021). Ayrıca, kapalı barınaklarda yetersiz havalandırma, yağış, sıcaklık ve atık yoğunluğu gibi faktörler de H₂S birikimini artıran önemli değişkenler arasında yer almaktadır (Kılıç & Şimşek, 2009).

Yapılan bir çalışmada hayvan barınaklarındaki ölçülen H₂S seviyeleri Çizelge 8'de verilmiştir (Guarrasi & ark., 2015).

Çizelge 8. Hayvan türüne göre ölçülen H₂S konsantrasyon dağılımı

Hayvan Türü	İncelenen Çalışma Sayısı	Toplam Ölçüm Sayısı	Ölçülen Konsantrasyon Aralığı (ppm)	Ağırlıklı Ortalama (ppm)
Kanatlı (Tavuk, Hindi vb.)	7	2.273	0 – 9,16	0,33
Sığır (Et ve Süt)	8	598	0 – 22,3	0,26

Çizelge incelendiğinde görüleceği üzere, yoğun hayvancılık işletmelerinde ölçülen ortalama H₂S konsantrasyonları genel olarak düşük seviyelerde seyretmektedir. Özellikle sığır ve kanatlı işletmelerinde ağırlıklı ortalamalar 1 ppm'in oldukça altındadır. Ancak büyükbaş işletmelerde durum daha karmaşıktır. Ortalamaların düşük olmasına rağmen, ölçülen maksimum değerler yüksek olması, bu işletmelerde özellikle gübre karıştırma, temizlik veya bakım gibi belirli faaliyetler sırasında ani ve son derece yüksek zehirli gaz salınımlarının yaşanabileceğini göstermektedir. Bu pik değerler, maruz kalan canlılar (hem hayvanlar hem çalışanlar) için ani ölüm riski oluşturabilecek kadar tehlikelidir. H₂S'den kaynaklanan risklerin önlenmesi için çok yönlü bir yaklaşım benimsenmelidir. H₂S'den kaynaklanan risklerin önlenmesinde havalandırma, sürekli bir iyileştirme aracı olmaktan çok; gübre karıştırma, pompalama ve bakım gibi işlemler sırasında ortaya

çıkabilecek ani ve kısa süreli pik konsantrasyonların seyreltilmesini sağlayan acil bir kontrol mekanizması olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle H₂S kontrolünde, işlem zamanlaması, çalışma prosedürleri ve gaz algılama sistemleri, havalandırmadan daha belirleyici unsurlar hâline gelmektedir.

Metan (CH₄)

Hayvan barınaklarında metan gazının oluşumu, hayvanların yedikleri yiyecekleri sindirme biçimleri ve gübrelerin depolanma koşullarıyla ilgilidir. Büyükbaş hayvanlar, özellikle de sığırlar, sindirim süreçleri sırasında diğer hayvan türlerine kıyasla çok daha fazla metan üretmektedir. Bu durum, midelerinde bulunan özel mikroorganizmaların yemleri parçalama şekliyle ilişkilendirilmiştir (Mama & Seid, 2019). Buna ek olarak, hayvan gübresinin kapalı veya havasız ortamlarda depolanması da bakteriyel faaliyetleri artırmakta ve depolanan gübreden ek metan salımına yol açmaktadır (Maurer & ark., 2017). Araştırmalar, bu bakterilerin yaklaşık 35°C civarında en aktif seviyede olduklarını ve bu sıcaklığa yaklaşıldıkça metan üretiminin arttığını göstermektedir. Hayvan türleri arasında metan üretim miktarı sindirim sisteminin yapısı, yem tüketimi, yaş, üretim amacı ve barınak koşulları gibi birçok etkene bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Sığırlar, koyunlar ve keçiler gibi geviş getiren hayvanlar, sindirim süreçlerinde gerçekleşen yoğun mikrobiyal faaliyet nedeniyle diğer hayvan türlerine göre çok daha fazla metan üretirken, kanatlılarda bu miktar sindirim yapılarının farklı olması nedeniyle oldukça düşüktür. Örneğin bir süt ineğinin günde yaklaşık 17 kg kuru yem tükettiğinde ortalama 0,5 m³ metan ürettiği, bunun da standart koşullar (0°C ve 1 atmosfer basınç) dikkate alındığında yaklaşık 0,36 kg metana karşılık geldiği bildirilmektedir. Ayrıca aynı tür içinde bile hayvanın yaşı, yem kalitesi ve tüketim miktarı gibi faktörler günlük metan üretiminde belirgin farklılıklara yol açabilmektedir (Johnson & Johnson, 1995; Gerber & ark., 2013; Chan & ark., 2015).

Çizelge 9’da farklı hayvan türlerinin günlük ortalama metan üretimlerine ilişkin veriler özetlenmiştir. Bu değerler, bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan aralıkları temsil etmektedir.

Çizelge 9. Hayvan türlerine göre günlük metan üretim potansiyeli

Hayvan Türü	Günlük Metan Üretimi (L/gün)	Günlük Metan Üretimi (m ³ /gün)	Kaynaklar
Süt ineği	300–600	0.30–0.60	(Ellis & ark., 2007; Knapp & ark., 2014)
Besi sığırı	150–280	0.15–0.28	(Johnson & Johnson, 1995; Gerber & ark., 2013)
Koyun	20–35	0.02–0.035	(Johnson & Johnson, 1995; IPCC, 2006)
Keçi	15–28	0.015–0.028	(IPCC, 2006)
Manda	200–400	0.20–0.40	(Gerber & ark., 2013)
Kanatlı (Et piliç / Yumurta)	0.02–0.06	0.00002–0.00006	(IPCC, 2006)

Çizelgede görüldüğü üzere, metan üretimi bakımından en yüksek değerler sığır, koyun ve keçi gibi geviş getiren hayvanlarda görülmektedir. Bunun temel nedeni, bu hayvanların midelerinde bulunan özel mikroorganizmaların yemleri parçalama sürecinde doğal olarak metan açığa çıkarmasıdır. Buna karşılık kanatlılar, sindirimi farklı şekilde gerçekleştirdikleri için çok düşük seviyelerde metan üretmektedir. Bu farklılıklar, hayvancılık sektöründe sera gazı azaltım stratejilerinin tür bazında ele alınmasını zorunlu kılmakta; özellikle sığır yetiştiriciliğine yönelik yem stratejileri, barınak yönetimi ve biyogaz sistemlerinin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Metan gazı renksiz ve kokusuzdur, ayrıca havadan daha hafiftir; bu nedenle kapalı barınaklarda yukarı doğru birikir.

Özellikle gübre depolarında havalandırma yetersizse metan gazı zamanla tehlikeli seviyelere ulaşabilir. Gübrenin karıştırılması sırasında biriken gazın hızla ortama yayılması, kısa süre içinde yüksek metan düzeyleri oluşmasına neden olabilir. Metan zehirleyici bir gaz olmamakla birlikte, yüksek miktarlarda bulunduğu havadaki oksijeni azaltarak nefes darlığına ve boğulma tehlikesine yol açabilir. Bu tür durumlarda baş dönmesi, hızlı soluma ve bayılma gibi belirtiler görülebilir. Metanın güvenlik açısından en önemli özelliği yanıcı ve patlayıcı bir gaz olmasıdır. Havadaki oranı %5'e ulaştığında alt patlama sınırı (LEL), %15'e ulaştığında üst patlama sınırı (UEL) olarak kabul edilir. Bu aralıkta gaz karışımı çok hızlı şekilde ateş alabilir ve küçük bir kıvılcım bile ciddi bir patlamaya neden olabilir (EPA, 2023). Bu nedenle hayvan barınaklarında özellikle gübre depolarının yakınında elektrik tesisatının uygun olması, kıvılcım oluşturabilecek aletlerin dikkatle kullanılması ve havalandırmanın yeterli düzeyde tutulması hayati önem taşır.

Metanın çevresel etkileri de en az sağlık ve güvenlik etkileri kadar önemlidir. Metan, iklim değişikliğine yol açan gazlar arasında güçlü etkisiyle bilinir. Karbondioksitten daha kısa süre atmosferde kalmasına rağmen ısınmaya katkısı çok daha yüksektir. Hayvan yetiştiriciliği, özellikle de sığır yetiştiriciliği, küresel metan emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır (Mama & Seid, 2019). Gübrenin nasıl depolandığı ve yönetildiği, toplam metan miktarını doğrudan etkilemekte; örneğin kapalı depolama sistemleri veya biyogaz tesisleri metanın atmosfere yayılmasını azaltabilmektedir (Maurer & ark., 2017).

Genel olarak bakıldığında, hayvan barınaklarında metan oluşumu yalnızca bir çevre sorunu değil, aynı zamanda önemli bir iş güvenliği ve sağlık problemidir. Metan gazının barınaklarda oluşturduğu temel risk, toksik etkilerden ziyade yanıcılık ve patlama potansiyeline dayandığından, havalandırma bu gaz için bir konfor önlemi değil, güvenlik temelli bir risk azaltma aracı olarak ele

alınmalıdır. Aksi hâlde hem hayvanlar hem çalışanlar için ciddi riskler ortaya çıkabilmekte, ayrıca işletmenin çevresel etkileri de artmaktadır. Bu kapsamda, metan kontrolünde havalandırma; elektrik tesisatı güvenliği, kıvılcım kaynaklarının kontrolü ve biyogaz sistemleri gibi yapısal önlemlerle birlikte değerlendirilmesi gereken tamamlayıcı bir unsurdur.

Karbonmonoksit (CO)

Hayvan barınaklarında karbonmonoksit (CO), gübre parçalanmasından kaynaklanan biyolojik bir gaz değildir; buna rağmen özellikle kış aylarında ısıtma amacıyla kullanılan yakıt yakan cihazlar, motorlu ekipmanlar ve kapalı alanlarda çalışan traktör ya da jeneratörler nedeniyle önemli bir toksik gaz olarak değerlendirilir. CO, renksiz ve kokusuz olması nedeniyle fark edilmeden birikebilmekte ve yetersiz havalandırılan kapalı barınaklarda hızlı şekilde tehlikeli seviyelere ulaşabilmektedir (NIOSH, 2014). Saha çalışmalarında özellikle kanatlı işletmelerinde LPG veya dizel ısıtıcıların yanlış ayarlanması sonucu CO'nun 150–250 ppm seviyelerine çıktığı, bu düzeylerin hayvanlarda stres, hızlı solunum, yem tüketiminde azalma ve ani ölümlerle ilişkili olduğu bildirilmiştir. Benzer şekilde, buzağı barınaklarında motorlu ekipmanların kapalı ortamda çalıştırılması sırasında ölçülen CO seviyelerinin 300 ppm'i geçtiği ve çalışanlarda baş ağrısı, baş dönmesi ve dikkat kaybı gibi maruziyet belirtilerinin ortaya çıktığı rapor edilmiştir (Donham, 1993; Donham & Thelin, 2016).

Karbonmonoksitin toksik etkisinin temel nedeni oksijen taşıyıcı hemoglobin ile yüksek bağlanma eğilimidir; CO'nun hemoglobine bağlanma afinitesi oksijenden yaklaşık 200–250 kat daha yüksektir ve bu durum dokularda ciddi oksijen yetersizliği yaratır (Hastedt, 2015). (NIOSH, 2014) tarafından önerilen mesleki maruziyet sınır değeri 35 ppm iken, 200 ppm üzerindeki konsantrasyonların hızlı toksik etkiler oluşturabileceği ve 1200

ppm'in “hayatı ve sağığı hemen tehdit eden seviye (IDLH)” olarak kabul edildiğı belirtilmektedir (NIOSH, 2014). Hayvan barınaklarında CO, her ne kadar gübre kaynaklı olmasa da yanlış ısıtma sistemleri veya motorlu ekipman kullanımı nedeniyle hem insanlar hem de hayvanlar için ciddi akut zehirlenmelere yol açabileceğinden, gaz ölçüm cihazları, düzenli bakım ve etkili havalandırma sistemleriyle kontrol edilmesi gereken kritik bir risk faktörü olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç

Hayvan barınaklarında hava kalitesi, hayvan sağığı, refahı ve üretim performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamakta; aynı zamanda çalışan güvenliğı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, hayvan barınaklarında oluşan başlıca zararlı gazlar (NH₃, CO₂, H₂S, CH₄ ve CO) ile partikül maddelerin kaynakları, oluşum mekanizmaları, sınır değerleri ve hayvanlar ile çevre üzerindeki etkileri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Elde edilen bulgular ve literatür değerlendirmeleri, barınak içi hava kalitesinin yalnızca bir çevresel konfor parametresi değil, doğrudan üretim verimliliğı ve işletme güvenliğiyle ilişkili çok boyutlu bir konu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. İncelenen gazlar arasında özellikle amonyak ve hidrojen sülfürün, düşük konsantrasyonlarda dahi hayvanların solunum sistemi, bağışıklık yanıtı ve genel refahı üzerinde olumsuz etkilere yol açabildiğı; yüksek konsantrasyonlarda ise akut toksik etkiler ve ani ölümlerle sonuçlanabildiğı görülmektedir. Karbondioksit ve metan ise doğrudan toksik etkilerinden ziyade, kapalı barınaklarda oksijen oranını düşürerek asfiksi riskini artırmaları ve metan özelinde patlama–yangın tehlikesi oluşturmaları nedeniyle önem arz etmektedir. Karbonmonoksit ise biyolojik kökenli olmamakla birlikte, yanlış veya yetersiz havalandırılan ısıtma ve motorlu ekipman kullanımı sonucu hayvan barınaklarında ciddi akut zehirlenmelere yol açabilen kritik bir risk

faktörü olarak değerlendirilmelidir. Çevresel açıdan bakıldığında, hayvancılık kaynaklı emisyonların yalnızca barınak içi koşullarla sınırlı kalmadığı; atmosferik taşınım, çökeltme ve kimyasal dönüşümler yoluyla toprak, su ve bitki örtüsü üzerinde de önemli etkiler yarattığı görülmektedir. Özellikle amonyak ve buna bağlı azot bileşikleri, ötrofikasyon, toprak ve su asitlenmesi ile doğal bitki kompozisyonlarının değişmesi gibi bölgesel ve küresel ölçekte çevresel sorunlara katkıda bulunmaktadır. Metan emisyonları ise iklim değişikliği bağlamında hayvancılık sektörünün en önemli çevresel baskılarından birini oluşturmaktadır.

Bu değerlendirmeler ışığında, hayvan barınaklarında hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik önlemlerin yalnızca tek bir parametreye odaklanarak değil; barınak tasarımı, hayvan yoğunluğu, besleme stratejileri, gübre yönetimi ve havalandırma sistemlerinin birlikte ele alındığı bütüncül bir yönetim anlayışıyla planlanması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Etkili ve ihtiyaca göre ayarlanabilir havalandırma sistemlerinin kullanılması, düzenli gaz ölçümleri ve izleme uygulamaları, uygun gübre depolama ve işleme yöntemlerinin benimsenmesi ile çalışanlar için güvenli çalışma protokollerinin uygulanması hem hayvan refahının artırılması hem de çevresel yükün azaltılması açısından temel önlemler olarak öne çıkmaktadır.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, hayvan barınaklarında zararlı gazların kontrolü ve hava kalitesinin sürdürülebilir şekilde yönetimi; hayvansal üretimin ekonomik verimliliğini destekleyen, hayvan ve insan sağlığını koruyan ve çevresel etkileri en aza indirmeyi hedefleyen entegre bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu alanda yapılacak çalışmaların, uzun süreli saha ölçümleri ve uygulamaya dönük emisyon azaltım yaklaşımlarını içerecek biçimde geliştirilmesi hem bilimsel hem de pratik açıdan önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Alagöz, T., Kumova, Y., Atılgan, A. & Akyüz, A. (1996). Hayvancılık tesislerinde ortaya çıkan zararlı atıklar ve yarattığı çevre kirliliği üzerine bir araştırma. *Tarım-Çevre İlişkileri Sempozyumu "Doğal Kaynakların Sürdürülebilir Kullanımı"*, Mersin Üniv. Müh. Fak., Mersin, 441-448.
- Anderson, N., Strader, R. & Davidson, C. (2003). Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources. *Environment International*, 29(2-3), 277-286.
- Anonymous. (2008). Safety around manure gases and confined spaces. *Manure Gas Safety: Review of Practices and Recommendations for Wisconsin Livestock Farm*. Retrieved 01.11.2024, 2024, from <https://lplc.org/wp-content/uploads/2019/03/Section-5-Fact-Sheet-Manure-Gases.pdf>
- Arogo, J., Westerman, P. & Heber, A. (2003). A review of ammonia emissions from confined swine feeding operations. *Transactions of the ASAE*, 46(3), 805.
- Asman, W. A., Sutton, M. A. & Schjörting, J. K. (1998). Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition. *The New Phytologist*, 139(1), 27-48.
- Balaban, A. & Şen, E. (1988). Tarımsal Yapılar, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 845: Ankara.
- Beswick-Honn, J. M., Peters, T. M. & Anthony, T. R. (2017). Evaluation of low-cost hydrogen sulfide monitors for use in livestock production. *Journal of agricultural safety and health*, 23(4), 265-279.
- Bist, R. B., Subedi, S., Chai, L. & Yang, X. (2023). Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 328, 116919. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116919>
- Brglez, Š. (2021). Risk assessment of toxic hydrogen sulfide concentrations on swine farms. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127746>

- Burton, C. H. & Turner, C. (2003). *Manure management: Treatment strategies for sustainable agriculture*: Editions Quae.
- Caenegem, L. v. & Wechsler, B. (2000). Acclimatization in animal houses: data and calculation.
- Casey, K. D., Bicudo, J. R., Schmidt, D. R., Singh, A., Gay, S. W., Gates, R. S., Jacobson, L. D. & Hoff, S. J. (2006). Air quality and emissions from livestock and poultry production/waste management systems.
- Chan, Y. L., Zhu, M., Zhang, Z. Z., Liu, P. & Zhang, D. (2015). The effect of CO₂ dilution on the laminar burning velocity of premixed methane/air flames. *Energy Procedia*, 75, 3048-3053.
- CIGR. (1994). Aerial environment in animal housing. *International Commission on Agricultural Engineering (CIGR), Working Group Report Series No. 94.1*, 94(1), 114.
- Copeland, C. (2010). Air quality issues and animal agriculture: A primer. *Anim Agric Res Prog*, 1.
- Council, N. R. (2007). *Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and new world camelids*: National Academy Press.
- Donham, K. J. (1993). *Respiratory disease hazards to workers in livestock and poultry confinement structures*. Seminars in Respiratory Medicine.
- Donham, K. J. & Thelin, A. (2016). Agricultural respiratory diseases. *Agricultural Medicine. Rural Occupational and Environmental Health, Safety, and Prevention*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell Publishing, 95-154.
- Ellis, J., Kebreab, E., Odongo, N., McBride, B., Okine, E. & France, J. (2007). Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *Journal of dairy science*, 90(7), 3456-3466.
- Elwinger, K. & Svensson, L. (1996). Effect of dietary protein content, litter and drinker type on ammonia emission from broiler houses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(3), 197-208.
- EPA. (2023). Methane Emissions Reduction Program. *Health and safety guidelines*. U.S. Environmental Protection Agency, 1(1), 1-10.

- Ergül, M. (1989). Hayvansal üretim ve çevre kirliliği. *Yem Sanayi Derg.*, Sayı, 64, 20-25.
- Esmay, M. & Dixon, J. (1986). *Environmental control for agricultural buildings*. Westport, CT: AVI.
- Ferm, M. & Grennfelt, P. (1986). Atmosfaerisk transport och deposition av ammoniak. *Rapport-Naturvaardsverket (Sweden)*. No. 3188., 1(1), 64-88.
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*.
- Goodwin, R. (1985). Apparent reinfection of enzootic-pneumonia-free pig herds: search for possible causes. *The Veterinary Record*, 116(26), 690-694.
- Guarrasi, J., Trask, C. & Kirychuk, S. (2015). A systematic review of occupational exposure to hydrogen sulfide in livestock operations. *Journal of Agromedicine*, 20(2), 225-236.
- Hart, S. A. (1960). The Management of Livestock Manure. *Transactions of the ASAE*, 3(2), 0078-0080. doi: 10.13031/2013.41125
- Hart, S. A. (1963). Digestion tests of livestock wastes. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 748-757.
- Hastedt, M. (2015). RC Baselt (ed.): Disposition of toxic drugs and chemicals in man: Biomedical Publications, Seal Beach, California (USA), 2014, hardbound, ISBN: 978-0-9626523-9-4: Springer.
- Hellickson, M. A. & Walker, J. N. (1983). *Ventilation of agricultural structures* (1 ed.). St. Joseph, MI 49085, USA: ASAE.
- IPCC. (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. *Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Published: IGES, Japan*, 4(1), 1233.
- Johnson, K. A. & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73(8), 2483-2492.
- Karaman, S. (2006). Environmental pollutions caused by animal barns and solution possibilities. *Kahramanmaraş Sütcü Imam University Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 133-139.

- Karaman, S. & Gökalp, Z. (2017). Indoor air quality in animal housing systems (gas, odor and dust). *Current Trends in Natural Sciences Vol, 6*(12), 267-271.
- Kelley, K. W. (1985). Immunological Consequences of Changing Environmental Stimuli. In G. P. Moberg (Ed.), *Animal Stress* (pp. 193-223). New York, NY: Springer New York.
- Kılıç, İ. (2013). Hayvan barınaklarından kaynaklanan hava kirleticiler ile ilgili dünyadaki yasal düzenlemelerin incelenmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi, 8*(2), 111-120.
- Kılıç, İ. & Şimşek, E. (2009). Hayvan barınaklarından kaynaklanan gaz emisyonları ve çevresel etkileri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 14*(2).
- Kirkhorn, S. R. & Garry, V. F. (2000). Agricultural lung diseases. *Environmental health perspectives, 108*(Suppl 4), 705.
- Knapp, J. R., Laur, G., Vadas, P. A., Weiss, W. P. & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of dairy science, 97*(6), 3231-3261.
- Koerkamp, P. G. & Elzing, A. (1996). Degradation of nitrogenous components in and volatilization of ammonia from litter in aviary housing systems for laying hens. *Transactions of the ASAE, 39*(1), 211-218.
- Mama, A. & Seid, A. (2019). Review on methane emission from dairy farms and its impact on global warming. *Austin J Vet Sci & Anim Husb, 6*(1), 01-06.
- Maurer, D. L., Koziel, J. A. & Bruning, K. (2017). Field scale measurement of greenhouse gas emissions from land applied swine manure. *Frontiers of Environmental Science & Engineering, 11*(3), 1.
- Middlebrooks, E. J. (1974). Animal wastes management and characterization. *Water Research, 8*(10), 697-712.
- Miles, D., Rowe, D. & Owens, P. (2008). Winter broiler litter gases and nitrogen compounds: Temporal and spatial trends. *Atmospheric environment, 42*(14), 3351-3363.
- Mutaf, S. (2012). *Mühendislik yaklaşımı ile hayvan barınaklarında iklimsel çevre ve denetim ilkeleri* (1. ed. Vol. 1). Ankara

- (Türkiye): T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Eğitim Yayın ve Yayınlar Dairesi Başkanlığı.
- Nicholson, F., Chambers, B. & Walker, A. (2004). Ammonia emissions from broiler litter and laying hen manure management systems. *Biosystems engineering*, 89(2), 175-185.
- NIOSH. (2014). Hydrogen sulfide. IDLH Centers for Disease Control and Prevention. Retrieved 01.05.2025
- Nolan, J. (2007). *Nutrient requirements of domesticated ruminants*: CSIRO publishing.
- Odgers, E., Ramsden, J. & Schuelke, C. (2008). Manure Gas Safety Review of Practices and Recommendations for Wisconsin Livestock Farms. *Trade, and Consumer Protection*, 1(1), 1-10.
- Öztürk, H. H., Karaca, C. & Bozdoğan, A. M. (2020). *Çukurova Üniversitesi Balcalı Yerleşkesinde Enerji Üretimi İçin Yararlanılabilecek Hayvansal Biyokütle Atık Potansiyeli*. International Aegean Symposiums on Innovation Technologies & Engineering, Izmir, Türkiye.
- Ritz, C., Fairchild, B. & Lacy, M. (2004). Implications of ammonia production and emissions from commercial poultry facilities: A review. *Journal of Applied Poultry Research*, 13(4), 684-692.
- Roadman, M., Scudlark, J., Meisinger, J. & Ullman, W. (2003). Validation of Ogawa passive samplers for the determination of gaseous ammonia concentrations in agricultural settings. *Atmospheric environment*, 37(17), 2317-2325.
- Rom, H. (1993). Ammonia emission from livestock buildings in Denmark.
- Yağanoğlu, A. (1987). Kümeslerde Zararlı Gazlar Koku ve Toz Oluşumu, Zararlı Etkileri ve Giderilme Yolları. *Tavukçuluk Derg.*, Ankara Tavukçuluk Araştırma Enstitüsü Sayı, 158, 8-15.

BÖLÜM 4

Basınçlı Sulama Sistemlerinde Hidrolik Tasarım Hataları ve Sulama Üniformitesinin Ürün Verimliliğine Etkisi

**EZGİ KURTULMUŞ¹
UMUT MUCAN²**

Giriş

Su kaynaklarının küresel ölçekte azalması ve iklim değişikliğinin etkilerinin giderek artması, tarımsal üretimde suyun etkin ve planlı kullanımını zorunlu kılmaktadır (Pereira ve ark., 2002). Özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde sulama, yalnızca verimi artıran bir girdi değil, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini belirleyen temel unsurlardan biridir. Bu bağlamda basınçlı sulama sistemleri, suyun bitki kök bölgesine kontrollü ve zamansal olarak dengeli bir biçimde uygulanmasına olanak tanınması nedeniyle modern tarım uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Phocaidis, 2007).

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Karacabey Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Orcid: 0000-0003-2535-2566

² Araş.Gör.Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Orcid: 0000-0002-7126-9774

Basınçlı sulama sistemlerinin teorik üstünlüklerine karşın, uygulamada bu sistemlerin önemli bir bölümünün beklenen performansı sağlayamadığı görülmektedir. Bunun temel nedenleri arasında, hidrolik tasarım ilkelerine yeterince uyulmaması, proje aşamasında yapılan kabuller ve sistemin işletme koşullarının tasarımıyla uyumlu olmaması yer almaktadır. Hidrolik açıdan yetersiz tasarlanmış sistemler, sulama üniformitesini düşürerek tarla içinde suyun eşit dağılmamasına neden olmakta; bu durum bitki gelişiminde heterojenliğe ve verim kayıplarına yol açmaktadır (Lamaddalena ve Sagardoy, 2000; Wu ve Barragan, 2000).

Bu bölümde, basınçlı sulama sistemlerinde sık karşılaşılan hidrolik tasarım hataları ele alınmakta ve bu hataların sulama üniformitesi ile tarımsal üretim üzerindeki etkileri bu konularda yapılan araştırmalarla tartışılmaktadır.

Basınçlı Sulama Sistemlerinde Hidrolik Tasarımın Temel İlkeleri

Basınçlı sulama sistemlerinde hidrolik tasarımın temel amacı, suyun sulama alanına istenen debi ve basınç koşullarında, kabul edilebilir kayıplar içerisinde ve bitkinin su gereksinimini karşılayacak şekilde ulaştırılmasını sağlamaktır. Bu çerçevede tasarım süreci; su kaynağının özellikleri, sulama yöntemi, topografik koşullar ve işletme özellikleri birlikte değerlendirilerek yürütülmelidir. Hidrolik açıdan yetersiz tasarlanan sistemlerde basınç kayıpları artmakta, sulama suyu bitkilere homojen biçimde ulaştırılamamakta ve sistem performansı önemli ölçüde düşmektedir (Wu ve Barragan, 2000; Evans ve ark., 2007).

Basınçlı sulama sistemlerinde hidrolik tasarımın ilk adımı, bitkinin su gereksiniminin doğru belirlenmesidir. Bitki su tüketimi, iklim koşulları, bitki türü ve gelişme dönemi gibi etmenlere bağlı olarak değişmekte olup, sulama sistemi bu gereksinimi karşılayacak şekilde planlanmalıdır. Bitki su gereksiniminin olduğundan düşük ya

da yüksek hesaplanması, sistemde hem hidrolik dengesizliklere hem de sulama uygulamalarında verim kayıplarına yol açmaktadır (Pereira ve ark., 2002).

Hidrolik tasarımın temel bileşenlerinden biri de, boru çaplarının ve hat uzunluklarının doğru belirlenmesidir. Ana boru, lateral ve manifold hatlarında meydana gelen sürtünme kayıpları, sistemin toplam basınç gereksinimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle boru çapları belirlenirken yalnızca ilk yatırım maliyeti değil, uzun dönemli işletme koşulları da dikkate alınmalıdır. Özellikle basınçlı sulama sistemlerinde, boru çapının küçültülmesiyle sağlanan maliyet avantajı, artan enerji tüketimi ve performans kayıpları nedeniyle kısa sürede ortadan kalkabilmektedir (Clemmens ve Burt, 1997; Lamaddalena ve Sagardoy, 2000).

Basınçlı sulama sistemlerinin hidrolik tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer temel ilke, işletme basıncının sulama elemanlarının teknik özellikleriyle uyumlu olmasıdır. Damlaticı, yağmurlama başlığı veya mikro sulama elemanlarının çalışma basınçları dışına çıkılması, suyun bitki kök bölgesine uygun olmayan şekilde uygulanmasına neden olmaktadır. Bu durum, bir yandan suyun etkin kullanımını sınırlandırırken diğer yandan bitki gelişimi ve verim üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Yapılan çalışmalar, uygun basınç koşullarında işletilen sistemlerin hem su kullanım etkinliğini hem de verim istikrarını artırdığını ortaya koymaktadır (Nakayama ve Bucks, 1991; Playán ve Mateos, 2006).

Basınçlı sulama sistemlerinin başarısı, büyük ölçüde hidrolik tasarımın doğru kurgulanmasına bağlıdır. Hidrolik tasarım; suyun kaynaktan alınmasından bitki kök bölgesine ulaştırılmasına kadar geçen süreçte, basınç, debi ve enerji kayıplarının dengeli bir biçimde yönetilmesini amaçlar. Bu çerçevede tasarım süreci yalnızca boru çaplarının belirlenmesi ya da pompa seçimiyle sınırlı olmayıp,

sistemin tüm bileşenlerinin birlikte ve uyum içinde çalışmasını gerektirir (Phocaides, 2007; Howell, 2003).

Basınçlı sulama sistemlerinde işletme basıncının doğru aralıkta tutulması, hidrolik tasarımın temel ilkelerinden biridir. Çalışma basıncının önerilen sınırların altına düşmesi, sulama elemanlarının beklenen debide çalışmamasına neden olurken; aşırı yüksek basınçlar ise hem enerji tüketimini artırmakta hem de sistem bileşenlerinde mekanik hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle tasarım aşamasında pompa seçimi, basınç düzenleyiciler ve kontrol vanaları birlikte değerlendirilmelidir (Evans ve ark., 2007).

Hidrolik tasarımın bir diğer önemli boyutu, sulama suyunun tarla yüzeyine ve kök bölgesine uygun biçimde dağıtılmasını sağlayacak sulama elemanlarının seçimidir. Yağmurlama başlıkları veya damlaticıların debi-basınç ilişkileri, sistemin genel hidrolik yapısıyla uyumlu olmalıdır. Tasarımla uyumsuz eleman seçimi, aynı parsel içinde farklı su uygulamalarına ve bitki gelişiminde düzensizliklere neden olmaktadır (Abdelraouf ve ark., 2020).

Basınçlı sulama sistemlerinde hidrolik tasarımın yalnızca proje aşamasında değil, işletme ve bakım sürecinde de dikkate alınması gerekmektedir. Zamanla oluşan tıkanmalar, boru iç yüzeyindeki pürüzlülük artışı ve sistem bileşenlerindeki yıpranmalar, başlangıçta doğru tasarlanmış bir sistemin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle hidrolik tasarım ilkeleri, düzenli bakım ve izleme çalışmalarıyla desteklenmelidir (Nakayama ve Bucks, 1991; Howell, 2003).

Hidrolik Tasarım Hataları ve Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar

Basınçlı sulama sistemlerinde hidrolik tasarım aşamasında yapılan hatalar, çoğu zaman sistemin kurulmasından sonra fark edilmekte ve bu durum geri dönüşü zor sorunlara yol açmaktadır. Özellikle proje aşamasında yapılan varsayımların arazi koşullarıyla

örtüşmemesi, sistem performansında düşüşe neden olmaktadır. Literatürde, tasarım hatalarının büyük bölümünün arazi eğimi, su kaynağı değişkenliği ve işletme koşullarının yeterince dikkate alınmamasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Playán ve Mateos, 2006).

Uygulamada sık karşılaşılan hidrolik tasarım hatalarından biri, izin verilebilir basınç kaybı sınırlarının aşılmasıdır. Özellikle uzun lateral hatlarda veya yüksek debili sistemlerde, toplam basınç kaybının önerilen sınırların üzerine çıkması, sulama suyunun tarla genelinde dengesiz bir şekilde uygulanmasına neden olmaktadır. Bu durum, bitkilerin bazı bölgelerde yetersiz, bazı bölgelerde ise aşırı suya maruz kalmasına yol açmakta ve tarımsal üretimde parsel içi farklılıkları artırmaktadır (Clemmens ve Solomon, 1997; Burt, 2004).

Bir diğer önemli tasarım sorunu, arazi eğiminin hidrolik hesaplamalara yeterince yansıtılmamasıdır. Eğimli arazilerde basınç dağılımı doğrusal bir yapı göstermemekte, kot farklarına bağlı olarak önemli basınç değişimleri ortaya çıkmaktadır. Eğim etkisinin göz ardı edilmesi, özellikle damla sulama sistemlerinde hat sonlarında ciddi su uygulama sorunlarına neden olmaktadır. Bu tür hataların, sahada yapılan performans değerlendirmelerinde en sık rastlanan problemler arasında yer aldığı bildirilmektedir (Lamaddalena ve Sagardoy, 2000; Frank ve ark., 2013).

Basınçlı sulama sistemlerinde uygulamada karşılaşılan sorunlardan biri de, projede öngörülen işletme koşulları ile fiili işletme koşulları arasındaki farklardır. Çiftçi uygulamalarında vana ayarlarının değiştirilmesi, aynı anda birden fazla parselin sulanması veya sulama süresinin tasarımdan farklı uygulanması, sistemin hidrolik dengesini bozabilmektedir. Bu durum, tasarımda doğru kabul edilen birçok parametrenin sahada geçerliliğini yitirmesine neden olmaktadır (Clemmens ve Burt, 1997; Pereira ve ark., 2009).

Hidrolik tasarım hatalarının uygulamadaki etkileri, yalnızca su dağılımıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda enerji tüketimi ve işletme maliyetlerini de doğrudan etkilemektedir. Tasarımla uyumsuz çalışan sistemlerde pompa çalışma süreleri uzamakta ve birim alan başına düşen enerji tüketimi artmaktadır. Yapılan çalışmalarda, uygun hidrolik tasarım ilkelerine göre projelendirilmiş sistemlerin hem su hem de enerji kullanımında belirgin üstünlük sağladığı ortaya konmuştur (Rodríguez Díaz ve ark., 2007).

Sulama Üniformitesi Kavramı ve Değerlendirme Ölçütleri

Sulama üniformitesi, basınçlı sulama sistemlerinde uygulanan suyun tarla yüzeyi veya bitki kök bölgesi boyunca ne derece dengeli dağıtıldığını ifade eden temel bir kavramdır. Üniformite, sulama suyunun bitkilere eşit koşullarda ulaştırılmasını amaçlayan hidrolik tasarım ve işletme yaklaşımlarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yönüyle üniformite, yalnızca teknik bir gösterge değil, aynı zamanda tarımsal üretimde verim ve kaliteyi doğrudan etkileyen bir ölçüttür (Christiansen, 1942; El-Nemr, 2010; Kumar ve ark.,2017).

Basınçlı sulama sistemlerinde üniformite kavramı, genellikle sulama suyunun alansal dağılımı üzerinden değerlendirilmektedir. Sulama sırasında bazı bölgelerin yeterli, bazı bölgelerin ise yetersiz su alması, bitki gelişiminde parsel içi farklılıklara neden olmakta ve bu durum verim kayıplarını beraberinde getirmektedir. Literatürde, üniformitenin düşük olduğu alanlarda bitkilerin su stresine daha açık hâle geldiği ve gübre uygulamalarının etkinliğinin azaldığı vurgulanmaktadır. Sulama üniformitesinin değerlendirilmesinde kullanılan en yaygın ölçütlerden biri, Christiansen Üniformite Katsayısı'dır. Bu katsayı, sulama sırasında ölçülen su miktarlarının ortalama değerden sapmalarını esas alarak, dağılımın ne ölçüde dengeli olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yağmurlama sulama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bu ölçüt, sistem

performansının sahada hızlı bir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Christiansen, 1942; Burt ve ark., 2001).

Damla sulama ve mikro sulama sistemlerinde ise değerlendirme daha çok dağıtım üniformitesi ve salım üniformitesi gibi ölçütler üzerinden yapılmaktadır. Bu ölçütler, özellikle lateral hatlar boyunca meydana gelen basınç değişimlerinin ve damlatıcı özelliklerinin sulama suyunun dağılımı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmalarda, damla sulama sistemlerinde kabul edilebilir bir üniformite düzeyinin sağlanmasının, bitki su tüketiminin karşılanmasında kritik bir rol oynadığı belirtilmektedir (Barragan ve ark., 2006; Frank ve ark., 2013).

Sulama üniformitesinin değerlendirilmesinde yalnızca sayısal katsayılarla odaklanmak, uygulamada bazı yanlış yorumlara yol açabilmektedir. Üniformite değerleri, sistemin tasarım özellikleri, işletme koşulları ve bakım durumu birlikte dikkate alınarak yorumlanmalıdır. Özellikle saha ölçümleri sırasında elde edilen değerlerin, sulama süresi, rüzgâr etkisi ve basınç dalgalanmaları gibi dış etmenlerden etkilendiği unutulmamalıdır. Bu nedenle üniformite değerlendirmesi, tek bir ölçüm yerine tekrarlı gözlemlerle desteklenmelidir (Clemmens ve Solomon, 1997; Burt, 2004).

Sonuç olarak, sulama üniformitesi kavramı basınçlı sulama sistemlerinin performansını değerlendirmede vazgeçilmez bir araç olmakla birlikte, bu kavramın doğru anlaşılması ve yorumlanması büyük önem taşımaktadır. Üniformite ölçütleri, sistem tasarımı ve işletmesinin iyileştirilmesine yönelik birer rehber olarak ele alınmalı; tarla koşulları ve bitki gereksinimleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım, sulama uygulamalarında hem su kullanımının etkinliğini artırmakta hem de sürdürülebilir tarımsal üretime katkı sağlamaktadır (Pereira ve ark., 2009).

Hidrolik Tasarım Hatalarının Bitki Gelişimi ve Verim Üzerine Etkileri

Basınçlı sulama sistemlerinde hidrolik tasarım hataları, bitki gelişimi ve verim üzerinde doğrudan ve dolaylı etkilere sahip olup, bu etkiler çoğu zaman üretim sürecinin ilerleyen aşamalarında belirgin hâle gelmektedir. Sulama suyunun tarla genelinde dengesiz uygulanması, bitkilerin kök bölgesinde farklı nem koşullarının oluşmasına yol açmakta ve bu durum bitkiler arasında gelişme ve verim bakımından belirgin farklılıklar yaratmaktadır. Güncel çalışmalarda, sulama suyunun dağılımındaki küçük farklılıkların dahi bitki gelişimini ve verimi önemli ölçüde etkileyebildiği ortaya konmuştur (Rodríguez Díaz ve ark., 2007; Pereira ve ark., 2009).

Hidrolik tasarım hatalarına bağlı olarak ortaya çıkan yetersiz veya aşırı sulama koşulları, bitkilerde farklı düzeylerde su stresine neden olmaktadır. Özellikle büyümenin kritik dönemlerinde yaşanan su stresi, fotosentez etkinliğini sınırlamakta, bitki gelişme süresini kısaltmakta ve nihai verimde düşüşlere yol açmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, sulama suyunun düzensiz uygulanmasının bitki fizyolojisi üzerindeki etkilerinin, yalnızca su miktarıyla değil, uygulamanın zamansal ve alansal dağılımıyla da yakından ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Feres ve Soriano, 2007; Hassan ve ark., 2021).

Hidrolik tasarım hatalarının bitki beslenmesi üzerindeki etkileri, özellikle damla sulama sistemlerinde daha belirgin hâle gelmektedir. Sulama suyunun kök bölgesine eşit ulaşmaması, besin maddelerinin taşınımını ve kök bölgesindeki dağılımını doğrudan etkilemektedir. Güncel araştırmalar, su ve besin maddelerinin birlikte uygulandığı sistemlerde hidrolik dengesizliklerin, bitki beslenme durumunda önemli farklılıklara yol açtığını ve bu durumun verim ile ürün kalitesini olumsuz etkilediğini göstermektedir (Mansour, 2015).

Bitki gelişimindeki düzensizlikler, hasat döneminde yalnızca toplam verim kaybı olarak değil, ürün kalitesinde ve pazarlanabilirlikte dalgalanmalar şeklinde de kendini göstermektedir. Sulama suyunun dengeli uygulanmadığı parsellerde ürün iriliği, olgunlaşma zamanı ve kalite sınıfları arasında belirgin farklılıklar oluşmaktadır. Son yıllarda yapılan saha çalışmalarında, hidrolik açıdan iyi tasarlanmış sulama sistemlerinin, ürün kalitesinde daha istikrarlı sonuçlar sağladığı bildirilmektedir (Feres ve Soriano, 2007; Ünlü ve ark.,2011).

Sonuç olarak, hidrolik tasarım hatalarının bitki gelişimi ve verim üzerindeki etkileri, kısa vadeli verim kayıplarının ötesinde, üretim sisteminin bütününe etkileyen bir sorun alanı olarak ele alınmalıdır. Çalışmalar, doğru hidrolik tasarım ilkelerine göre planlanan ve işletilen sulama sistemlerinin, hem verim istikrarını artırdığını hem de kaynak kullanımında önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle hidrolik tasarım, yalnızca mühendislik hesaplarının değil, bitki ve toprak süreçlerinin de birlikte değerlendirildiği bütüncül bir yaklaşım çerçevesinde ele alınmalıdır (Playán ve Mateos, 2006; Rodríguez Díaz ve ark., 2007).

Sonuç

Basınçlı sulama sistemlerinde hidrolik tasarım, sulama suyunun kaynaktan bitki kök bölgesine kadar olan yolculuğunda karşılaşılan tüm fiziksel süreçleri kapsayan temel bir mühendislik aşamasıdır. Bu süreçte yapılan tasarım tercihleri, yalnızca sistemin teknik işleyişini değil, aynı zamanda bitki gelişimini, verim düzeyini ve kaynak kullanım etkinliğini de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle hidrolik tasarım, tarımsal üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir bileşen olarak ele alınmalıdır.

Bu kitap bölümünde ele alınan bulgular, hidrolik tasarım hatalarının sulama suyunun tarla genelindeki dağılımını olumsuz etkilediğini ve bu durumun bitkiler arasında gelişme ve verim

farklılıklarına yol açtığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle boru çapı seçimi, arazi eğiminin dikkate alınması, işletme basıncının doğru belirlenmesi ve sulama elemanlarının sistemle uyumu gibi konular, hidrolik tasarımın başarısını belirleyen temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Literatürlerde de vurgulandığı üzere, bu unsurların göz ardı edilmesi, sulama suyunun etkin kullanımını sınırlandırmakta ve üretim sürecinde önemli kayıplara neden olmaktadır.

Sulama üniformitesi ve buna bağlı değerlendirme ölçütleri, basınçlı sulama sistemlerinin performansının ortaya konulmasında önemli bir araç sunmaktadır. Ancak bu ölçütlerin tek başına yeterli olmadığı, arazi koşulları, işletme alışkanlıkları ve bakım durumu ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir.

Arazi uygulamaları ve performans değerlendirmeleri, hidrolik tasarımın doğruluğunu sınamak ve uygulamada ortaya çıkan sorunları belirlemek açısından vazgeçilmezdir. Arazi koşullarında yapılan ölçümler, tasarım aşamasında öngörülen hidrolik davranış ile gerçek işletme koşulları arasındaki farkları ortaya koymakta ve sistemin iyileştirilmesine yönelik somut veriler sunmaktadır. Güncel çalışmalar, düzenli performans değerlendirmelerinin sulama sistemlerinin uzun vadeli başarısında önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, basınçlı sulama sistemlerinde hidrolik tasarım; mühendislik hesapları, bitki su gereksinimleri ve arazi koşullarının birlikte ele alındığı çok boyutlu bir süreçtir. Bu sürecin başarısı, yalnızca teknik yeterlilikle değil, aynı zamanda uygulama ve işletme koşullarının doğru yönetilmesiyle mümkündür. Hidrolik tasarım ilkelerine uygun olarak planlanan, arazi koşullarında düzenli olarak değerlendirilen ve bakım çalışmalarıyla desteklenen sulama sistemleri, hem su ve enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlamakta hem de tarımsal üretimde verim ve kaliteyi artırmaktadır. Bu nedenle hidrolik tasarım, basınçlı sulama sistemlerinin

başarısında belirleyici bir unsur olarak ele alınmalı ve tarımsal üretim planlamasının ayrılmaz bir parçası hâline getirilmelidir.

Kaynaklar

Abdelraouf, R. E., El-Shawadfy, M. A., Ghoname, A. A. ve Ragab, R. (2020). Improving crop production and water productivity using a new field drip irrigation design. *Plant Archives*, 20(1), 3553–3564.

Barragan, J., Bralts, V. ve Wu, I. P. (2006). Assessment of emission uniformity for micro-irrigation design. *Biosystems Engineering*, 93(1), 89–97.

Burt, C. M. (2004). Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity. *Irrigation and Drainage Systems*, 18(4), 275–297.

Burt, C. M., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., Solomon, K. H., Bliesner, R. D., Hardy, L. A. ve Eisenhauer, D. E. (1997). Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 423–442.

Christiansen, J. E. (1942). *Irrigation by sprinkling*. University of California Agricultural Experiment Station Bulletin No. 670.

Clemmens, A. J. ve Burt, C. M. (1997). Accuracy of irrigation efficiency estimates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 443–453.

Clemmens, A. J. ve Solomon, K. H. (1997). Estimation of global irrigation distribution uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 454–461.

El-Nemr, M. K. (2010). Effect of operating pressure variation on uniformity parameters and its impact on crop productivity and

power requirements of trickle irrigation. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 27(4), 1757–1770.

Evans, R. G., Wu, I. P. ve Smajstrla, A. G. (2007). Microirrigation systems. İçinde G. J. Hoffman, R. G.

M. E. Jensen, D. L. Martin ve R. L. Elliott (Ed.), *Design and operation of farm irrigation systems* (2. baskı, ss. 632–683). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Fereres, E. ve Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159.

Frank, K., Gravestock, N., Spearpoint, M. ve Fleischmann, C. (2013). A review of sprinkler system effectiveness studies. *Fire Science Reviews*, 2(1), 6.

Hassan, D. F., Ati, A. S. ve Neima, A. S. (2021). Effect of irrigation uniformity and efficiency on water consumption and yield of maize using different irrigation and cultivation methods. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 17(1), 1441–1450.

Howell, T. A. (2003). Irrigation efficiency. İçinde *Encyclopedia of Water Science* (ss. 467–500). Marcel Dekker.

Kumar, M., Kumar, R., Rajput, T. B. S. ve Patel, N. (2017). Efficient design of drip irrigation system using water and fertilizer application uniformity at different operating pressures in a semi-arid region of India. *Irrigation and Drainage*, 66(3), 316–326.

Lamaddalena, N. ve Sagardoy, J. A. (2000). *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems*. FAO Irrigation and Drainage Paper.

Mansour, H. A. A. (2015). Design considerations for closed circuit design of drip irrigation system. İçinde *Closed circuit trickle irrigation design: Theory and applications* (ss. 61–133). Springer.

Nakayama, F. S. ve Bucks, D. A. (1991). Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*, 12(4), 187–192.

Pereira, L. S., Cordery, I. ve Iacovides, I. (2009). *Coping with water scarcity: Addressing the challenges*. Springer.

Pereira, L. S., Oweis, T. ve Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175–206.

Phocaides, A. (2007). *Handbook on pressurized irrigation techniques*. FAO.

Playán, E. ve Mateos, L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 100–116.

Rodríguez-Díaz, J. A., Camacho-Poyato, E. ve López-Luque, R. (2007). Model to forecast maximum flows in on-demand irrigation distribution networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(3), 222–231.

Ünlü, M., Kanber, R., Koç, D. L., Tekin, S. ve Kapur, B. (2011). Effects of deficit irrigation on the yield and yield components of drip irrigated cotton in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 98(4), 597–605.

Wu, I. P. ve Barragan, J. (2000). Design criteria for microirrigation systems. *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1145–1154.

BÖLÜM 5

KANATLI YETİŞTİRİCİLİĞİNDE GELENEKSEL YÖNTEMLERLE CİNSİYET BELİRLENMESİNE YÖNELİK GENEL BAKIŞ

PROF. DR. ÇAĞRI ÖZGÜR ÖZKAN¹

Giriş

Kanatlı hayvan yetiştiriciliğinde, cinsiyet tayini, üretim sürecinin verimliliği ve ekonomik kazancı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Tarihte, kuşların cinsiyetlerini ayırt etmek için geliştirilmiş olan geleneksel yöntemler, gözlem ve uygulamalara dayalı çeşitli yaklaşımlardır. Bu yöntemler arasında, tüylerin rengi, fiziksel boyut farklılıkları, gagaların şekli ve davranışsal özellikler belirleyici unsurları içermektedir. Modern teknolojinin sağladığı yeniliklere rağmen, düşük maliyetleri nedeniyle özellikle küçük ölçekli işletmelerde geleneksel yöntemler sıkça tercih edilmektedir. Pratik uygulanabilirlikleri ve eğitim gerektirmemeleri, bu yaklaşımları cazip kılmaktadır. Ancak, cinsiyet tayininde sağlanan doğruluk oranları, özellikle genç bireylerde ve cinsiyet karışıklıklarının yaygın olduğu durumlarda değişkenlik

¹ Prof. Dr. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, GMYO, Bitkisel ve Hayvansal üretim Bölümü, Orcid: 0000-0003-1752-8293

gösterebilmektedir. Geleneksel yöntemlerin etkinliği, aynı zamanda deneyim ve gözlem yeteneğine bağlı olup, yetiştiricilerin bilgi birikimleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, bu yöntemlerin başarı oranları, yetiştiricinin uzmanlığına ve koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Nihayetinde, geleneksel yöntemler, ekonomik ve pratik avantajları dolayısıyla yaygın bir şekilde kullanılmakta olsa da, cinsiyet belirlemedeki kesinliği artırmak için modern teknolojilerle bir arada kullanılması, sürdürülebilir ve verimli üretim açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmelidir (Houchen & ark., 2024; Mishra & ark., 2023; Okuno & ark., 2020; Goger, 2017; Çakmak & ark., 2017).

Kanatlı Hayvanların yetiştiriciliğinde cinsiyet belirlemenin önemi

Kanatlı hayvanların yetiştiriciliğinde cinsiyet tayinin belirlemenin önemine dair temel unsurlar, üretim süreçlerinin verimliliği ve ekonomik etkileri çerçevesinde ele alınmıştır. Erkek ve dişi bireylerin farklı özellikleri, üretim potansiyellerini etkileyen önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmakta ve bu durum, cinsiyet ayrımının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Geleneksel cinsiyet belirleme yöntemleri, çoğunlukla gözlemsel ve fizyolojik analizlere dayanmaktadır. Bu nedenle pratik, uygulaması kolay teknikler içermektedir. Bu yöntemler aracılığıyla, bireylerin postürleri, tüy yapıları ve boyut farklılıkları gibi fiziksel özellikler değerlendirilerek cinsiyet tahmini yapılabilmektedir. Ayrıca, civcivlerde gözlemlenebilen preler, kemik yapısı ve davranışsal kalıplar, cinsiyet tayininde kullanışlı kriterler olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel yaklaşımlar, maliyet açısından avantajlar sunmakta ve hızlı sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ancak, bu yöntemlerin doğruluk oranı bireysel farklılıklar nedeniyle değişkenlik göstermekte ve yanlış tayinler, üretim kayıplarına neden olabilmektedir. Geleneksel yöntemler küçük ölçekli ve maliyet açısından uygun işletmelerde tercih edilse

de, kesin sonuçların alınmasında bazı sınırlılıklar barındırmaktadır. Bu durum, özellikle büyük ölçekli üretimlerde modern teknolojilerin entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır. Nihai olarak, geleneksel yöntemler küçük ölçekli işletmelere pratiklik ve düşük maliyet avantajı sağlarken, doğruluk ve güvenilirlik bakımından modern yöntemlerle kıyaslandığında kısıtlı kalmaktadır. Böylece, geleneksel cinsiyet belirleme teknikleri, modern yöntemlerle desteklenerek üretim süreçlerinin optimize edilmesine katkıda bulunma potansiyeli taşımaktadır (Özer & ark.,1994; Jourdan, 2008; Göçer , 2017; Uysal, 1989; Warren & Payne, 1945; Gürel, 2003; Aksoy, 1999; Abaylı, 2018; Yıldırım, 2015).

Ekonomik ve Üretimsel Etkiler

Geleneksel yöntemlerin uygulama kolaylığı, gözleme dayalı pratik süreçlere dayandığı için yüksek maliyetler veya gelişmiş teknolojik altyapı gerektirmemektedir. Ancak, bu yöntemlerin sağladığı doğruluk oranlarının genellikle tatmin edici seviyelerin altında kalması, üretim süreçlerinde ciddi hatalara ve veri kayıplarına yol açabilmektedir. Cinsiyet tayininde mevcut hata payının yüksekliği, yanıtlanan ürünler veya tayfalar arasındaki dengesizliğe sebep olarak, erkek ve dişi üretim dengelerinin sağlanmasını güçleştirmekte ve bu durum maliyet artışlarıyla sonuçlanmaktadır. Üstelik, erken aşamalarda yapılan cinsiyet tayini hataları, genetik ve biyolojik farklılıkların tam olarak kavranmamasından kaynaklanarak, genetik verimlilik ve üretim performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durum, üreticiler için ekonomik kayıplar doğurmanın yanı sıra, piyasa koşullarında da dengesizliklere sebep olabilmektedir. Geleneksel yöntemlerin kullanımı, genellikle küçük ölçekli işletmelerde ve sınırlı yatırım seviyeleriyle kısıtlı kalırken, büyük ölçekli üreticiler tarafından güvenilirlik açısından tercih edilmemektedir. Bu bağlamda, cinsiyet belirlemede etkinliğin artırılması ve doğruluk oranlarının yükseltilmesi amacıyla modern tekniklerle entegrasyon ve

geliştirmeler büyük önem arz etmektedir. Böylece, hem ekonomik verimlilik hem de üretim kalitesi artırılabilir. Geleneksel yöntemlerin korunması elzem olmakla birlikte, ekonomik ve üretimsel sürdürülebilirliğı sağlamak amacıyla teknolojik gelişmelerle desteklenmeleri kaçınılmaz bir hal almıştır (Aksoy, 1999; Sabuncuoğlu, 2020; Yıldırım, 2015; Tutar & ark., 2025; Çeltikli, 2023; Goger, 2017).

Geleneksel Yöntemlere Genel Bakış

Cinsiyet tespiti, kanatlı hayvanların dış görünüş özellikleri, davranış biçimleri ve belirli fiziksel farklılıklar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Erkek ve dişi hayvanların boyut, tüy yapısı ve hareketlilik gibi belirgin özellikler açısından farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu yaklaşımlar, çiftliklerde hızlı ve pratik sonuçlar elde edilmesini mümkün kılacak şekilde geliştirilmiş olup, eğitimli uzmanlar tarafından kolaylıkla uygulanabilmektedir. Geleneksel yöntemlerin önemli bir avantajı, maliyet açısından uygun olmaları ve herhangi bir teknolojik altyapı gerektirmemeleridir. Dolayısıyla, bu yöntemler, sürdürülebilir tarım uygulamaları çerçevesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun yanında, gözlemlere dayanan bu cinsiyet belirleme yöntemleri, çiftlik yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, geleneksel cinsiyet belirleme yöntemlerinin, uygulama kolaylığı ve maliyet etkinliği açısından belirgin faydalar sağladığı anlaşılmaktadır. Özellikle gözlem sırasında uygulayıcının sahip olduğu tecrübe ve gözlem yeteneğı, elde edilen verilerin doğruluğı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yavru hayvanların değerlendirilmesi esnasında, cinsiyetin net olarak belirlenemediğı erken dönemlerde yapılan gözlemlerin güvenilirliğı tartışmalıdır. Ayrıca, benzer morfolojik özelliklere sahip farklı türlerin veya genetik varyasyonların varlığı, hatalı cinsiyet belirleme olasılığını artırabilir. Bu durum, tarımsal üretimde ciddi ekonomik kayıplara ve planlama eksikliklerine neden olabilmektedir. Geleneksel gözlem

yöntemleri, yenilikçi teknolojik gelişmelere karşı duyarsız kalabilmekte ve standartlaştırılmış protokollerden uzaklaşabilmektedir. Nihayetinde, geleneksel gözlem yöntemleri, düşük maliyet ve uygulanabilirlik açısından avantajlar sunsa da, doğruluk ve güvenilirlik bakımından birtakım kısıtlamalar barındırmaktadır; bu nedenle, modern teknolojilerle entegrasyonu sağlanarak kullanılmaları önerilmektedir (Aksoy, 1999; Jourdan, 2008; Göçer 2017; Uysal, 1989; Goger, 2017; Sabuncuoğlu, 2020; Yıldırım, 2015; Tutar & ark., 2025; Çeltikli, 2023).

Kanatlılarda Cinsiyet Belirlemenin Biyolojik Temelleri

Kanatlıların beslenmesi, karmaşık bir besin etkileşimi ve metabolik süreçler bütünü çerçevesinde şekillenir. Bu bağlamda, yemlerin besin değerleri ve sindirilebilirlik oranları, rasyonların etkinliğini belirleyen temel unsurlar arasında yer alır. Özellikle protein, enerji ve lif içeriği, kanatlıların performansını direkt olarak etkileyen faktörlerdir. Yapılan araştırmalar, farklı yem kaynaklarının sindirim sistemindeki etkilerini ve besin maddelerinin emilim oranlarını inceleyerek, bu süreçlerin nasıl optimize edilebileceğini göstermektedir. Besin maddelerinin fermentasyonu, sindirimde kritik bir rol oynar ve bu süreçte açığa çıkan metaloitlerin, hayvanların genel sağlık durumu üzerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır. Özellikle, yüksek enerji içeriğine sahip yemlerin kullanımı, büyüme ve gelişim süreçlerini hızlandırır. Bunun yanı sıra, besinlerin kalitesi ve bileşimi, hayvanların üretkenlik düzeylerini doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde, çeşitli yemlerin besin değerleri bakımından sıralandığında, protein içeriği yüksek olan yemlerin, enerji verimliliği açısından daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kanatlı beslenmesinde yemlerin doğru seçimi ve kullanımı, verimlilik ve sağlık açısından büyük bir öneme sahiptir (Goger, 2017; Narinç, 2013; Kaya & Konucuk, 2019; Akosman & ark., 2023; Karadavut & ark., 2014).

Geleneksel Cinsiyet Belirleme Yöntemleri

Geleneksel tarım teknikleri, bitki yetiştiriciliğinde yüzyıllara dayanan köklü bir bilgi birikimi ve titiz gözlemler doğrultusunda şekillenmiş, pratik bir uygulama seti sunmaktadır. Bu teknikler, genellikle bitkilerin morfolojik ve fizyolojik özellikleri üzerinde yoğunlaşarak, üreticilere önemli derecede destek olmaktadır. Geleneksel teknikler, zamanla birlikte evrim geçirerek daha modern uygulamalarla harmanlanmış ve çiftçilere daha sürdürülebilir bir tarım süreci sunmuştur. Geleneksel yöntemler uygulanırken, gözlem süreçleri genellikle civcivlerin hayatlarının ilk birkaç günü veya hafta içerisinde yapılmaktadır. Burada amaç, yüksek bir başarı oranı elde etmektir. Kalifiye yetiştiriciler, belirli fiziksel özelliklerin zaman içerisinde nasıl ortaya çıkıp geliştiği konusunda derin bir bilgiye ve deneyime sahip oldukları için, erkek ve dişi kanatlılar arasındaki ayrımları etkili bir şekilde yapma konusunda ustalaşmışlardır. Ancak, bu gözlem ve sınıflandırma yöntemlerinin başarısı, büyük ölçüde yetiştiricilerin sahip olduğu deneyim ve dikkat seviyesine bağlıdır. Yanlış cinsiyet tahminleri, oldukça ciddi ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Ayrıca, bazı mevcut yöntemler, gözle görünür ayrımların zayıf olduğu durumlarda yetersiz sonuçlar doğurabilir ve bu da yetiştiricilikte sorunlar yaratabilir. Geleneksel cinsiyet belirleme teknikleri, genel olarak oldukça kolay erişilebilir olmaları ve düşük maliyet avantajları ile bilinirler. Bu nedenle özellikle küçük ölçekli işletmelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin cinsiyet belirlemede hata yapma olasılığı, daha gelişmiş ve modern laboratuvar tekniklerine kıyasla oldukça yüksektir. Bu yüksek hata oranı, işletmelerin üretim yönünde büyük bir tehdit oluşturur. Doğa koşullarında meydana gelen değişiklikler ve aynı zamanda eğitim seviyesindeki farklılıklar, cinsiyet belirleme doğruluğunu etkileyebilir. Örneğin, çevresel faktörler ve uygulanan yöntemlerin standart dışı kalması, cinsiyet tespit sürecini olumsuz etkileyebilir.

Sonuç olarak, geleneksel yöntemler, kültürel ve pratik açıdan önemli bir yer tutsa da, mevcut teknik gelişmeler karşısında belirli sınırlara sahip olmaları nedeniyle üretim başarı oranını artırmak amacıyla modern tekniklerle desteklenmeleri kesinlikle önerilmektedir. Bu uyum, özellikle rekabetçi pazar koşullarında işletmelerin daha verimli, etkili ve sonuç odaklı olarak çalışmasına büyük ölçüde yardımcı olur. Müşterilerin taleplerini her zaman karşılamak için, beşeri sermayenin sürekli olarak eğitilmesi ve geliştirilmesi de önem arz eder. Bu durum, sadece işletmelerin sürdürülebilirliği açısından değil, aynı zamanda sektördeki genel standartların yükseltilmesine de katkı sağlar (Aksoy, 1999; Jourdan, 2008; Göçer 2017; Uysal, 1989; Sabuncuoğlu, 2020; Yıldırım, 2015; Tutar & ark., 2025; Çeltikli, 2023; Goger, 2017; Narinç, 2013; Kaya & Konucuk, 2019; Akosman & ark., 2023; Karadavut & ark., 2014).

Yöntemlerin Karşılaştırılması ve Başarı Oranları

Geleneksel cinsiyet belirleme yöntemleri, pratiklik ve maliyet açısından önemli avantajlar sunmakla birlikte, genelde başarı oranları açısından sınırlı başarı sağlamaktadır. Bu yöntemler, çoğunlukla gözlem ve deneyim yoluyla, cinsiyeti ayırt etmek amacıyla farklı morfolojik özellikleri incelemektedir. Örneğin, tüy renkleri, gagaların şekli veya yürüyüş biçimi gibi belirgin ayırt edici özellikler sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin başarı oranları, bireyler ve ırk türleri açısından değişiklik göstermektedir; genellikle elde edilen oranlar %60 ile %75 arasında değişim göstermektedir. Bunun yanı sıra, yaş ve büyüme aşamasına bağlı olarak cinsiyet ayrımı yapmak oldukça zorlaşabilir. Özellikle bazı genç av ve yaban hayvanlarda sonuçlar elde etmek, çoğu zaman imkansız hale gelmektedir. Bu nedenle, geleneksel cinsiyet belirleme yöntemleri, genellikle küçük ölçekli yetiştiriciler tarafından tercih edilmektedir; bununla birlikte, daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik gerektiren büyük ölçekli üretimlerde bu

yöntemlerin yetersiz kaldığı sıkça gözlemlenmektedir. Ayrıca, bu yöntemlerin subjektif ve gözlemsel doğası, operatörlerin deneyim düzeyine bağlı olarak tutarsız sonuçların ortaya çıkmasına neden olabilir. Sonuç olarak, geleneksel teknikler ekonomik ve pratik olmalarına rağmen, başarı oranları ve güvenilirlik açısından modern yöntemlerle karşılaştırıldığında sınırlı kalmakta ve zaman zaman hatalı cinsiyet ayırımlarına yol açabilecek durumlar da yaşanabilmektedir. Bu durumu aşmak ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek için, günümüzde hızla gelişmekte olan ve laboratuvar ortamında kullanılan biyoteknolojik tekniklerin tercih edilmesi büyük bir avantaj sağlayabilmektedir; bu yöntemler, hem doğruluk hem de güvenilirlik açısından önemli faydalar sunmaktadır. Bu yeni yaklaşımlar, geleneksel yöntemlerin sunduğu sınırlamaları aşarak, cinsiyet belirleme süreçlerinde devrim niteliğinde değişimlere kapı aralamaktadır. Açıktır ki, gelecekte daha güvenilir bir yaklaşım benimsemek, tarım ve hayvancılık sektöründe söz konusu cinsiyet ayırma işlemlerinin etkinliğini artıracaktır (Çetin, 2020; Goger, 2017; Narinç, 2013; Kaya & Konucuk, 2019; Karadavut & ark., 2014).

Geleneksel Yöntemlerde Karşılaşılan Sorunlar

Geleneksel cinsiyet belirleme yöntemleri, tarihsel süreçte kanatlı yetiştiriciliği alanında yaygın olarak kullanılmış ve bu yöntemler, uygulama bakımından belirli avantajlar sağlamıştır. Ancak, bu yöntemlerin karşılaştığı temel sorunlar arasında, doğruluk oranlarının düşük olması ve subjektif yargıların etkili olması gibi unsurlar öne çıkmaktadır. Çok sayıda yetiştirici, görsel gözlemler ve fiziksel özelliklere dayalı yöntemlerle cinsiyet ayırımı yapmaya çalışırken, özellikle yavru aşamasında cinsiyet farklarının net olmaması nedeniyle bu yöntemler hatalara oldukça açıktır. Üstelik yaştan ilerlemesiyle birlikte belirleme aşamasında yanlış kararlar almak son derece olası bir durum haline gelmektedir. Bu durum ise,

aynı zamanda hem ekonomik kayıplara neden olmakta hem de genel üretim verimliliğini olumsuz şekilde etkilemektedir. Yöntemlerin başarı oranlarının düşük olması, özellikle yavru döneminde cinsiyet tespitin güvenilirliğini azaltmakta ve doğru sonuçlar alınmasını güçleştirmektedir. Bunun yanı sıra, geleneksel uygulamalar genellikle zaman ve emek açısından da maliyetli bir süreç sunmaktadır. Aynı zamanda, bu yöntemlerin objektif olmaması, yetiştiricilerin bireysel deneyim ve gözlemlerine dayanması, farklı yetiştiriciler arasında tutarsız sonuçların ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Bu faktörler göz önüne alındığında, geleneksel cinsiyet belirleme yöntemlerinin etkinliği, zaman ve kaynak kaybı, doğruluk sorunları ve hatalı cinsiyet ayırımı gibi nedenlerle önemli ölçüde sınırlıdır. Bu sorunların ortadan kaldırılması ve ürün kalitesinin artırılması amacıyla, modern tekniklere geçişin gerekliliği giderek daha belirgin bir hale gelmektedir. Modern yöntemlerinin mevcut sorunları çözme potansiyeli, ilerleyen dönemlerde yetiştiricilik faaliyetlerinin başarılı bir şekilde sürdürülmesi açısından büyük bir fırsat sunmaktadır (Narinç, 2013; Kaya & Konucuk, 2019; Karadavut, & ark., 2014; Aksoy, 1999; Jourdan, 2008; Göçer 2017; Uysal, 1989; Sabuncuoğlu, 2020; Yıldırım, 2015; Tutar & ark., 2025; Çeltikli, 2023; Goger, 2017; Kaya & Konucuk, 2019; Akosman & ark., 2023).

Modern Cinsiyet Belirleme Teknikleri ile Karşılaştırma

Geleneksel cinsiyet belirleme yöntemleri, kanatlılarda cinsiyetin ayırımında gözlem ve fiziksel göstergelerin kullanılması esasına dayanarak işlev görmektedir. Bu yöntemler genellikle ekonomik ve pratik açıdan avantajlı olup, yakın zamana kadar yaygın şekilde tercih edilmiştir. En temel geleneksel teknikler arasında, yavru civcivlerin davranış ve görünüm özelliklerine dayanarak cinsiyetin tahmini önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle, yavruların tüy yapısı, gagası ve ayak yapısı dikkatlice gözlemlenerek, erkekte ve dişide belirgin farklılıklar tespit

edilmektedir. Aynı zamanda, yumurta çatlamadan önce göğüs ve karın bölgesindeki büyüklük ile şekil farkları da dikkate alınmaktadır. Bu yöntemler hem maliyet açısından düşük hem de hızlı sonuç verirken, uygulamada uzmanlaşmış gözlem becerisi gerektirmektedir. Kısacası, bu teknikler, cinsiyet belirlemenin pratik yollarını sunan eski fakat etkili yöntemlerdir. Gözlem becerileri geliştirilerek, daha isabetli sonuçlar elde edilebilir. Ancak, bu geleneksel tekniklerin doğruluk oranları genellikle % 50 ile % 70 arasında değişim göstermekte olup, cinsiyet belirleme konusunda kesinlik ve güvenilirlik sağlamada yetersiz kalmaktadır. Yavruların büyüme süreci ilerledikçe, cinsiyetin ayırt edilmesi de daha karmaşık bir hale gelir; dolayısıyla, zamanla hataların artması kaçınılmaz olur. Bu durum, uygulanan yaklaşımın subjektifliği ve gözlemcinin deneyim ve yetkinliğine olan bağımlılığı nedeniyle, başarı oranlarını olumsuz bir şekilde etkiler. Özellikle büyük ölçekli üretimlerde, bu geleneksel yöntemlerin başarı oranları yetersiz kaldığında, ekonomik kayıplar ve zararlara yol açabilir. Bunun yanı sıra, zaman ve emek açısından disiplinli gözlem gerektiren bu geleneksel yöntemlerin, hız ve doğruluk bakımından modern tekniklerle karşılaştırıldığında önemli dezavantajlara sahip olduğu da gözlemlenmiştir. Bu nedenle, daha kesin ve etkili cinsiyet belirleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel yöntemler günlük pratiklik ve düşük maliyet avantajı sağlamakla birlikte, deterministik ve yüksek doğruluk gerektiren günümüz üretim standartlarıyla uyumlu değildir. Bu durum, hem ekonomik kayıpların önüne geçmek hem de verimliliği arttırmak adına modern cinsiyet belirleme tekniklerinin geliştirilmesine ve yaygınlaştırılmasına ihtiyaç doğurmuştur. (Narinç, 2013; Kaya & Konucuk, 2019; Karadavut & ark., 2014; Aksoy, 1999; Jourdan, 2008; Göçer, 2017; Uysal, 1989; Sabuncuoğlu, 2020; Yıldırım, 2015; Tutar & ark., 2025; Çeltikli, 2023; Goger, 2017; Narinç, 2013; Kaya & Konucuk, 2019; Akosman & ark., 2023).

Gelecekteki Yaklaşımlar ve Sürdürülebilir Üretimde Rolü

Gelecekteki yaklaşımlar, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşmayı ve cinsiyet belirlemede daha yüksek doğruluk sağlamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, moleküler ve genetik teknolojilerin geliştirilmesiyle birlikte, cinsiyet tayini hız ve doğruluk açısından önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Özellikle, DNA bazlı teknikler, düşük hata payıyla ve hızlı sonuçlar elde edilmesine imkan tanımakta olup, büyük ölçekli üretimlerde sürdürülebilirliği destekleyen bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel yöntemlerin yanı sıra, laboratuvar altyapısı gerektiren yüksek maliyetli olmalarına rağmen, zaman içinde maliyetlerin azalması ve erişilebilirliğin artması beklenmektedir. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarıyla entegre edilerek, cinsiyet belirleme süreçlerinde otomasyon ve hız kazanımını hedeflemek önem arz etmektedir. Bu gelişmeler, yalnızca doğruluk oranını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda hayvan sağlığını ve yaşam kalitesini koruyucu uygulamaların geliştirilmesine de önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Sürdürülebilir üretim açısından bakıldığında, gelecekte geleneksel yöntemlerin yerini alabilecek veya onları tamamlayıcı nitelikte yeni teknolojilerin kullanımı, hem verimliliği hem de etik standartları yükseltmeye yöneliktir. Bu doğrultuda, eğitim ve araştırma faaliyetlerinin desteklenmesi, inovatif çözümlerin hayata geçirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi, tarım ve hayvancılık alanındaki temel hedefler arasında yer almaktadır. Gelişmiş cinsiyet tayini teknolojilerinin entegrasyonu, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak önemli bir adım olarak değerlendirilebilecektir. Bu süreç, kanatlı hayvan yetiştiriciliğinin geleceğinde belirleyici bir rol oynayacaktır. Dolayısıyla, bu alandaki gelişmelerin yakın takibi ve doğru bir şekilde uygulanması, tüm sektörde büyük bir fark yaratma potansiyeline sahiptir (Jourdan, 2008; Sabuncuoğlu, 2020; Yıldırım, 2015; Tutar & ark., 2025;

Çeltikli, 2023; Goger, 2017; Nariñ, 2013; Kaya & Konucuk, 2019; Akosman & ark., 2023; Karadavut & ark., 2014; Houchen & ark., 2024; Mishra & ark., 2023; Okuno & ark., 2020).

Sonuç

Geleneksel cinsiyet belirleme yöntemlerinin uygulanmasında bazı belirgin kısıtlamalar gözlemlenmektedir. Bu yöntemlerin, genellikle yüksek olmayan doğruluk oranları, dikkatli gözlem ve kapsamlı bir deneyim gerektirmektedir. Gözlemler, deneyim ve bilgi birikiminin son derece kritik olduğu alanlardır. Cinsiyet tayin süreçleri, zaman alıcı olabilmekte ve bazen güvenilirliği düşük sonuçlarla sonuçlanabilmektedir. Ancak, yeterli eğitim ve deneyimle, belirli yaş grupları ve gelişim aşamalarındaki kanatlılarda başarı oranlarının artırılması mümkündür. Bununla birlikte, gözlemsel doğası ve subjektif yaklaşım gereksinimi, sonuçların tutarlılığını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu bağlamda, geleneksel yöntemlerle cinsiyet belirlemede süreç içindeki hatalar ve çelişkili sonuçlar kaçınılmaz hale gelmektedir. Modern tekniklerin entegrasyonu ve geliştirilmesi, sürdürülebilir ve verimli üretim açısından güvenilirlik sağlamak adına büyük bir önem taşımaktadır. Geleneksel yöntemler, maliyet ve ekipman açısından avantajlı ve ekonomik olsalar da, doğruluk oranlarını artırmak ve hataları minimize etmek amacıyla teknolojik gelişmelerle uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, geleneksel yöntemlerin sunduğu bazı avantajlar mevcutken, özellikle büyük ölçekli ve yüksek verimlilik hedefleyen üretimlerde modern tekniklerin entegrasyonu bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu açıdan, geleneksel yaklaşımların yanında teknolojik altyapının güçlendirilmesi ve eğitim faaliyetleriyle cinsiyet belirleme süreçlerinin iyileştirilmesi, sürdürülebilir, ekonomik ve verimli üretim için atılacak önemli bir adım olacaktır. Aynı zamanda, bu yaklaşım, üretim süreçlerine entegre edilen yenilikçi ve bilimsel yöntemlerle sürekli bir gelişim göstermeyi destekleyecek bir strateji sunmaktadır.

Kaynakça

Abaylı, F. N. (2018). Çiftlik hayvanlarında markör destekli seleksiyon. *Black Sea Journal of Agriculture*, 1(3), 94–101.

Akosman, M. S., Fidan, A. F., & Türkmenoğlu, İ. (2023). *Kanatlı anatomisi ve biyokimyası*. Hiperlink Eğitim İletişim Yayın Gıda Sanayi ve Pazarlama Tic. Ltd. Şti.

Aksoy, F. T. (1999). *Tavuk yetiştiriciliği* (3. baskı). Şahin Matbaası.

Çakmak, E., Akın Pekşen, Ç., & Bilgin, C. C. (2017). Comparison of three different primer sets for sexing birds. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 29(1), 59–63.

Çeltikli, B. (2023). *Sürdürülebilir kalkınma perspektifinden tarımda inovasyon* (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi.

Çetin, E. (2020). *Hayvansal üretim ve kırsal ekonomik kalkınmada kadının rolü ve sosyo-ekonomik durumu: Sakarya ili Ferizli ilçesi örneği* (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi.

Goger, H. (2017). Sex determination methods of chicks before hatching or day-old age. *Journal of Poultry Research*, 14(1), 13–19.

Göger, H. (2017). Cıvciv cinsiyetini kuluçkadan çıkmadan önce veya günlük yaşta belirleme yöntemleri. *Tavukçuluk Araştırma Dergisi*, 14(1), 13–19.

Gürel, Y. (2003). Bolu, Ankara, Sakarya ve İzmir illerindeki kanatlı mezbahanelerinden elde edilen etlik piliçlerin et ve karaciğerinde klenbuterol kalıntılarının incelenmesi. *Etlik Veteriner Mikrobiyoloji Dergisi*, 14(1–2), 32–39.

Houchen, C. J., Bergman-Gonzalez, M., & Bumann, E. E. (2024). A novel qPCR-based technique for identifying avian sex: An

illustration within embryonic craniofacial bone. *John Wiley & Sons*.
<https://doi.org/10.1002/ar.23530>

Jourdan, F. (2008). *Poultry disease* (6th ed.). Sanders, Elsevier.

Karadavut, U., Şahin, A., Taşkın, A., & Akıllı, A. (2014). Japon bıldırcınlarında (*Coturnix coturnix japonica*) büyümenin tek ve çok aşamalı analizlerinin seleksiyon kriteri olarak kullanılabilirliklerinin araştırılması. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 1(4), 539–546.

Kaya, M., & Konucuk, S. (2019). On günlük civciv embriyosunda PCR ile cinsiyet tayini. *Journal of Poultry Research*, 16(1), 19–22.

Mishra, A., Kolangath, S. M., Upadhye, S. V., & Pawshe, M. (2023). P2/P8 primer PCR effective in sex determination in domestic birds. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 11(2), 136–141.
<https://doi.org/10.22271/j.ento.2023.v11.i2b.9186>

Narinç, D. (2013). *Çok özellikli karışık doğrusal model eşitlikleri kullanarak etlik bıldırcın ana ve baba ebeveyn hatları geliştirme üzerine bir araştırma* (Yayımlanmamış doktora tezi).

Okuno, M., Miyamoto, S., Itoh, T., Seki, M., Suzuki, Y., Mizushima, S., & Kuroiwa, A. (2020). Expression profiling of sexually dimorphic genes in the Japanese quail (*Coturnix japonica*). *Scientific Reports*, 10(1), 20073. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77094-y>

Özer, K., Bakır, B., Düzgün, O., & Arslan, M. (1994). Kanatlılarda cerrahi yöntemle cinsiyet tayini. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 5(1), 163–171.

Sabuncuoğlu, K. M. (2020). *Konvansiyonel ve alternatif sistemlerde yetiştirilen Japon bıldırcınlarında büyüme, kesim-karkas*

ve bazı davranış özelliklerinin karşılaştırılması (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi).

Tutar, F. K., Abukalloub, A., & Çat, M. (2025). Geleneksel tarımdan akıllı tarım uygulamalarına dönüşüm süreci: Türkiye örneği. *MTÜ Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 5(1), 46–62.

Uysal, A. (1989). Kanat tüylenmesine göre cinsiyet ayırımına imkân veren beyaz yumurtacı hibrit ebeveynlerinin melez performanslarına göre ıslahı. *Teknik Tavukçuluk Dergisi*, 66, 3–7.

Warren, D. C., & Payne, L. F. (1945). Influence of the early feathering gene upon chick's growth rate. *Poultry Science*, 24, 191–192.

Yıldırım, M. (2015). *Çevresel zenginleştirmenin etlik piliçlerin bazı davranış, büyüme ve karkas özellikleri ile kan parametrelerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi.

BÖLÜM 6

EFFECTS OF BIODIVERSITY IN MAIZE BREEDING

Ahmet OKUMUŞ¹

Immanuel Nana AMUAH²

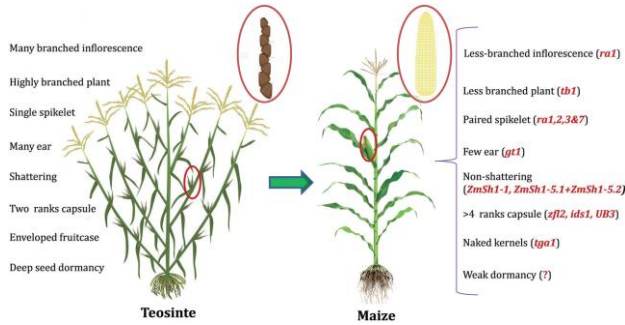
Introduction

Maize (*Zea mays*) is one of the world's most important crops due to its many uses and adaptability. Archaeological studies and evidence point out that maize originated from Mexico (Ranum et al., 2014) and has spread to other parts of the world. Maize evolved from its wild ancestor, teosinte (*Zea mays ssp. parviglumis*), through domestication by ancient farmers in Mexico about 10,000 years ago, selecting traits like larger kernels and fewer branches with the genetic loci such as teosinte branched 1 (tb1) and teosinte glume architecture 1 (tga1) playing pivotal roles in transforming teosinte into modern-day maize with distinct plant architecture and improved productivity (Sharma et al., 2021). Following its domestication, maize has undergone tremendous evolution to become what we have today. *Figure 1* shows the morphological evolutionary changes of before its domestication and now.

¹ Prof. Dr., Aydin Adnan Menderes University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Biotechnology Orcid: 0000-0001-5268-801X

² Master's student, Aydin Adnan Menderes University, Institute of Science, Department of Agriculture Biotechnology, Orcid: 0009-0000-6041-6890

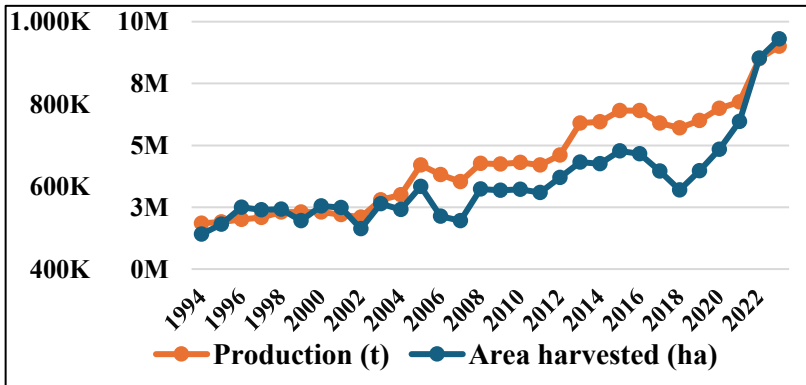
Figure 1: Evolution of maize morphological characters from its ancestor teosinte



Reference: Sharma et al., 2021

Maize is the second most produced agricultural commodity in the world with a production level of 1.24 billion metric tonnes in 2023 with the United States of America being the highest producer globally (FAOSTAT, 2023). In Türkiye, the harvested area and production level of maize has significantly increased over the last two decades with a reported production level of 9 million metric tonnes and ranked as the seventh most produced agricultural commodity in the country in 2023 (FAOSTAT, 2023).

Figure 2: Maize Production and Harvested Area in Türkiye from 1994 to 2023



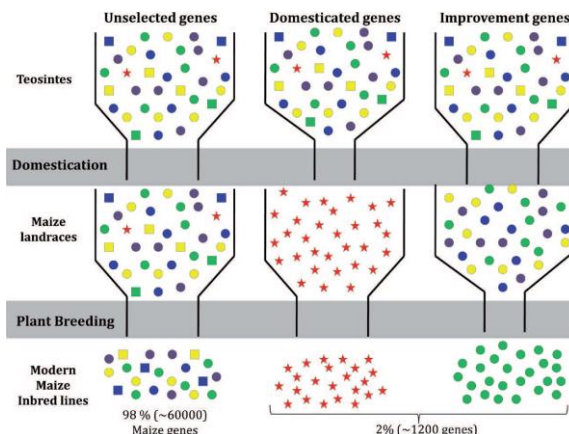
Reference: FAOSTAT, 2023

Due to its adaptability and high yield performance, it has become major staple crop in the world; however, its uses vary greatly

from region to region. Regardless, it is mainly used in the industries to make products such as ethanol and biofuel. In many parts of the maize and its products, including maize flour, are consumed by humans due to its high carbohydrate content, especially in developing countries. Maize also serves as a great source of animal feed, with many farmers relying on maize as the major source of carbohydrates for their livestock. Maize silk has been reported to have the potential to be used in disease treatment (Landeros-Martínez et al., 2023).

Genetic diversity is a key component in plant breeding and crop improvement programmes. It provides the basis for developing superior varieties with desired traits such as tolerance and resistance to biotic and abiotic stress, improved yields, improved nutritional quality and other important traits. Having sufficient genetic diversity allows effective selection in breeding programmes due to the vast differences in qualitative and quantitative traits in a breeding population (Temesgen, 2021). With the replacement of landrace varieties with modern and improved varieties, we are at risk of a narrow genetic base for future breeding programmes, causing a bottleneck in plant breeding. Low genetic diversity poses a significant challenge to food security, as the development of improved crop varieties—essential for ensuring abundant, high-quality, and accessible food—is increasingly critical in a rapidly changing world.

Figure 3: The bottleneck effect showing the loss of genetic diversity



Reference: Sharma et al., 2021

This paper addresses the importance of maize biodiversity and its importance in crop improvement to address food security concerns.

Identification of Genetic Diversity of Maize Populations

Genetic variation is the differences in alleles of genes or RNA arrangements of individual genotypes in a population. Genetic diversity takes into account the total genetic variation in a population. In plant breeding, genetic diversity is more concerned about the amount of genetic variation of traits that can be inherited by offsprings. Maize has a large genetic diversity; this has paved way for several crop improvements and development of new maize varieties. Morphological, biochemical and DNA markers can be used in genetic diversity studies. Despite being used extensively in genetic diversity studies, morphological and biochemical characters are influenced by the environment (Thakur et al., 2017a) and hence, can mask genetic differences and lead to misinterpretation of results. Due to this, these markers are used alongside DNA markers which are rarely influenced by the environment. Several molecular markers have been developed to study genetic diversity including Simple Sequence Repeats (SSRs), Restriction Fragment Length Polymorphism (RFLP), Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD), Single Nucleotide Polymorphism (SNP), Inter Simple

Sequence Repeat (ISSR) and other newly developed markers. However, in maize genetic diversity studies, SSR markers are usually preferred (Baran et al., 2022).

There have been several studies made to assess genetic diversity of maize lines based on morphological, biochemical, molecular markers, a combination of two or sometimes all the three. Thakur et al. (2017b) assessed the genetic diversity of 48 maize genotypes from the North Western Himalayas using morphological traits, biochemical traits, and SSR molecular markers. The study revealed significant variability among genotypes, with LM-19-07 and HKI-1348 identified as superior for grain yield, cob traits, and kernel rows, while LM-19-07 was also the most genetically distant. Their findings suggested LM-19-07 as a promising candidate for future maize breeding programs to enhance genetic improvement and productivity. Adu et al., (2019) determined the genetic diversity and population structure of 70 maize populations developed for tolerance to drought and low soil nitrogen using SSR markers. The study involved genotyping the populations with 31 SSR markers, analysing genetic differentiation, clustering populations, and assessing heterozygosity and gene diversity. The findings revealed high genetic diversity and polymorphism among the populations, with five clusters and two sub-populations identified, making the populations ideal for breeding programs and marker-assisted selection to develop drought and Low-N tolerant maize varieties.

Sources of Genetic Diversity

Sources of genetic diversity are mechanisms by which variation is introduced into a population's gene pool. The main sources of genetic diversity include:

- 1. Mutations:** Mutations are changes that arise when there are changes in the DNA sequence of as a result of insertions, deletions or substitutions of nucleotides. Mutations can be spontaneous like in DNA replication or can be induced by the environment. In maize, there is a

genome-wide deficit of diversity compared to its wild ancestors due to domestication bottlenecks. However, SSRs in maize that have high mutation rates have been shown to partially recover from these bottlenecks and reestablishing genetic diversity (Vigouroux et al., 2005).

2. **Genetic Recombination:** During sexual reproduction, recombination of alleles occurs which leads to different arrangements and combinations of the alleles that ultimately gives rise to a new phenotype (Pan et al., 2016) mapped recombination events across the maize genome using 50,000 SNPs in 12 segregating populations to investigate how recombination contributes to genetic diversity, gene expression and phenotypic variation. They identified 143 recombination hot regions, demonstrating that intergenic recombination drives intraspecific variation, and showed that intragenic recombination significantly correlates with gene expression and agronomic traits.
3. **Structural Variations:** Copy Number Variation (CNV) and Presence/Absence Variation (PAV) contribute to genetic variation. In CNV, there is an addition or deletion of chromosomal segments or even genes that can result in variable copies of the numbers of specific genes. CNV influences gene expression patterns and phenotypic traits. PAV involves the presence and absence of specific genomic regions between different individuals. This difference contributes to variations in genome content gene density and recombination hotspots, especially in inbred lines. CNV and PAV are equally as important as SNPs in contributing to genetic diversity in maize (H. Liu et al., 2019).
4. **Landrace:** Landrace lines are traditionally cultivated forms of domesticated plants that have adapted to local

environmental conditions. They are selected and maintained by farmers. Landraces are rich genetic reservoirs and provide genetic material for breeding programmes (Lazaridi et al., 2024). For instance, maize landraces in the Zoque region in Mexico was shown to exhibit a moderate level of genetic diversity (70%) (Hernández et al., 2025).

5. **Plant Breeding:** Despite being a major source of loss of genetic diversity and genetic bottlenecks, plant breeding techniques can also be used to introduce genetic diversity into breeding populations. Modern breeding techniques are widely used and they have proved to be efficient:
 - a. **Biotechnology:** Biotechnology has revolutionized plant breeding, making it more precise and efficient. Biotechnology uses modern breeding technologies to modify, introduce or even stack alleles into a population. While these tools are used to improve crops, they can also be used to create genetic variety using the same principles. Some of the widely used modern techniques include:
 - **Gene editing:** gene editing techniques has made it simpler for precise genetic modifications of genomes to introduce or enhance desired traits. CRISPR Cas9 technology is preferred for gene editing due to its high accuracy, reduced off-target effects and low cost compared to other tools like zinc finger nucleases and Transcription Activator-Like Effector Nucleases (TALENs) (Akram et al., 2023). CRISPR Cas9 allows researchers to insert a guide RNA sequence into the complex which targets specific DNA sequences (Ravichandran & Maddalo, 2023). CRISPR Cas9 can be used to introduce genetic diversity by enabling targeted mutations at specific genomic sites. It can modify

regulatory elements for fine-tuning gene expression, disrupt upstream open reading frames (uORFs) to enhance protein production and accelerate domestication by editing domestication genes in wild or semi-domesticated plants (Lubis & Butarbutar, 2022).

- **Marker Assisted Selection (MAS):** In MAS, DNA markers are used to screen a population to identify specific genotypes that possess certain traits, bypassing the need to cultivate the crops and wait for the traits to express. As discussed earlier, DNA markers have proved to be effective in assessing genetic diversity; but they can be more effective when used with morphological markers. Aside being used for assessing genetic diversity, MAS can be used to introduce genetic diversity by introducing new and favourable traits from landraces, wild relatives, and related species into crop cultivars (Ibitoye & Akin-Idowu, 2011). This way, trait pyramid can be possible by stacking a variety of desired traits into the genotypes of a breeding population.
- **Genomic Selection (GS):** GS is a breeding technique that uses genome-wide DNA markers to predict the genetic value of individuals for a trait of interest. It involves training a population, determining the effect of phenotypic and genotypic markers on a specific trait, selecting individuals with a high genomic estimated breeding value (GEBV) for breeding. Genomic Selection (GS) can introduce genetic diversity by leveraging gene bank accessions, breaking linkage blocks, increasing favourable allele frequencies, and utilizing targeted phenotyping to uncover hidden trait diversity (Voss-Fels et al., 2018).
- b. **Mutational Breeding (MB):** MB is a powerful technique that has been used to consciously create genetic

mutations in crops to achieve a desired trait. Physical (e.g radiation) or chemical agents can be used to induce these mutations which ultimately leads to genetic changes that may be beneficial (Mir et al., 2020). These mutations can create genetic differences in plants which can later be incorporated into a breeding population. Despite its potential, MB is not widely used due to chromosomal and phenotypic abnormalities, unintended mutations, chimeras and environmental factors (Ali & Suryakant, 2024; Raina et al., 2016).

Importance of Biodiversity in Maize Breeding

Biodiversity plays an important role in improving important agronomic characters in maize such as yield, disease resistance, stress tolerance, stem length and other equally important traits. This diversity allows for the selection of maize varieties that can efficiently adapt to varying environmental conditions and resist biotic and abiotic factors.

1. **Yield Improvement:** Genetic diversity provides breeders with a pool of alleles that can be selected for traits such as grain weight, number of ears per plant, number of kernels per plant, and other traits that are associated with yield in maize. (Turi et al., 2007) evaluated the variability among different maize genotypes for yield-related traits in a breeding programme. They reported significant variability in cob length, grain rows per cob, fresh cob weight, grain moisture content, 300-grain weight, and grain yield. Two genotypes from their study, Sarhad White and FRW-4 x EV-3 (Late) showed superior performance. The presence of diverse alleles allows breeders to select for traits that are favourable under specific environmental conditions, thereby optimizing yield

2. **Disease Resistance:** Sufficient genetic diversity makes it possible to identify and incorporate alleles that confer resistance to various diseases as well as varying levels of resistance to these diseases. (Kamara et al., 2021) observed substantial differences between maize parental lines using SSR markers with an average genetic distance of 0.81, which facilitated the grouping of genotypes into three main clusters. Hybrids derived from genetically diverse parents, such as L5 × T1, L9 × T1, L4 × T2, and L5 × T2, exhibited both high grain yield and strong resistance to Late Wilt Disease (LWD), underscoring the value of leveraging genetic diversity to enhance disease resistance. This diversity is essential for breeding programs aiming to develop varieties that can withstand prevalent diseases in different regions.
3. **Stress Tolerance:** Genetic diversity in maize is crucial for developing stress-tolerant varieties, particularly in the face of climate change, which exacerbates drought and heat stress. This diversity allows for the selection and breeding of maize varieties that can withstand these environmental challenges, ensuring food security and agricultural sustainability. In a study conducted by (Yuan et al., 2019) where they reported the critical role of genetic diversity in improving stress tolerance in maize under drought, heat, and combined stress conditions using genome-wide association mapping and genomic prediction analysis. They identified 1549 significant single nucleotide polymorphisms (SNPs) across 12 trait-environment combinations, with an average phenotypic variation explained (PVE) of 4.33% in 300 tropical and subtropical maize inbred lines. In this study, genetic diversity enabled the identification of significant SNPs and candidate genes associated with stress tolerance

traits, revealing the complex genetic architecture of maize under drought, heat, and combined stress conditions.

Future Directions to Create and Harness Genetic Diversity in Maize Breeding

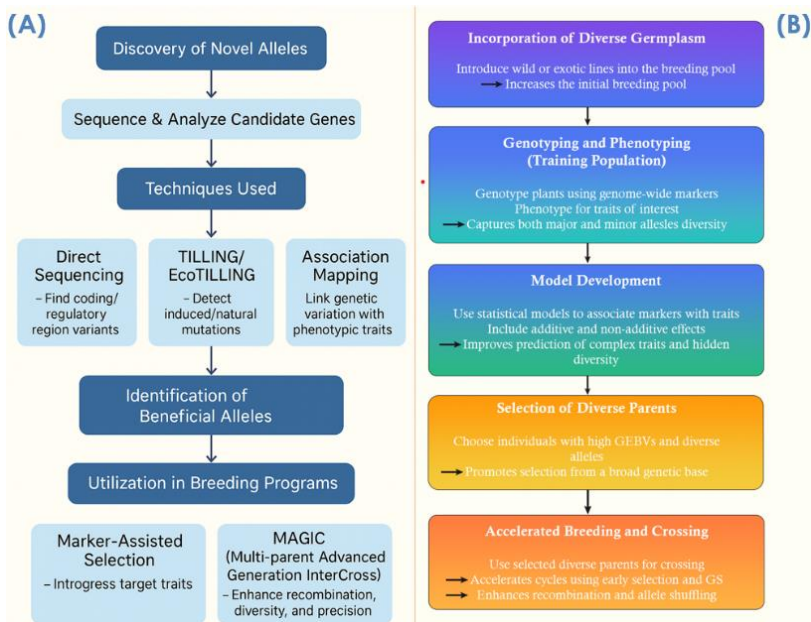
To develop improved maize varieties, it is essential to harness genetic diversity through innovative breeding strategies. Allele mining and genomic selection are promising approaches that can identify and utilize beneficial alleles from diverse genetic backgrounds to allow breeders to focus on specific traits by selecting for genetic markers associated with these traits (Adu et al., 2024). Genetic diversity provides a foundation for selecting donor parents with wide adaptations to various constraints and traits, enabling significant progress in parental line selection, hybrid development, and population improvement.

Strategies for Improvement

1. **Allele Mining:** This involves identifying and utilizing rare alleles that contribute to desirable traits. By exploring the genetic diversity present in both indigenous and exotic maize inbreds, breeders can discover alleles that enhance traits like kernel oil content and disease resistance (Katrul et al., 2024).
2. **Genomic Selection:** Genomic Selection (GS) is a breeding technology that uses genome-wide marker data to predict and select the high-yielding maize individuals based on genomic estimated breeding values (GEBV), accelerating genetic gain while opting to retain or even enhance genetic diversity. GS in multi-parent populations enables accelerated selection and recombination across many generations with the production of high degrees of genetic improvement with only a minimal decline in genetic diversity. GS makes it possible to recover maximum genetic variation, minor and major alleles, to

select for desirable traits without significantly reducing genetic diversity (Crossa et al., 2017; Liu et al., 2018; Rice and Lipka, 2021). GS also performs well in pre-breeding programs by assisting in combining genes of exotic or diversified germplasm into elite breeding lines and expanding the genetic pool and improving the adaptability of new varieties (Crossa et al., 2017; Rice and Lipka, 2021). As compared to traditional phenotypic selection methods, GS has the ability to offer similar or even better genetic gains with better preservation of genetic diversity (Beyene et al., 2019; Zhang et al., 2017). GS is also promising in the sense of substantial cost and time savings by reducing the need for large-scale field testing and shortening the breeding cycle. This efficiency enables breeders to work with more numbers and more genetically diverse populations, increasing the potential for increased environmental adaptation and long-term sustainability of maize breeding programs.

Figure 6: Flow Chart showing the techniques in creating genetic diversity



- Participatory Breeding:** Participatory plant breeding programs have successfully involved farmers in the selection process, leading to the development of maize varieties that are better suited to local conditions and farmer preferences (Witcombe et al., 2003). This approach not only accelerates the breeding process but also ensures that the resulting varieties meet the practical needs of farmers.

Conclusion

Maintaining and utilizing genetic diversity in maize breeding is essential for sustainable agricultural practices and global food security. Genetic diversity provides the foundation for developing superior maize varieties with improved yield, disease resistance, and stress tolerance, enabling adaptation to changing environmental conditions and addressing food security challenges. Innovative breeding strategies, such as allele mining, genomic selection, and participatory breeding, offer promising avenues to harness this diversity effectively.

To ensure the long-term viability of maize breeding programs, it is crucial to prioritize research and conservation efforts aimed at preserving maize biodiversity. This includes safeguarding landrace varieties, leveraging modern biotechnological tools, and fostering collaboration among researchers, farmers, and policymakers. By committing to these actions, we can secure the genetic resources necessary to meet future agricultural demands and sustain global food systems.

References

- Adu, G. B., Awuku, F. J., Amegbor, I. K., Haruna, A., Manigben, K. A., & Aboyadana, P. A. (2019). Genetic characterization and population structure of maize populations using SSR markers. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/J.AOAS.2019.05.006>
- Adu, G. B., Awuku, F. J., Garcia-Oliveira, A. L., Amegbor, I. K., Nelimor, C., Nboyine, J., Karikari, B., Atosona, B., Manigben, K. A., & Aboyadana, P. A. (2024). DArTseq-based SNP markers reveal high genetic diversity among early generation fall armyworm tolerant maize inbred lines. *PLoS ONE*, 19(4 APRIL). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294863>
- Akram, F., Sahreen, S., Aamir, F., Haq, I. ul, Malik, K., Imtiaz, M., Naseem, W., Nasir, N., & Waheed, H. M. (2023). An Insight into Modern Targeted Genome-Editing Technologies with a Special Focus on CRISPR/Cas9 and its Applications. *Molecular Biotechnology*, 65(2), 227–242. <https://doi.org/10.1007/S12033-022-00501-4/TABLES/3>
- Ali, S., & Suryakant, T. N. (2024). Mutation Breeding and Its Importance in Modern Plant Breeding: A Review. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(7), 264–275. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i72581>
- Baran, N., Nadeem, M. A., Yilmaz, A., Andirman, M., Kurt, F., Temiz, G., & Baloch, F. (2022). Exploring Genetic Diversity and Population Structure of Turkish Black Sea Region Maize (*Zea mays* L.) Germplasm using SSR Markers. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3), 953–963. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.1128788>

- Beyene, Y., Gowda, M., Olsen, M., Robbins, K. R., Pérez-Rodríguez, P., Alvarado, G., Dreher, K., Gao, S. Y., Mugo, S., Prasanna, B. M., & Crossa, J. (2019). Empirical Comparison of Tropical Maize Hybrids Selected Through Genomic and Phenotypic Selections. *Frontiers in Plant Science*, 10, 491039. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01502/BIBTEX>
- Crossa, J., Pérez-Rodríguez, P., Cuevas, J., Montesinos-López, O., Jarquín, D., de los Campos, G., Burgueño, J., González-Camacho, J. M., Pérez-Elizalde, S., Beyene, Y., Dreisigacker, S., Singh, R., Zhang, X., Gowda, M., Roorkiwal, M., Rutkoski, J., & Varshney, R. K. (2017). Genomic Selection in Plant Breeding: Methods, Models, and Perspectives. *Trends in Plant Science*, 22(11), 961–975. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2017.08.011>
- FAOSTAT. (n.d.). Retrieved April 17, 2025, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- Hernández, E. de la C., Andueza-Noh, R. H., Latournerie-Moreno, L., Sánchez, E. R., Gordillo Ruiz, M. C., & Pérez, G. R. (2025). *Diversity and Genetic Structure of Maize Landraces Cultivated in the Zoque Region from Chiapas Mexico*. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202501.0577.V1>
- Ibitoye, D. O., & Akin-Idowu, P. E. (2011). Marker-assisted-selection (MAS): A fast track to increase genetic gain in horticultural crop breeding. *African Journal of Biotechnology*, 10(55), 11333–11339. <https://doi.org/10.5897/AJB10.302>
- Kamara, M. M., Ghazy, N. A., Mansour, E., Elsharkawy, M. M., Kheir, A. M. S., & Ibrahim, K. M. (2021). Molecular genetic diversity and line $\times$ tester analysis for resistance to late wilt disease and grain yield in maize. *Agronomy*,

<https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11050898/S1>

- Katral, A., Hossain, F., Zunjare, R. U., Chhabra, R., Vinutha, T., Duo, H., Kumar, B., Karjagi, C. G., Jacob, S. R., Pandey, S., Neeraja, C. N., Vasudev, S., & Muthusamy, V. (2024). Multilocus functional characterization of indigenous and exotic inbreds for *dgat1-2*, *fatb*, *ge2* and *wr1a* genes affecting kernel oil and fatty acid profile in maize. *Gene*, 895, 148001.
- Landeros-Martínez, L. L., Campos-Almazán, M. I., Sánchez-Bojorge, N. A., Flores, R., Palomares-Báez, J. P., & Rodríguez-Valdez, L. M. (2023). Theoretical Studies for the Discovery of Potential Sucrase-Isomaltase Inhibitors from Maize Silk Phytochemicals: An Approach to Treatment of Type 2 Diabetes. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 6778, 28(19), 6778.
- Lazaridi, E., Kapazoglou, A., Gerakari, M., Kleftogianni, K., Passa, K., Sarri, E., Papasotiropoulos, V., Tani, E., & Bebeli, P. J. (2024). Crop Landraces and Indigenous Varieties: A Valuable Source of Genes for Plant Breeding. *Plants* 2024, Vol. 13, Page 758, 13(6), 758.
- Liu, H., Huang, Y., Li, X., Wang, H., Ding, Y., Kang, C., Sun, M., Li, F., Wang, J., Deng, Y., Yang, X., Huang, X., Gao, X., Yuan, L., An, D., Wang, W., Holding, D. R., & Wu, Y. (2019). High frequency DNA rearrangement at *qy27* creates a novel allele for Quality Protein Maize breeding. *Communications Biology* 2019 2:1, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0711-0>
- Liu, X., Wang, H., Wang, H., Guo, Z., Xu, X., Liu, J., Wang, S., Li, W. X., Zou, C., Prasanna, B. M., Olsen, M. S., Huang, C., & Xu, Y. (2018). Factors affecting genomic selection revealed by empirical evidence in maize. *The Crop*

- Lubis, K., & Butarbutar, L. K. S. (2022). Genetic diversity analysis of several maize lines (*Zea mays* L.) developed in acid soil using molecular markers RAPD. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 977(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/977/1/012041>
- Mir, A. S., Maria, M., Muhammad, S., Ali, S. M., Mir, A. S., Maria, M., Muhammad, S., & Ali, S. M. (2020). Potential of Mutation Breeding to Sustain Food Security. *Genetic Variation*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.94087>
- Pan, Q., Li, L., Yang, X., Tong, H., Xu, S., Li, Z., Li, W., Muehlbauer, G. J., Li, J., & Yan, J. (2016). Genome-wide recombination dynamics are associated with phenotypic variation in maize. *New Phytologist*, 210(3), 1083–1094.
- Raina, A., Laskar, R., Khursheed, S., Amin, R., Tantray, Y., Parveen, K., & Khan, S. (2016). Role of Mutation Breeding in Crop Improvement- Past, Present and Future. *Asian Research Journal of Agriculture*, 2(2), 1–13.
- Ranum, P., Peña, J. P., Peña-Rosas, P., Garcia-Casal, M. N., & Nieves Garcia-Casal, M. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105–112. <https://doi.org/10.1111/NYAS.12396>
- Ravichandran, M., & Maddalo, D. (2023). Applications of CRISPR-Cas9 for advancing precision medicine in oncology: from target discovery to disease modeling. *Frontiers in Genetics*, 14, 1273994. <https://doi.org/10.3389/FGENE.2023.1273994/XML/NLM>
- Rice, B. R., & Lipka, A. E. (2021). Diversifying maize genomic selection models. *Molecular Breeding* 2021 41:5, 41(5), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S11032-021-01221-4>

- Sharma, D., K. Khulbe, R., S. Pal, R., Bettanaika, J., & Kant, L. (2021). Wild Progenitor and Landraces Led Genetic Gain in the Modern-Day Maize (*Zea mays* L.) . In *Landraces - Traditional Variety and Natural Breed*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96865>
- Temesgen, B. (2021). Role and economic importance of crop genetic diversity in food security. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, 164–169. <https://doi.org/10.17352/2455-815x.000104>
- Thakur, N., Prakash, J., Thakur, K., Sharma, J. K., Kumari, R., Rana, M., & Lata, S. (2017a). Genetic Diversity and Structure of Maize Accessions of North Western Himalayas Based on Morphological and Molecular Markers. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, 87(4), 1385–1398. <https://doi.org/10.1007/S40011-016-0716-0/FIGURES/4>
- Thakur, N., Prakash, J., Thakur, K., Sharma, J. K., Kumari, R., Rana, M., & Lata, S. (2017b). Genetic Diversity and Structure of Maize Accessions of North Western Himalayas Based on Morphological and Molecular Markers. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, 87(4), 1385–1398. <https://doi.org/10.1007/s40011-016-0716-0>
- Turi, N. A., Shah, S. S., Ali, S., Rahman, H., Ali, T., & Sajjad, M. (2007). *Journal of Agricultural and Biological Science* (Vol. 2, Issue 5). www.arpnjournals.com
- Vigouroux, Y., Mitchell, S., Matsuoka, Y., Hamblin, M., Kresovich, S., Smith, J. S. C., Jaqueth, J., Smith, O. S., & Doebley, J. (2005). An Analysis of Genetic Diversity Across the Maize Genome Using Microsatellites. *Genetics*, 169(3), 1617–1630. <https://doi.org/10.1534/Genetics.104.032086>

- Voss-Fels, K. P., Cooper, M., & Hayes, B. J. (2018). Accelerating crop genetic gains with genomic selection. *Theoretical and Applied Genetics* 2018 132:3, 132(3), 669–686. <https://doi.org/10.1007/S00122-018-3270-8>
- Witcombe, J. R., Joshi, A., & Goyal, S. N. (2003). Participatory plant breeding in maize: A case study from Gujarat, India. *Euphytica*, 130(3), 413–422. <https://doi.org/10.1023/A:1023036730919/METRICS>
- Yuan, Y., Cairns, J. E., Babu, R., Gowda, M., Makumbi, D., Magorokosho, C., Zhang, A., Liu, Y., Wang, N., Hao, Z. F., Vicente, F. S., Olsen, M. S., Prasanna, B. M., Lu, Y., & Zhang, X. (2019). Genome-wide association mapping and genomic prediction analyses reveal the genetic architecture of grain yield and flowering time under drought and heat stress conditions in maize. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01919>

